

Caracterización de cambios de volumen en hormigones producidos en Cuba y sus aplicaciones

Characterization of volume changes in concretes produced in Cuba and its applications

Fecha de entrega: 4 de diciembre 2016

Fecha de aceptación: 15 de noviembre 2017

Rafael Ramirez¹, Ernesto Chagoyén² y José Fernando Martirena³

¹ Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Oficina de Consultoría y Diseño, Calle 100, No. 9107, Entre Vento y 16, Boyeros, La Habana, Cuba, rafael@enia.co.cu

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Carretera a Camajuani, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, chagoyen@uclv.edu.cu

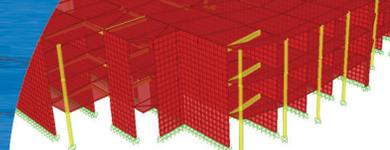
³ Centro de Investigación de las Estructuras y los Materiales de Construcción CIDEM, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Carretera a Camajuani, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, fmartirena@ecosur.org, f.martirena@enet.cu

La retracción por secado es un fenómeno interno en el hormigón, que puede generar esfuerzos de tracción en los elementos constructivos constituidos por este material y, por tanto, agrietarse. El artículo trata de la caracterización de este fenómeno en obras constructivas del cayerío norte de Cuba. El protocolo de investigación concebido incluye: la caracterización de grietas existentes en edificios, el estudio de materiales, la obtención experimental de valores de deformaciones de retracción, la comparación de valores de deformación obtenidos experimentalmente con los proporcionados por modelos de predicción de retracción en el tiempo y su uso en modelos estructurales de los edificios en estudio, para predecir los efectos estructurales de tales deformaciones. Los resultados obtenidos permiten concluir que las grietas en los edificios estudiados, pueden comprometer severamente la durabilidad de las obras. La comparación de los resultados con los proporcionados por los modelos teóricos estudiados permite asegurar que ninguno de ellos es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento de las deformaciones obtenidas durante las mediciones experimentales, mostrando la importancia de determinar experimentalmente los valores de las deformaciones por retracción. Aunque, el modelado del efecto de la retracción en las estructuras muestra esfuerzos de tracción superiores a los que el hormigón puede resistir, los patrones de fisuras determinados por el modelado coinciden con los reales que se reportan en los edificios estudiados.

Palabras clave: hormigón, retracción, fisuración, modelación, análisis no lineal por etapas de construcción

Drying shrinkage is an inner phenomenon in concrete, which can generate tensile stresses in constructive elements constituted by this material and hence cracking. This paper deals with the characterization of this phenomenon in constructive works of the northern keys of Cuba. Research protocol conceived includes: characterization of existing cracks in buildings, study of materials, the experimental determination of the values of shrinkage deformations, comparison of the experimental values of deformation obtained with those provided by models of shrinkage prediction versus time, and their use in structural models of the buildings under study, to predict the structural effects of such deformations. Obtained results allow the conclusion that cracks in the studied buildings, can severely compromise the durability of the works. Comparison of the results with those provided by the theoretical models studied, lead to ensure that none of them is able to adequately reproduce the behaviour of the deformations obtained during the experimental process, showing the importance of the experimental determination of shrinkage deformation values. Although, the modelling of the effect of the shrinkage in structures shows tensile stresses surpassing those that concrete can resist, crack patterns determined by modelling coincide with the real ones that are reported in the studied buildings.

Keywords: concrete, shrinkage, cracking, modelling, nonlinear staged construction analysis



Introducción

En Cuba existe un gran número de edificaciones de hormigón armado afectadas por las diferentes manifestaciones del fenómeno de la retracción. Estas afectan severamente la durabilidad y confort de las obras (ACI, 1993), lo cual constituye un gran problema económico y social debido a que los daños ocasionados representan severas inversiones por conceptos de reparación para las edificaciones afectadas. La fisuración del hormigón en las edificaciones ha sido en la historia de la construcción un gran problema (Álvarez, 2003). Este fenómeno en el hormigón puede surgir por diferentes causas (Weiss *et al.*, 1998), siendo las principales: los esfuerzos aplicados, la mala calidad del cemento, la reacción del álcali con agregados, el ataque por sulfatos, la corrosión del refuerzo, el congelamiento, la restricción o contracción no uniforme, cambios de volumen derivados de la propia naturaleza del hormigón o por variaciones de las condiciones ambientales. De ahí la importancia de desarrollar una investigación, que permita la evaluación de los hormigones producidos en Cuba ante el cambio de volumen para diferentes condiciones de explotación, a través de la caracterización de los materiales componentes y de las propiedades en estado endurecido de los hormigones. Del mismo modo, es necesaria la evaluación del estado real de fisuración de las estructuras construidas con los materiales y mezclas evaluados.

La presente investigación está orientada hacia el estudio de la fisuración y/o agrietamiento del hormigón producido por el cambio de volumen derivado de la retracción del hormigón. Para cumplir este objetivo se realizarán mediciones de los valores de encogimiento generados en diferentes muestras de hormigón en condiciones de libre apoyo, tal como se plantea en ASTM C157 (2006).

La retracción ocurre debido a que la desecación en el hormigón es mayor en las partes exteriores que en las interiores, generándose en los elementos, tensiones internas de tracción a causa de dicho gradiente de humedad, lo que conduce a la formación de fisuras en la masa del hormigón, particularmente en la interface árido-pasta (Chen *et al.*, 2013). La misma es afectada

por numerosos factores, entre los más influyentes se encuentran: edad del hormigón, grado de exposición de la pieza, espesor de la pieza, cuantía y disposición de las armaduras, humedad del ambiente de curado, naturaleza de los áridos, contenido de áridos, contenido de agua, contenido de cemento, relación a/c de la mezcla, proporción árido/cemento y curado (Sant, 2009). El incremento en la ocurrencia de agrietamiento en los elementos de hormigón debido a los cambios de volumen, ha provocado el desarrollo de innovadores métodos para mitigar este proceso (ACI, 2008). Para ello existen diferentes métodos como el curado interno, el uso de cementos expansivos y los aditivos reductores de la retracción SRAs. También pueden adoptarse medidas estructurales como las juntas.

La aplicación de los resultados de los valores de encogimiento obtenidos a los sistemas de generación del comportamiento de los materiales en modelos de estructuras que se fisuran, permite determinar las causas del surgimiento de los patrones de agrietamiento existentes en las edificaciones, así como permite valorar estructuralmente los métodos a aplicar, para lograr su erradicación o mitigación (Díaz, 2012). No obstante, debido a la importancia del tema y la imperiosa necesidad de eliminar los efectos indeseados de la retracción, se estudian de manera continua y creciente diferentes variantes de formas de combatir este fenómeno, de manera tal que se logre la obtención de soluciones más económicas. En consecuencia con lo anteriormente planteado, en el presente trabajo se evalúa el posible efecto reductor de la retracción que ofrecen las puzolanas activas, específicamente, las Tobas Zeolíticas de la cantera de Tasajeras, las cuales desde el punto de vista de la economía nacional representan una solución factible para la problemática planteada.

Modelos que consideran la retracción

Existen varios tipos de deformaciones por cambio de volumen, las cuales se resumen en la Tabla 1. Sin embargo, durante el análisis de su efecto en estructuras de hormigón, solo dos tipos de retracción se toman en cuenta: la retracción por secado y la retracción autógena (Gribniak *et al.*, 2008).

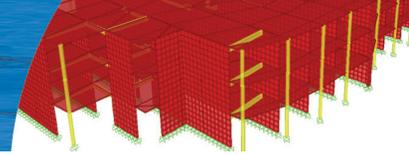


Tabla 1: Tipos de deformaciones por retracción

Plástica	Autógena	Por carbonatación	Por secado
Pérdida de humedad del hormigón fresco	Retracción temprana causada por pérdida de agua debida a la capilaridad de los poros durante las reacciones de hidratación del cemento, sin pérdida de agua hacia el medio circundante	Causada por la reacción química de varios productos de la hidratación del cemento con el dióxido de carbono presente en el aire	Debida al secado del homigón endurecido por difusión del agua hacia el medio circundante, resultando en desarrollo de esfuerzos de tensión

La relación entre la retracción autógena y la retracción por secado se muestra en la Figura 1, donde se destaca la superioridad de los efectos de la retracción por secado sobre la retracción autógena, sobre todo en hormigones normales como los mayoritariamente producidos en Cuba. En el caso del hormigón normal, no habría mayores dificultades si el problema se aborda sin distinguir entre una y otra retracción, porque en este, la retracción autógena varía entre 20 y 110 μs (micro strains, 0.002 a 0.011%), lo cual es sólo el 10 a 20% de la retracción a largo plazo, es decir, retracción total (Silliman y Newton, 2006). Consecuentemente, la retracción autógena fue despreciada durante muchos años.

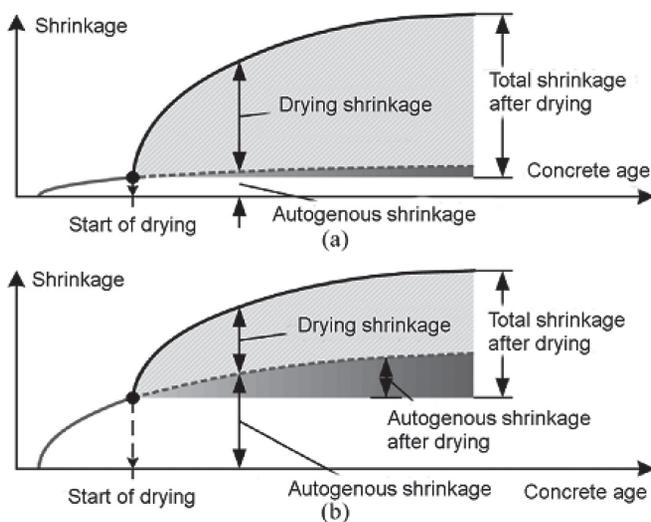


Figura 1: a) Componentes de la retracción en hormigón normal y b) de alta resistencia (Sakata y Shimomura, 2004)

El método de predicción general de las deformaciones

por retracción ϵ_{sh} de Branson (1977) ofrece una ecuación estándar y sencilla para hormigones de 10 cm de asentamiento, 40% de humedad relativa y un espesor mínimo de los miembros estudiados de 15 cm, luego de siete días de curado húmedo, representada como sigue (Branson, 1977; Wang y Salmon, 2002):

$$\epsilon_{sh} = \left(\frac{t}{35 + t} \right) \epsilon_{shu} \quad (1)$$

Siendo t el tiempo medido en días luego del curado húmedo y ϵ_{shu} es la deformación última por retracción, valor para el cual Branson sugiere usar 800 $\mu m/m$ para las condiciones promedio, reconociendo que varía en un intervalo desde 450 a 1000 $\mu m/m$ (0.045 a 0.1%). También ofrece factores de correlación con la humedad relativa HR.

El modelo de CEB-FIP (1993) para la retracción resulta válido para hormigón con grado hasta C80 de densidad normal, y expuesto a una humedad relativa media en el intervalo de 40 a 100%. En el momento cuando el código fue preparado, la información disponible sobre hormigones con una resistencia característica superior a 50 MPa era muy limitada y por lo tanto los modelos deben usarse con precaución en ese intervalo de resistencias. La deformación por retracción ϵ_{sc} se calcula como:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cs0} \beta_s (t - t_s) \quad (2)$$

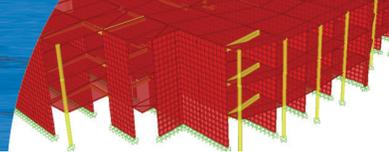
donde ϵ_{cs0} es el coeficiente de retracción nominal, β_s es la función de tiempo que describe la evolución de la retracción con el tiempo y t_s es la edad del hormigón cuando comienza el secado, en días. El coeficiente de retracción nominal ϵ_{cs0} puede estimarse de:

$$\epsilon_{cs0}(t, t_s) = \epsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (3)$$

donde

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - 0.1f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right], & \text{si } RH < \beta_{s1} \cdot 99\% \\ 0.25, & \text{si } RH \geq \beta_{s1} \cdot 99\% \end{cases}$$



donde β_{sc} es un coeficiente que depende del tipo de cemento, 4 para cementos que endurecen lentamente, 5 para cemento normal y rápido endurecimiento y 8 para cemento de alta resistencia de endurecimiento rápido. El factor β_{s1} fue asumido igual a 1.0. RH en (4) no debería ser inferior al 40%. El desarrollo de la retracción con el tiempo se da por:

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{t-t_s}{0.035h_0^2 + t-t_s}} \quad (5)$$

El modelo CEB-FIP (1993), utilizado en la modelación de la presente investigación, está implementado en SAP2000 (2016), software a utilizar en este trabajo. Para tener un criterio cuantitativo de la influencia de las magnitudes que se presentan en las expresiones anteriores que evalúan el desarrollo de las deformaciones de retracción en el tiempo, se realizó un análisis comparativo de las magnitudes de deformación brindadas por estos modelos para casos similares de comparación. Los mismos son: una columna de 15 x 50 cm, un muro de espesor 15 cm y longitud infinita y uno de los muros del caso de estudio que se presenta en epígrafes posteriores. De acuerdo con el modelo, el parámetro de dimensión nominal juega un papel esencial en el desarrollo de las deformaciones por retracción en el tiempo a edades tempranas como se muestra en la Figura 2, siendo mayores a medida que la sección es más cercana a la forma cuadrada, aunque el valor a largo plazo es prácticamente el mismo. Por otra parte, se observa que los valores predichos por Branson, concuerdan aceptablemente en orden de magnitud con los que plantea el modelo del CEB-FIP (1993).

Los valores de retracción se mueven entre límites que oscilan entre 350 y 800 μs , luego de evaluar la influencia de varios parámetros, considerando una humedad relativa $HR = 65\%$, la cual puede ser una condición severa y frecuente en la época de seca de Cuba. En la época de lluvias en que pueden darse humedades relativas sostenidas de $RH = 90\%$, estos valores bajan y oscilan entre 120 μs y 300 μs , según los modelos recogidos.

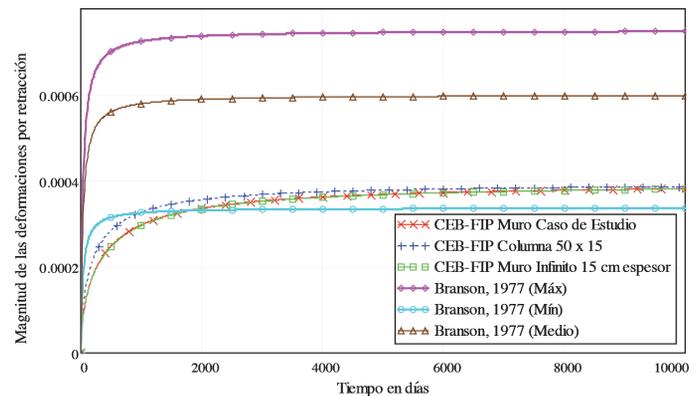
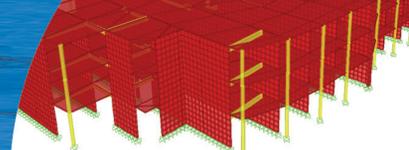


Figura 2: Desarrollo de la retracción en el tiempo según diferentes modelos teóricos, mostrando la influencia de la dimensión nominal

Programa experimental

La presente investigación utiliza como caso de estudio obras constructivas destinadas al turismo, ubicadas en el cayero norte de Cuba, sometidas a un ambiente agresivo, caracterizado por la presencia marcada del aerosol marino con altas concentraciones de iones cloruros. Por lo que se presume que la fisuración como consecuencia de los procesos corrosivos de las armaduras de refuerzo afectará su durabilidad. Son edificaciones de tres niveles constituidos por muros y losas continuas de hormigón armado.

En el trabajo se realiza una caracterización detallada del proceso de fisuración sufrido por estas estructuras a causa de la retracción. También se caracteriza el proceso tecnológico de preparación, colocación y curado del hormigón en las obras. Se obtienen los valores de retracción unitaria para condiciones de apoyo no restringidas en diferentes mezclas de hormigón, que simulan las condiciones reales del hormigón en la obra y la inclusión de diferentes concentraciones de materiales que tienden a mejorar la estructura de poros del hormigón. Finalmente se realiza la modelación del proceso de retracción del hormigón en diferentes modelos matemáticos establecidos en las normativas internacionales y se comparan con los valores reales obtenidos en el proceso investigativo y por último se modela el efecto de los cambios de volumen en el tiempo, empleando el modelo CEB-FIP (1993) para la retracción y el análisis no lineal por etapas de construcción de SAP



2000. Empleando el criterio de Mohr-Coulomb, se determina el primer patrón de grietas, que revela una coincidencia aceptable con los patrones existentes en los edificios

Materiales utilizados

Para la confección de las muestras se emplean los mismos materiales empleados en las obras donde se ejecutan los edificios objeto de estudio. Las características principales de los áridos utilizados se muestran en las Tablas 2 y 3.

Árido fino y grueso

Las propiedades de los áridos influyen de forma considerable en las propiedades del hormigón con ellos fabricados. Estos provienen de la cantera Mariano Pérez “El Purio”, ubicada en la provincia Villa Clara.

Tabla 2: Características de los áridos finos utilizados de la cantera Purio

Propiedad árido	fino	grueso
Densidad corriente, g/cm ³	2.63	2.53
Densidad saturada, g/cm ³	2.64	2.58
Densidad aparente, g/cm ³	2.72	2.66
Densidad suelta, kg/m ³	1536	1404
Densidad compactada, kg/m ³	1698	1508
Absorción, %	1.24	2
Material más fino que el T. 200 %	0	6.1*
Terrones de arcilla, %	0.15	0.1
Porcentaje de huecos, %	36.3	39.2
Tamaño máximo, mm	9.52	19.1

* Partículas planas y alargadas, %

Arena sílice

Esta proviene de la cantera ubicada en Trinidad, provincia de Sancti Spíritus.

Cemento Portland

Tabla 5: Composición mineralógica del cemento de la fábrica Karl Marx

Óxidos, % peso	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	otros	LOI	total	Alcalis, % (Na ₂ O) eq
		22.03	4.85	3.23	60.58	1.65	3	0.3	0.62	0.25	0.17	3.31	

El cemento utilizado en la fabricación de las mezclas de hormigón fue Portland 350 sin adiciones, de la fábrica de cemento Karl Marx, provincia de Cienfuegos. Este cemento Portland posee las propiedades reflejadas en las Tablas 4 y 5.

Tabla 3: Principales características de los áridos utilizados

Ensayo	ARENA	GRAVILLA	SÍLICE	ESPECIFICACIÓN
Material más fino que T-200, %	2.5*	0.77*	1.61	< 2
Terrones de arcilla, %	0.5*	0.1*	0	< 0,25
Partículas planas y alargadas, %	-	7.4*	-	< 10
Densidad corriente, g/cm ³	2.58*	2.56*	2.62	< 2,5
Absorción, %	2.4*	2.4*	0.62	< 3

* conforme NC

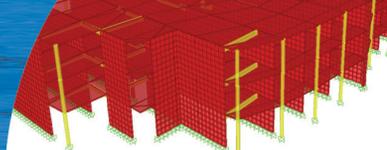
Tabla 4: Propiedades del cemento P 350 utilizado en la fabricación de las mezclas

Ensayo	Resultado	Especificación
Tiempo de fraguado inicial, h	2.42*	> 0.75
Tiempo de fraguado final, h	4.2*	< 10
Finura de molido, %	7.5*	< 10
Densidad real del cemento, g/cm ³	3.09	-
Resistencia compresión 7 días, MPa	30.9*	> 25.0
Resistencia flexo-tracción 7 días, MPa	5.4*	> 4.0
Resistencia compresión 28 días, MPa	39.8*	> 35.0
Resistencia flexo-tracción 28 días, MPa	6.7*	> 6.0

* conforme NC

Aditivo

Los aditivos empleados en la investigación tienen como objetivo mejorar o modificar las propiedades del hormigón hidráulico. En los hormigones elaborados se utilizó el aditivo denominado N-100RC, súper fluidificante de alta concentración, reductor de agua y



retardador, formulado para climas calientes.

Zeolita

La zeolita empleada denominada Zeomicro, procede del yacimiento Tasajeras en San Juan de los Yeras, Ranchuelo, sus principales características son mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6: Características principales de las zeolitas del yacimiento Tasajeras

Densidad, g/cm ³	Absorción, %	Volumen total de poros, m ³ /g	ϕ_{medio} , mm					
2.33	6.3	0.067	0.287					
Análisis químico, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃
64.39	11.76	3.64	1.96	1.07	0.4	0.61	0.31	< 0.1

Dosificaciones utilizadas

La formulación del diseño del experimento involucra 6 dosificaciones (ver Tabla 7), 1 muestra patrón o referencia HPN, 2 se corresponden a disciplinas tecnológicas en las que se incurre frecuentemente en el proceso productivo, siendo estas disciplinas: exceso de agua en la mezcla debido a la no realización del ajuste de humedad de la mezcla en función de la humedad de los áridos HPMA y exceso de agua en la mezcla producto del vertimiento de esta como vía de mantenimiento de la laborabilidad en la obra por atrasos en el vertido del hormigón HPNA. Los 3 restantes se corresponden con propuestas de mejora, las cuales consisten en la reducción de la cantidad de cemento en la mezcla HPM y dos propuestas de mezclas con adición de zeolita, siendo utilizada la misma como adición puzolánica HPMZ y HPMZA.

Métodos de ensayos

La medición de las deformaciones provocadas por la retracción por secado se realiza conforme a la norma ASTM C157 (2006). En ella se plantea como requerimiento el posible empleo de 2 tipos de probetas prismáticas en dependencia del tamaño máximo TM del árido empleado en las mezclas. Como el TM del árido grueso empleado es 19.1 mm, se selecciona las dimensiones de la probeta 75 x 75 x 285 mm. Se establecen 3 muestras por cada condición a ensayar.

Tabla 7: Composición de materiales de las dosificaciones utilizadas

	Dosificación para 1 m ³					
	HPN	HPNA	HPM	HPMA	HPMZ	HPMZA
Arena, kg	856	856	940	940	902	902
Gravilla, kg	856	856	856	856	857	857
Cemento, kg	390	390	350	350	350	350
Aditivo, l	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Agua, l	185	237	165	213	185	237
Zeolita, kg	-	-	-	-	27	27

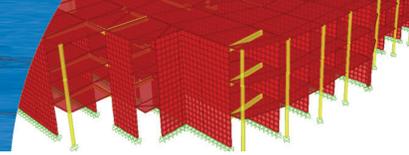
En la cara superior e inferior de las probetas se ubican puntos de medición fijos, los cuales constituyen referencias constantes e invariables para realizar las mediciones posteriores. A 24 horas de hormigonadas las probetas deben ser desencofradas y medidas por vez primera.

Para la realización de las mediciones de encogimiento las muestras permanecerán sumergidas durante los primeros 28 días en una tina de curado con humedad constante de 100%, siendo sometidas posteriormente a condiciones similares a las de explotación mediante la aplicación de dos regímenes de condiciones ambientales: régimen de sol y régimen de sombra.

En el régimen de sol las muestras son colocadas en una estufa con temperatura y humedad relativa controlada. Dentro de la estufa es simulada la condición de cara exterior de los muros, en las condiciones de la zona de explotación, donde se 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%.

En el régimen de sombra se exponen las muestras a condiciones similares a la de una habitación cuando es encendido el aire acondicionado, donde se experimentan temperaturas entre 22 y 25°C y una humedad relativa entre 45 y 50%. Para ello se trasladan las probetas a una habitación climatizada donde puedan controlarse constantemente los parámetros de humedad y temperatura.

A las muestras de hormigón se les realiza el ensayo de resistencia a compresión según plantean las



normas NC 244 (2003) y NC 192 (2007). Como parte del proceso de investigación se realizó la caracterización detallada de edificaciones afectadas por la fisuración provocada por la retracción por secado. Las mediciones se realizaron mediante un microscopio para medir fisuras de precisión 0.02 mm, las cuales se muestran expresadas en milímetros. El procedimiento es sencillo y se logra realizar en poco tiempo, el mismo tiene en cuenta la medición de tres puntos significativos en cada una de las grietas; de estos se calculó un valor promedio que sería el espesor aproximado de la grieta. Los valores obtenidos se comparan con los valores de fisuración permisibles establecidos en la norma cubana NC 207 (2003).

Para la modelación matemática del comportamiento de las edificaciones afectadas por la fisuración, teniendo en cuenta el efecto de las magnitudes de las deformaciones por retracción con respecto al tiempo de utilización de la estructura, será utilizado el software de cálculo estructural SAP2000 (2016).

Medición de las grietas existentes en edificios

Como caso de estudio para la medición de las grietas existentes se tomó una estructura de hormigón cuyos elementos se encuentran vinculados de manera tal que garantizan la continuidad estructural entre ellos. Esta edificación es un edificio habitacional de tres niveles destinado a la actividad hotelera. En la actualidad el mismo se encuentra afectado por un marcado proceso de fisuración. En este edificio se realizaron las mediciones en el momento en que el mismo tenía 60 días de ejecutado, encontrándose patrones de fisuras muy similares en los muros. Las más comunes son las que proceden de las instalaciones eléctricas, las cuales se presentan generalmente en toda la altura del muro, en ocasiones se muestran por ambas caras del mismo, ya sea de forma vertical o inclinadas con un ángulo de aproximadamente 45°. Así mismo fueron detectadas otras lesiones provenientes de los separadores que se utilizan en el hormigonado de los muros. También se encontraron fisuras horizontales que deben su origen a que los moldes metálicos son retirados antes de tiempo, en especial si el hormigón aún no había fraguado, esto

provoca un pandeo en el muro que pudo ser la causa de la aparición de momentos flectores que causaron tensiones de tracción que el hormigón no es capaz de resistir y por ende se desencadena la fisuración.

Las fisuras verticales aparecen en casi todo el ancho del muro incluso en algunas de ellas se ramifican, estas presentan longitudes de menos de 1 m y hasta más de 2 m, las que miden más de 2 m son las fisuras verticales que generalmente tienen su origen en los conductos de las instalaciones eléctricas, es importante destacar que en algunos casos estas fisuras atraviesan el espesor del muro y pueden ser vistas en ambas caras. Los espesores medidos oscilan entre los 0.04 mm y 1.73 mm, superando en ocasiones los valores límites de ancho de fisuras establecidos en la NC 207 (2003), situación que compromete de manera severa la durabilidad del inmueble (Helene y Pereira, 2003). La Figura 3 muestra un ejemplo de fisura, medición y vista ampliada de la fisura.

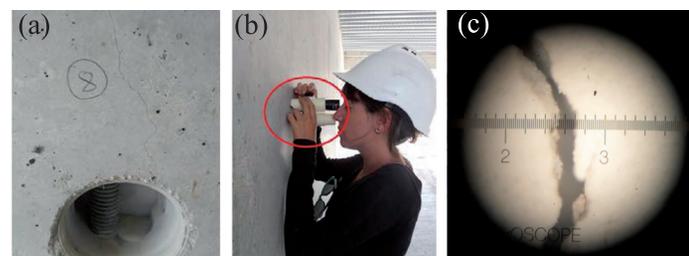
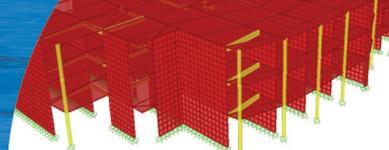


Figura 3: a) Fisura, b) medición del ancho de la fisura y c) vista ampliada

Medición de la deformación por retracción en hormigones en el laboratorio

Las fisuras provocadas por fenómenos internos del hormigón ocurren por cambios de volumen producidos en un principio por la propia hidratación del cemento. Esta fase se conoce generalmente como retracción química y retracción autógena, y ocurre generalmente en los primeros días de edad del hormigón (Sant *et al.*, 2007). A edades más tardías se pueden producir cambios en la masa de agua en el sistema de poros producto de la existencia de gradientes de humedad relativa HR. Estos cambios inducen fuerzas capilares, a veces de cierta intensidad, que favorecen la retracción de la matriz, y le provocan agrietamiento.

Por estas razones se realizó un minucioso proceso de



medición de las deformaciones unitarias manifestadas por las 6 mezclas de hormigón descritas en el epígrafe de caracterización de materiales, que permitió constatar las deformaciones experimentadas por las mezclas durante la etapa de formación de su estructura de poros y durante el sometimiento a la variación de las condiciones ambientales.

La Figura 4 muestra los valores de retracción medidos en la muestra durante su hidratación, y posteriormente, en las etapas de sol y sombra, es decir, variación de las condiciones ambientales. En la misma figura se distingue fácilmente la manifestación de los tres estados de deformación de las mezclas de hormigón: primera retracción, valores +; hinchamiento valores - y segunda retracción, valores + (Ossa y David, 1992).

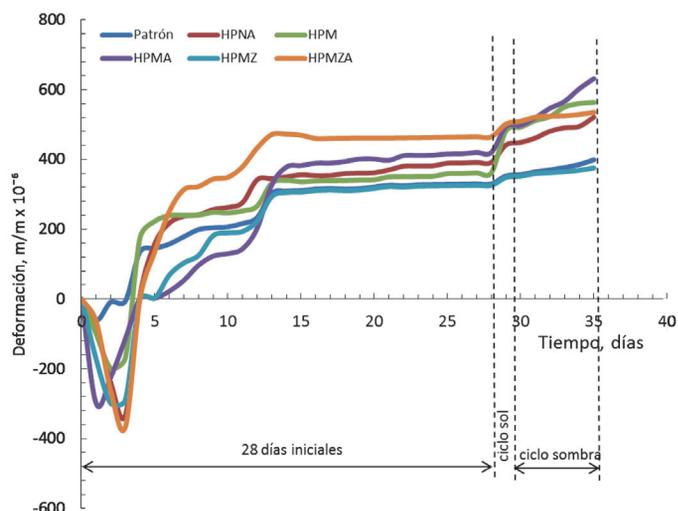


Figura 4: Comportamiento de las deformaciones por retracción HPN en las muestras

Los valores de hinchamiento medido se deben a que los efectos de la retracción son inicialmente (solo en aproximadamente las 40 horas iniciales después del fraguado) sobrepasados por los procesos expansivos de la formación de la etringita (Bentz *et al.*, 2001).

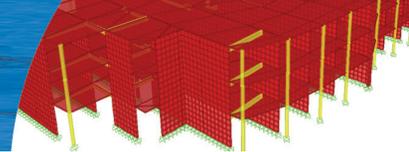
A partir de los valores de deformación obtenidos se logra demostrar que el agrietamiento en los muros se debe al desarrollo de las deformaciones producto de la retracción, puesto que todos los valores de deformación experimentados por las muestras superan los 150 μ s. Debido a que la capacidad de deformación por tracción del hormigón puede ser de 150 μ s o menos, habrá fisuración si en un miembro de

hormigón la retracción está restringida (ACI, 2001).

Los resultados de las mediciones demuestran la influencia significativa en el aumento de las deformaciones producto del incremento en la relación agua/cemento en la mezcla lo que cuantitativamente representa, según los resultados obtenidos, un aumento del 22.3%. También se demuestra que la reducción de la cantidad de cemento de la mezcla no es una solución viable para lograr la reducción de las deformaciones, ya que esta variante provoca el incremento de las mismas. Sin embargo, se demostró que la utilización de la puzolana zeolitizada como adición a la pasta de cemento del hormigón es una solución factible para la reducción de las deformaciones experimentadas por el material, ya que esta variante logró experimentar una reducción del 7.28% de las deformaciones totales experimentadas por las muestras. Este favorable efecto puede encontrar su origen en que la adición mineral cal-puzolana contribuiría en la complementación de la distribución granulométrica de los finos. Esto favorece la disminución del desarrollo de la retracción a partir del aumento de la cantidad de pasta de la mezcla (Bouhamou *et al.*, 2013). Así el hidróxido de calcio puede llegar a ocupar los espacios vacíos entre los granos de cemento y eventualmente la puzolana de alta finura ocupar los diminutos espacios existentes entre pequeños granos del agregado fino. Este principio se aplica en la obtención de hormigones auto-compactantes y de altas resistencias, logrando excelentes resultados en las propiedades mecánicas y de durabilidad, además de reducir notablemente el índice de consumo del cemento portland ordinario (Martirena, 2004).

Medición de la resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados a las muestras a los 90 días de elaboradas que se muestran en la Figura 5, son coherentes con los resultados anteriores, puesto que las muestras que mayor valor de resistencia aportan son las producidas con adiciones de zeolita. Esto confirma el aporte de la reacción puzolánica al refinamiento de la estructura de poros ya observado en la medición de los valores de retracción, pero también



el efecto indirecto de incrementar resistencia. No se puede descartar el efecto de relleno de las puzolanas añadidas, sobre todo a una mezcla original que tiene un defecto de finos. Es válido destacar que los resultados obtenidos en el laboratorio son muy consistentes con los obtenidos en mezclas reales producidas y colocadas en obra, donde la resistencia característica está alrededor de 40 MPa para un hormigón concebido para 30 MPa. Estos resultados confirman que la mejor solución de las evaluadas para mitigar el fenómeno de la retracción es la adición de tobas zeolíticas.

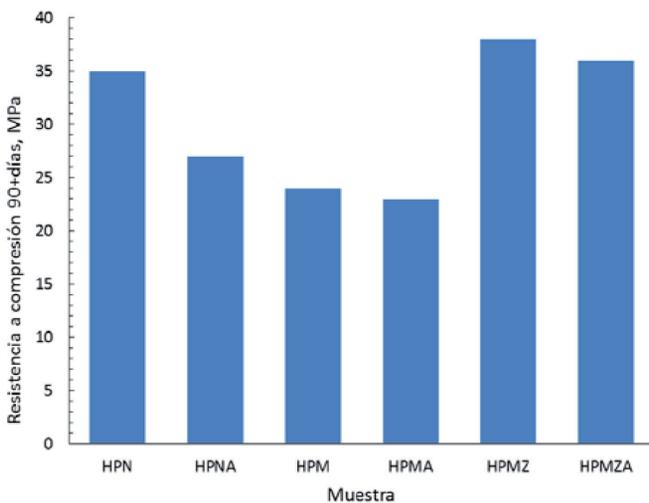


Figura 5: Valores característicos de la resistencia a compresión de las muestras

Comparación de los valores de deformación obtenidos con los de los modelos matemáticos de predicción

Los resultados experimentales de la medición de deformaciones debido a la retracción, específicamente los valores de la muestra patrón, ya que la misma es la que se produce a diario en la obra y ha sido aplicada a numerosos elementos estructurales, fueron comparados con las predicciones de los modelos de cálculo de deformación por retracción brindados por: ACI 209 (2002), CEB-FIP (1993), Eurocode (1990) y NC 207 (2003) (Figura 6). Para la obtención de los valores de retracción se tuvieron en cuenta las condiciones geométricas y ambientales de la obra objeto de estudio, mientras que las características de los materiales a utilizar en los cálculos fueron las de los materiales de las muestras ensayadas.

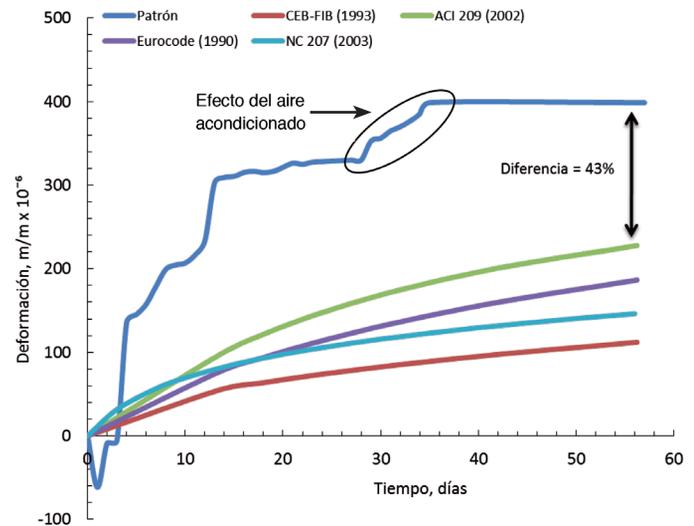


Figura 6: Comparación entre el patrón real medido de deformación de retracción HPN y los estimados con modelos

Como se muestra en la Figura 6, ninguno de los modelos de cálculo estudiados es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento de las deformaciones obtenidas durante el proceso experimental. Estos resultados muestran la importancia de medir de manera experimental los valores de las deformaciones producto de la retracción en las diferentes muestras de hormigones, con lo que se logra un mayor acercamiento a la realidad del comportamiento del material, evitándose así la inclusión en errores en el momento de aplicar estos resultados en procesos de cálculo y modelación estructural.

Modelación estructural de los resultados obtenidos

Para implementar la modelación se utilizó el software SAP 2000 (2016), decidiendo tomar como caso de estudio a modelar la estructura del edificio diagnosticado anteriormente. En la Figura 7 se muestra la representación 3D de dicho modelo, este muestra la tipología más representativa de este tipo de edificaciones. Se trata de un sistema constructivo formado por muros de carga, losas y columnas monolíticas, cuya geometría presenta secciones con diferentes características. El mismo consta de tres niveles cuyos entrepisos y cubiertas, se construirán en la zona central con el uso de deck metálico galvanizado. Esta estructura fue discretizada, en el caso

de los muros con elementos finitos EF rectangulares, de dimensiones aproximadas de 0.40 a 0.46 m y con rectangularidades cercanas a 1. En las losas se utilizaron elementos triangulares, rectangulares y trapezoidales, siempre garantizando continuidad a lo largo de todos los contornos, a través de la figura “Assign>Area>Generate Edge Constrains” de SAP 2000.

Para la modelación del material sólo fueron tenidas en cuenta las propiedades reales de los hormigones estudiados en la investigación, y el mayor interés se concentró en la modelación del efecto de los cambios de volumen en el material durante el tiempo producido por los efectos de la retracción autógena y la de secado. Con este fin se utilizó el modelo CEB-FIP (1993) para el desarrollo de las deformaciones por retracción. Para la simulación de los procesos de retracción, se utiliza la modelación por etapas de construcción con la intención de simular el efecto que tiene la implementación de cada nivel respecto al inferior, tanto en el desarrollo de la retracción, como en los cambios que cada nivel introduce en las cargas y en la rigidez de la estructura, utilizando para ello una figura especial del análisis estructural consistente en el Análisis no Lineal por Etapas de Construcción (*Nonlinear Staged Construction Analysis*) de SAP 2000, la cual compatibiliza las deformaciones por retracción de cada nivel, con el superior que se incorpora. De cada etapa, se suministran los datos de su duración, si se requiere salida de resultados o no. Luego se incorporan los datos relativos a la operación (añadir estructura o cargas), la edad al momento de añadirse, lo cual define el nivel de deformaciones de retracción al momento de incorporarse y su desarrollo posterior. Al añadirse un objeto estructural, se incorpora rigidez al modelo, y los demás datos condicionan el desarrollo de las deformaciones de retracción. A medida que avanzan las etapas definidas, los esfuerzos que se generan resultan superiores a los anteriores, partiendo del razonamiento de que la estructura está impedida de desplazarse en los puntos en que se vincula a tierra y los elementos componentes están impedidos de deformarse por los vínculos existentes entre ellos, sin embargo las deformaciones

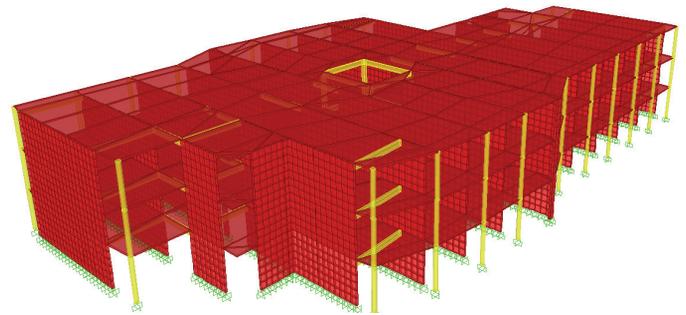


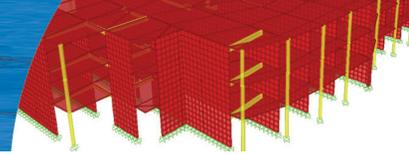
Figura 7: Modelo creado del edificio

de cambio de volumen por retracción, como se ha evidenciado, se mantienen creciendo en el tiempo y no es hasta una edad de la estructura que oscila entre 1000 y 1600 días que logran estabilizarse en función de los parámetros que la determinan.

El estudio de los resultados del análisis estructural realizado en distintos modelos que representan diferentes comportamientos ante la retracción de varios tipos de mezclas, confirma que el desarrollo de las deformaciones por retracción con el tiempo en estructuras hiperestáticas en las que no se han tomado medidas estructurales para reducir los efectos de las mismas, generan esfuerzos a tensión no soportados por el hormigón, del orden del 30 al 100% y más, de la resistencia a compresión especificada, los cuales resultan demasiado elevados para dicho material y son los causantes de la fisuración por retracción.

También se demostró que los patrones de grietas que se presentan en la modelación, principalmente asociadas al cambio de humedad relativa, coinciden mayoritariamente con los patrones de grietas monitoreados por el equipo técnico, en el edificio seleccionado como caso de estudio, confirmándose así la validez de las hipótesis asumidas en el cálculo. Para evaluar este punto se toma como referencia los resultados de la modelación y el análisis del levantamiento patológico realizado en el edificio existente, con el objetivo de la búsqueda de patrones coincidentes entre los mismos.

Si se desea evaluar cuantitativa y cualitativamente este fenómeno para una etapa en específico, partiendo del hecho de que el software SAP2000 no realiza la evaluación de la trayectoria de daño, se debe hacer



los ajustes requeridos al modelo una vez formada la primera grieta. Una forma aproximada de evaluarlo en este caso, puede lograrse utilizando el criterio de falla de Mohr – Coulomb, para determinar si el elemento en cuestión falla F o resiste R. Usando la respuesta en esfuerzos por nodos en la etapa en que comienzan las grietas, hay elementos en que los esfuerzos son soportados en todos los nodos o en la mayoría (marcados con R, indicando que dicho elemento resiste los esfuerzos) y en otros, los esfuerzos no son soportados en ninguno o en la minoría (marcados con F, indicando que dicho elemento falla). La frontera entre esas dos zonas corresponde a la grieta como se muestra en las Figuras 8a y 8b, cuya progresión puede estudiarse en el tiempo, si se repite el proceso para distintas etapas, pero sin interrumpir la continuidad de los EF en el modelo, de ahí su carácter cualitativo.

Como resultado del análisis, se evidencia una coincidencia entre los patrones resultantes de la modelación y ubicación de las fisuras encontradas en el edificio como se observa en la Figura 9. Este análisis se realizó únicamente para el régimen de humedad relativa del 65%, por constituir el de mayor criticidad. Como puede apreciarse, del contraste entre los patrones de fisuración y las isozonas de esfuerzos máximos, existe concordancia en forma y valores de esfuerzos que pueden provocar la rotura, corroborando como causa fundamental de la fisuración el desarrollo de las deformaciones por retracción.

Conclusiones

Los resultados obtenidos brindan una explicación certera a la formación de los patrones de fisuras detectados en las obras estudiadas. En el caso de estudio inspeccionado, se identificaron patrones de fisuración similares en los elementos estructurales componentes (muros). Los mismos están conformados por fisuras de orientación vertical y con un ángulo de inclinación de 45° que en ocasiones son pasantes y se observan en ambas caras del muro. Las fisuras existentes presentan longitudes que varían desde menos de 1 m, hasta más de 2 m, mientras que los espesores medidos oscilan entre los 0.04 mm y 1.73 mm, superando en ocasiones los valores límites de ancho de fisuras establecidos en la NC 207 (2003), situación que compromete de manera severa la durabilidad del inmueble.

Los valores de deformación obtenidos evidencian que el desarrollo de la retracción es el factor desencadenante de la fisuración en los muros. Se demuestra la influencia significativa en el aumento de las deformaciones producto del incremento en la relación agua/cemento en la mezcla, lo que cuantitativamente representa, según los resultados obtenidos, un aumento del 22.3%. Se demuestra que la reducción de la cantidad de cemento de la mezcla no es una solución viable para lograr la reducción de las deformaciones, ya que esta variante provoca el incremento de las mismas. Sin embargo, cuando va acompañada por adición de zeolita, debido a su carácter puzolánico, se obtienen resultados positivos.

Se demostró que la utilización de la Puzolana

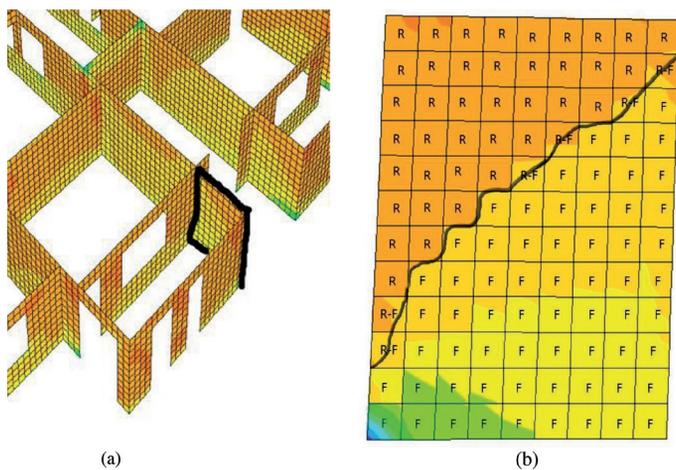


Figura 8: a) Muro seleccionado para la aplicación del criterio de Mohr-Coulomb y b) patrón de grieta aplicación del criterio de resultante de la aplicación del criterio de Mohr-Coulomb

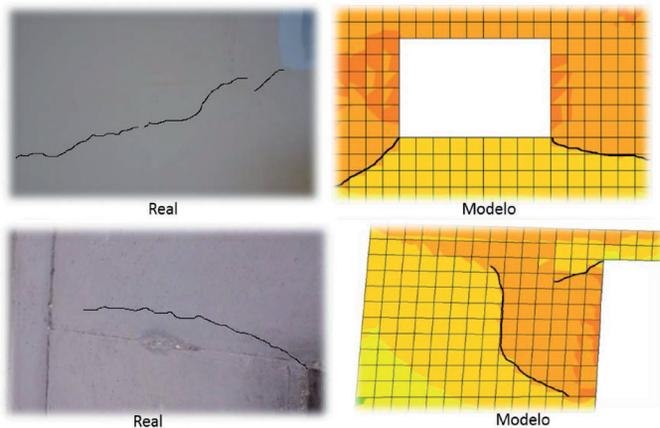
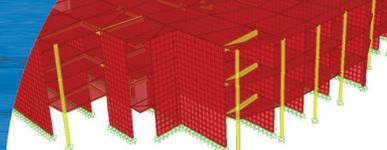


Figura 9: Patrones de agrietamiento observado y modelado



Zeolitizada como adición a la pasta de cemento del hormigón es una solución factible para la reducción de las deformaciones experimentadas por el material, ya que esta variante logró experimentar una reducción del 7.28% para las deformaciones totales experimentadas por las muestras. Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión son coherentes con los resultados de las mediciones de retracción, puesto que las muestras que mayor valor de resistencia aportan son las producidas con adiciones de zeolita, lo que confirma el aporte de la reacción puzolánica al refinamiento de la estructura de poros de material.

Se determinó que ninguno de los modelos teóricos de cálculo de deformaciones por retracción estudiados es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento de las deformaciones obtenidas durante el proceso experimental, mostrando la importancia de medir de manera experimental los valores de las deformaciones producto de la retracción.

El análisis del modelo computacional, con el empleo del Análisis no lineal por Etapas de Construcción, arroja que los esfuerzos de tensión que se producen no pueden ser resistidos por el hormigón, y por tanto producen fisuración. Los patrones de fisuración obtenidos mediante los modelos creados coinciden con los reales que se presentan en las edificaciones estudiadas, lo que demuestra la efectividad del uso de los modelos obtenidos como medio para la evaluación de diferentes medidas para la solución de la problemática estudiada.

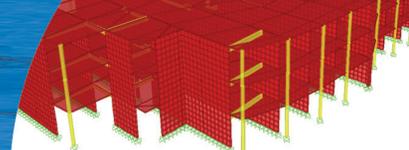
Recomendaciones

La medición de las deformaciones de retracción permitirá en trabajos futuros, trabajando con los modelos mecánicos de la estructura y utilizando la figura de Análisis No Lineal por Etapas de Construcción, no solo utilizar modelos de retracción normados con el tiempo, sino resultados experimentales que corresponden a los hormigones reales producidos. Así se podrá obtener un estado tenso-deformacional mucho más próximo al real que se produciría en la estructura modelada, al utilizar dichos hormigones, dando la posibilidad de contar con un pronóstico certero del estado de fisuración antes de

la construcción de la obra. Así mismo, permitirá crear un banco de datos que haga factible la producción de un modelo propio para caracterizar la retracción en el tiempo, bajo las condiciones y propiedades de los materiales en Cuba.

Referencias

- ACI (2008). Report on early age cracking: causes, measurement and mitigation. ACI Committee 231, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA
- ACI (2002). Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures. ACI Committee 209, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA
- ACI (2001). Control de la fisuración en estructuras de hormigón. Comité ACI 224R, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA
- ACI (1993). Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de hormigón. Comité ACI 224, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA
- Álvarez, O. (2003). Patología, diagnóstico y rehabilitación de edificaciones. Instituto de Ensayos y Materiales, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia
- ASTM C157 (2006). Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. ASTM International, West Conshohocken, USA
- Bentz, D.P., Jensen, O.M., Hansen, K.K., Olesen, J.F., Stang, H. and Haecker, C.J. (2001). Influence of cement particle-size distribution on early age autogenous strains and stresses in cement-based materials. *Journal of the American Ceramic Society* 84(1), 129-135
- Bouhamou, N.E., Belas, N., Bendani, K. and Mebrouki, A. (2013). Shrinkage behavior of a self-compacting concrete. *Materiali in tehnologije* 47(6), 763-769
- Branson, D.E. (1977). *Deformation of concrete structures*. McGraw-Hill
- CEB-FIP (1993). Model code 1990. Comité Euro-International du Béton
- Chen, H., Wyrzykowski, M., Scrivener, K. and Lura, P. (2013). Prediction of self-desiccation in low water-to-cement ratio pastes based on pore structure evolution. *Cement and Concrete Research* 49, 38-47



- Díaz, G.M. (2012). *Evaluación de la fisuración de hormigones en zonas marinas, producto de cambios autógenos de volumen, específicamente debidos a la retracción por secado*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba
- Eurocode (1990). Eurocode: Basis of structural design. EN-1990, Berlin
- Gribniak, V., Kaklauskas, G. and Bacinskas D. (2008). Shrinkage in reinforced concrete structures: a computational aspect. *Journal of Civil Engineering and Management* **14**(1): 49–60
- Helene, P. y Pereira, F. (2003). Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: reparación, refuerzo y protección. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED
- Martirena, J.F. (2004). *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. Tesis de doctorado, Universidad Central Marta Abreu de las Villas
- NC 244 (2003). Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- NC 207 (2003). Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- NC 192 (2007). Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- Ossa, M. y David, J. (1992). Efecto de las adiciones puzolánicas en la retracción de pastas y morteros de cemento en sus primeras edades. *Materiales de Construcción* **42**, No. 225, 37-63
- Sakata, K. and Shimomura, T. (2004). Recent progress in research on and code evaluation of concrete creep and shrinkage in Japan. *Journal of Advanced Concrete Technology* **2**(2), 133-140
- SAP2000 (2016). Structural Analysis Program. Integrated software for structural analysis and design, v.16. Computers and Structures Inc., Berkeley
- Sant, G., Radlinska, A. and Weiss, W.J. (2007). Minimizing the risk of early age cracking in concrete through the use of comprehensive experimental techniques, computer simulation, and new materials. Australian Concrete Institute
- Sant, G.N. (2009). *Fundamental investigations related to the mitigation of volume changes in cement-based materials at early ages*. Purdue University
- Silliman, K.R. and Newtonson, C.M. (2006). Effect of misting rate on concrete shrinkage. *Concrete Bridge Conference, HPC: Build Fast, Build to Last*, Reno, Nevada
- Wang, Ch.K. and Salmon, Ch.G. (2002). *Reinforced concrete design*. 6th edition, John Wiley & Sons
- Weiss, W.J., Yang, W. and Shah, S.P. (1998). Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. *Journal of Engineering Mechanics* **124**(7), 765-774