

ESTUDIO REOLÓGICO EN PUENTES ARCOS DE HORMIGÓN

Hermógenes Rosas Rodríguez

Universidad Privada Boliviana

hrosas@upb.edu

(Recibido el 15 de junio 2004, aceptado para publicación el 10 de agosto 2004)

RESUMEN

En este artículo se representa el estudio numérico del comportamiento de las deformaciones en el tiempo debidas a los efectos reológicos (retracción y fluencia) del hormigón. Estas deformaciones se presentan en estructuras de gran envergadura que trabajan a compresión, como pilas altas en puentes, losas continuas pretensadas, puentes arcos y otros. En este estudio se consideró un puente arco de 105 m de luz, flechas de 15 y 30 m de altura, y relaciones luz/flecha iguales a 3,5 y 7. En la modelización se supone que el arco fue construido por fases, como los puentes en voladizos sucesivos. Cada tramo es de 15 m de longitud y se analiza, por simetría, las deformaciones en tres puntos situados en los riñones y uno ubicado en la clave del arco. El método utilizado es el de los elementos finitos, con las formulaciones establecidas en el Código Modelo. Los resultados muestran que los momentos flectores positivos disminuyen en el tiempo. En cambio, los negativos aumentan y las deformaciones elásticas son importantes antes del cierre en la clave del arco. Finalmente, las deformaciones debidas a retracción y fluencia evolucionan significativamente durante los tres primeros meses de edad del hormigón.

Palabras Clave: Hormigón, retracción, fluencia, puentes arcos y deformaciones.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de estructuras que permitan cubrir grandes luces y superficies sin apoyos intermedios, utilizando, además, la cantidad mínima de material, ha ocupado durante mucho tiempo la atención de ingenieros estructurales. La utilización de arcos es el método más antiguo utilizado para puentes con luces grandes y vigas rectas. Los arcos no suelen utilizarse con luces inferiores a 100 m de luz debido al encarecimiento de la mano de obra y los problemas constructivos que derivan de su ejecución.

Los arcos se proyectan de forma que trabajen a compresión pura, con ausencia total de flectores. Para la hipótesis más desfavorable de cargas, que suele ser el peso propio del arco, se logra la antifunicularidad del arco con una directriz de tipo parabólico. La elección de la relación luz/flecha en arcos es libre dentro de ciertos límites, cuanto menor es la relación luz/flecha, mayor es la compresión en la estructura y el empuje vertical en el estribo; por el contrario, al aumentar la relación sin reducir la luz del arco, aumentan flexiones en la directriz. En arcos donde la relación luz/flecha es grande, aumentan los esfuerzos por retracción, dicha teoría fue contrastada con los resultados obtenidos en esta investigación. En consecuencia, los efectos de retracción y fluencia, en cierta medida, están en función de la relación luz/flecha.

Actualmente, los efectos reológicos son combatibles en los arcos, con corrección de su línea teórica a base de gatos planos. Con ello no sólo se elimina esfuerzos parásitos debido al acortamiento de la directriz por la retracción, sino también los esfuerzos derivados de las deformaciones elásticas. El estudio reológico en arcos, dada la enorme complejidad de abordar analíticamente el problema, para el análisis en el tiempo, se realizó con el Método de Elementos Finitos, que constituye una técnica moderna para el cálculo de estructuras. Para la determinación de las deformaciones debidas a la retracción y fluencia se utilizó el programa informático ANSYS.

2. MARCO TEÓRICO

En este trabajo se estudia las acciones reológicas, ligadas intrínsecamente al material como propiedades del mismo, que son la retracción y la fluencia del hormigón. Las deformaciones que experimenta el hormigón en el tiempo, son fenómenos complejos que influyen de manera considerable en el comportamiento de las estructuras realizadas con este material, provocando incrementos de deformaciones y afectando en la distribución de tensiones y esfuerzos.

El tratamiento de las deformaciones del hormigón en el tiempo tiene dos niveles:

- **Material**, la caracterización y cuantificación de fluencia y retracción como propiedades del hormigón, que llevan a definirlo como un pseudo-sólido visco-elástico-plástico.

- **Estructural**, los efectos que produce el comportamiento reológico del hormigón, teniendo en cuenta que las deformaciones de la estructura no son homogéneas porque disponen de armaduras pasivas o activas, que lleva a estudiar la interacción de dos materiales. En este trabajo, para simplificar la complejidad, se estudia solamente como hormigón en masa.

Es importante resaltar que la retracción es una deformación atensional de contracción de la masa del hormigón, que se manifiesta en especial durante el tiempo de fraguado y los primeros días de vida del hormigón. Por el contrario, la fluencia es una deformación en el tiempo del hormigón, que sobreviene cuando existen tensiones en su seno. Por tanto, es una deformación tensional, que se manifiesta después de la aparición de la tensión, encontrándose ligada a fenómenos físicos de tipo diverso, relacionadas con la circulación del agua en la masa del hormigón y su disipación hacia el exterior de la misma.

2.1 Retracción de la pasta de cemento

Las variaciones dimensionales de las estructuras de hormigón provocadas por los cambios de humedad relativa ambiente, en particular la retracción del hormigón, son de gran importancia. Aun cuando la introducción de áridos puede modificar el comportamiento del material, la causa de la retracción reside en las variaciones del volumen de la pasta de cemento. Este volumen depende de la humedad relativa del ambiente. Si ésta disminuye, la pasta sufre una contracción, y sucede lo contrario, cuando la humedad relativa aumenta.

Partiendo de un ambiente saturado de humedad (HR 100%), al disminuir progresivamente la humedad relativa, la pasta de cemento sufre una retracción según la curva WXY (Figura 1). Si se aumenta la humedad relativa de la pasta de cemento ésta se entumece según la curva YXZ, donde la ordenada WZ representa una retracción irre recuperable que se produce durante el primer ciclo de variación higrométrica.

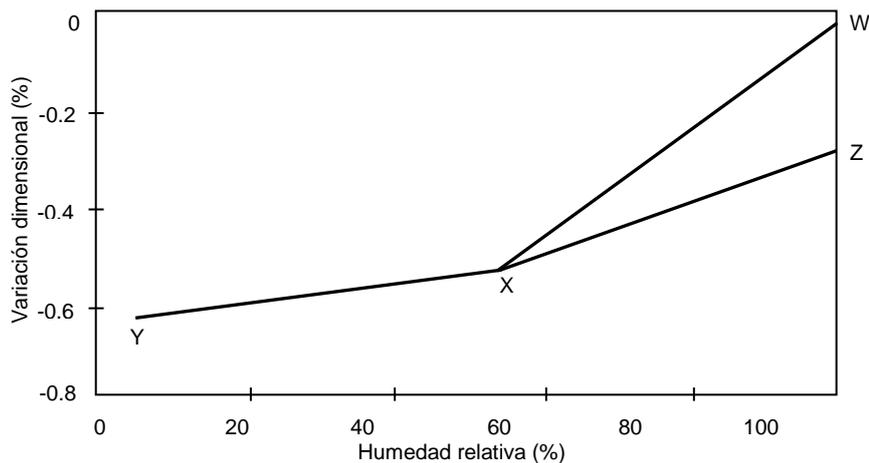


Figura 1 - Variaciones dimensionales de la pasta de cemento por los cambios de HR.

2.2 Fluencia de la pasta de cemento

La fluencia de la pasta de cemento es la deformación unitaria diferida bajo la aplicación de una carga constante. En la Figura 2, se muestra esquemáticamente la deformación de fluencia (ϵ_f) en función del tiempo, cuando el material endurecido está sometido a una carga de compresión constante. Una vez aplicada la carga (σ_1), el material sufre una deformación elástica (ϵ_1) igual a σ_1/E . La pasta empieza a contraerse y la magnitud de la fluencia depende de: la carga aplicada, la edad de la pasta de cemento en el momento de aplicación de la carga, la temperatura, la humedad relativa, etc.

Eliminando la carga (σ_1) se observa una expansión inmediata (ϵ_2) correspondiente a la contracción elástica (ϵ_1) y después una recuperación lenta y parcial del tamaño inicial. Una parte de la deformación, denominada fluencia irre recuperable (ϵ_c), no llega a recuperar.

La deformación de fluencia aumenta con la carga aplicada (σ_1) y disminuye con el aumento de la resistencia mecánica (σ_c) de la pasta. Un curado prolongado y adecuado de la pasta de cemento, así como una baja relación agua/cemento, favorece la formación de una estructura más compacta y, por lo tanto, en condiciones de ofrecer una mayor resistencia a las sollicitaciones. Parrott [13] demostró que la edad de la pasta de cemento en el momento de la aplicación de la carga influye sobre la fluencia aunque la hidratación del cemento ya haya finalizado.

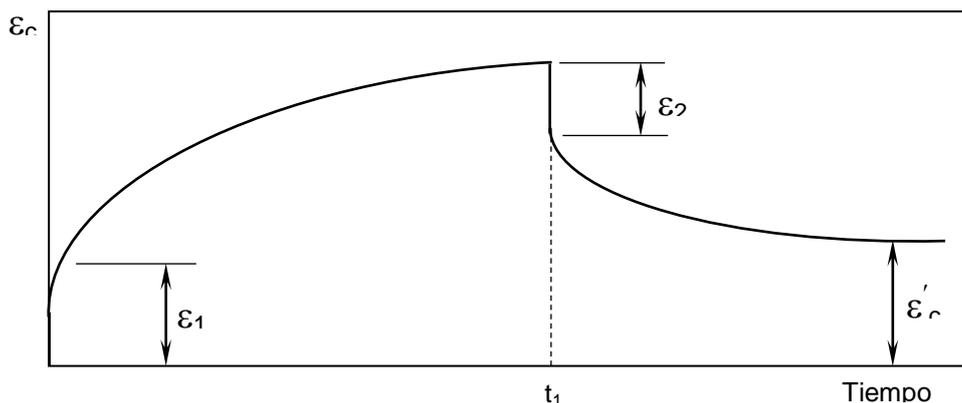


Figura 2: Fluencia de cemento bajo una carga aplicada hasta tiempo t_1 .

2.3 Retracción del hormigón

El hormigón es un material que se retrae cuando está expuesto a un ambiente seco, y se entumece cuando se sumerge en el agua. Los parámetros que influyen principalmente en la retracción son la relación árido/cemento y agua/cemento de mezcla. Al ser un fenómeno progresivo, la retracción forma una curva creciente y asintótica según el tiempo transcurrido, como se aprecia en la Figura 3.

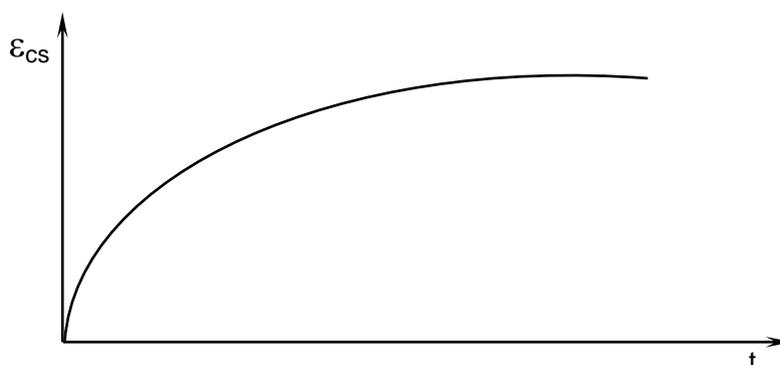


Figura 3: Evolución de la retracción del hormigón en el tiempo.

Un aumento de la relación agua/cemento produce una retracción mayor, porque aumenta el agua evaporable en el interior del material. Además, una estructura porosa favorece la evacuación del agua. Al disminuir la relación árido/cemento aumenta la retracción, porque se hace mayor el volumen de la pasta. En cambio, cuanto mayor es esta relación, menor será la retracción. Este efecto es consecuencia de que los hormigones precisan menor contenido de pasta, cuando más grande es el contenido en árido.

El hecho de que el hormigón se entumezca en un ambiente saturado de humedad (HR 100%), demuestra que la tensión de vapor del agua contenida en los poros de la pasta de cemento es menor que la presente en el ambiente. Por lo tanto, se espera que con una humedad relativa ambiente ligeramente inferior al 100%, el hormigón encuentre equilibrio higrométrico. Powers [15] demostró que ese equilibrio se verifica en un ambiente con HR del 94%.

La HR del medio afecta mucho a la retracción como puede observarse en la Figura 4. Se ve en ella que, para una humedad creciente, la retracción va disminuyendo. Para una humedad del 100%, el hormigón no se retrae sino que, por el contrario, aumenta de dimensiones. Es decir, se produce un entumecimiento. Los curados prolongados con agua son beneficiosos debido a que, si bien dan lugar a una mayor hidratación del cemento con una gran formación de geles y por tanto con menos partículas que coarten la retracción, la pasta se hace más resistente con la edad y soporta mejor las tensiones de retracción sin llegar a fisurarse.

Cuando se expone una estructura de hormigón a un ambiente seco, el desecamiento se inicia inmediatamente sobre la superficie y no alcanza las partes más internas hasta después de un cierto tiempo. L'Hermite [10] determinó que el desecamiento alcanza un espesor de 75 mm en un mes y 600 mm en más de 10 años, en secciones macizas con espesores mayores a 1500 mm. La forma y las dimensiones de la estructura pueden modificar la retracción. Esta última disminuye al aumentar la relación volumen/superficie, a causa de la menor superficie expuesta a la evaporación del agua del hormigón al

ambiente. En general, cuanto mayor es la dimensión de la estructura, menor es la retracción que se produce. Por otra parte, a igualdad de volumen de hormigón, las estructuras delgadas presentan una mayor retracción.

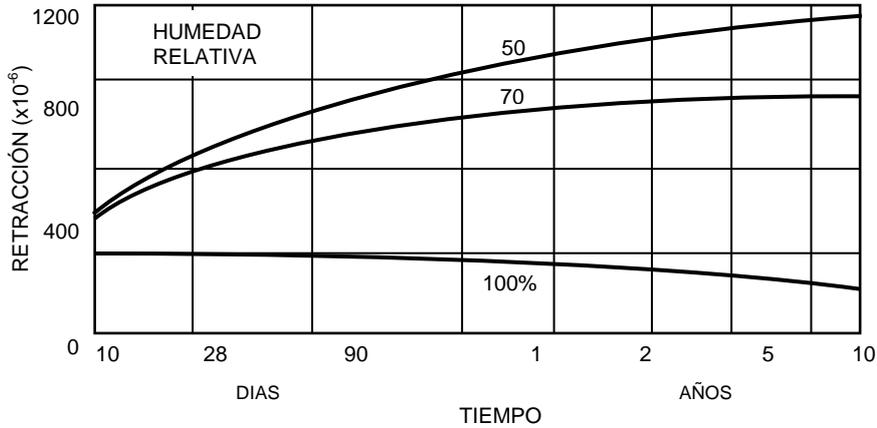


Figura 4 - Influencia de la humedad relativa en la retracción del hormigón.

2.4 Fluencia del hormigón

Los efectos de la fluencia sobre el comportamiento del hormigón son notables y no todos deben considerarse negativos. Entre los efectos positivos está la disminución de tensiones causadas por diversos motivos, como es el caso de la retracción. En la Figura 5 se muestra la evolución de las deformaciones provocadas por la retracción (A), por la fluencia (B), y por la retracción y la fluencia (C).

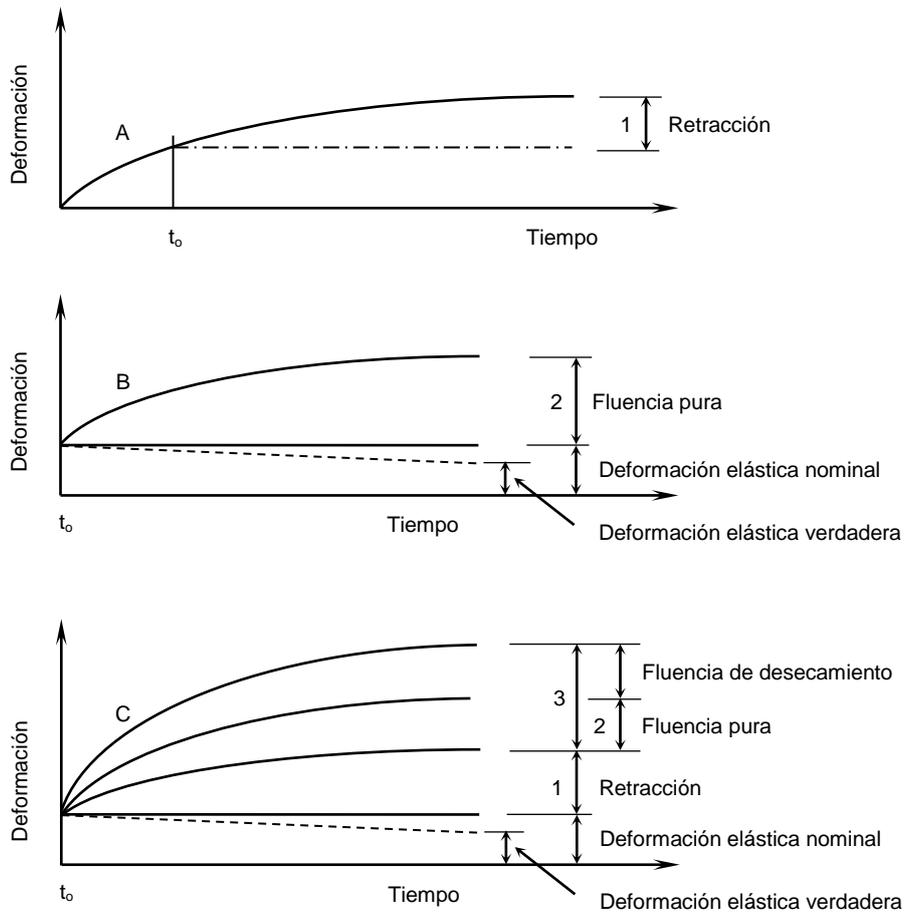


Figura 5 - Evolución de retracción en un hormigón no sometido a sollicitación externa (A); fluencia pura no sometido a retracción por hallarse en equilibrio higrométrico (B); deformación debida a la fluencia y retracción sometido a sollicitación y desecamiento (C).

En base a este esquema, se define como fluencia "pura" a la fluencia del hormigón en equilibrio higrométrico con el ambiente, de modo tal que no pueda existir retracción (B). Con independencia de la deformación elástica, la diferencia entre la deformación total en un hormigón sometido a carga y desecamiento simultáneamente (C) y la deformación de retracción (A) es mayor que la fluencia pura (B). Esto proviene de que la fluencia y la retracción no son propiedades aditivas y que, durante el desecamiento, además de la fluencia pura, se produce una deformación suplementaria producida por éste, conocida como fluencia de desecamiento. La deformación bajo una carga constante depende, aparte del módulo elástico del material y de la humedad relativa ambiente, de la madurez del hormigón, en particular, de su resistencia en el momento de aplicar la carga, de la composición del conglomerante, del espesor de la estructura y de la duración de aplicación de la carga.

La influencia del tipo de árido y, en particular, de su módulo elástico sobre la fluencia del hormigón, es similar a la ejercida sobre la retracción. Cuanto más rígido es el árido, mayor es la coacción ejercida a la deformación de retracción y fluencia de la pasta.

Respecto al fenómeno de la fluencia que se produce al eliminar una carga aplicada durante un cierto tiempo, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6, la deformación se recupera instantáneamente. Sin embargo, la estructura no vuelve a las dimensiones originales de antes de la aplicación de la carga. La deformación residual se puede atribuir a las modificaciones producidas en la estructura durante dicha deformación.

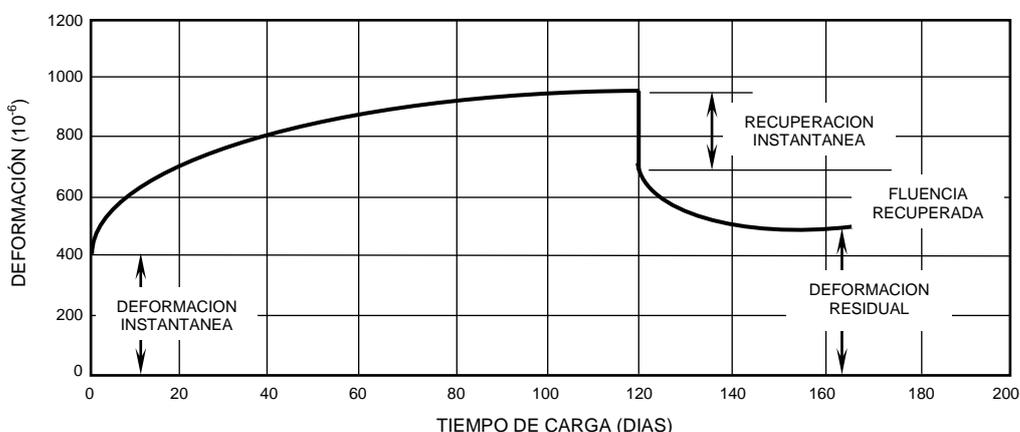


Figura 6: Deformación debida a la fluencia en el hormigón

A escala física existe una gran dificultad para separar lo que es retracción y fluencia, teniendo en cuenta que ambos fenómenos están muy ligados. Los efectos de la fluencia son de diversos tipos, pero están relacionados fundamentalmente con el aumento de la deformabilidad de la estructura con el tiempo, lo cual puede ser decisivo en ciertas estructuras, como puentes arcos, que, por razones de construcción, requieren una previsión exacta de las flechas y los giros que aparecerán, teniendo en cuenta, además, que en la fase de construcción, en que la edad del hormigón es pequeña, las deformaciones por fluencia son mayores.

3. EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN Y FLUENCIA

3.1 Evaluación de la retracción

Con las formulaciones que recoge el Código Modelo CEB-FIP [5], se puede estimar el acortamiento total por retracción a partir de la siguiente expresión:

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \epsilon_{cr} * \beta_r(t-t_0) \tag{1}$$

donde:

ϵ_{cr} = coeficiente base de retracción,

$\beta_r(t-t_0)$ = coeficiente de desarrollo de la retracción con el tiempo,

t = edad del hormigón en el momento para el que se calcula la retracción,

t₀ = edad a la que comienza la retracción (normalmente t₀ = 1 día, pues los curados de tipo habitual a temperatura ambiente no afectan apreciablemente al valor de la retracción).

ϵ_{cr} viene dada por la expresión:

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_r(f_{cm}) * \beta_{RH} \quad (2)$$

con,

$$\varepsilon_r(f_{cm}) = \left[160 + 10 * \beta_{rc} \left(9 - \frac{f_{cm}}{10} \right) \right] * 10^{-6} \quad (3)$$

f_{cm} = resistencia media del hormigón en MPa a los 28 días,
 β_{rc} = coeficiente dependiente del tipo de cemento,
 $\beta_{rc} = 4$ para cemento de endurecimiento lento,
 $\beta_{rc} = 5$ para cemento de endurecimiento normal o rápido,
 $\beta_{rc} = 8$ para cementos de endurecimiento rápido y alta resistencia.

El valor de β_{rc} en nuestro caso se considera para cemento de endurecimiento normal o rápido.

$$\beta_{RH} = -1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] \quad \text{para } 40\% \leq RH < 99\% \quad (4)$$

$$\beta_{RH} = 0,25 \quad \text{para } RH \geq 99\%$$

siendo RH, la humedad relativa ambiente en % y $\beta_r(t-t_0)$ viene dada por la expresión:

$$\beta_r(t-t_0) = \left(\frac{t - t_0}{0,035 * h^2 + t - t_0} \right)^{0,5} \quad (5)$$

$$h = 2 \frac{A_c}{u} \quad (6)$$

donde:

A_c = área sección transversal,
 u = perímetro en contacto con la atmósfera.

3.2 Evaluación de la fluencia

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ Mpa} \quad (7)$$

$$E_{28} = 2,15 \cdot 10^4 \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ MPa} \quad (8)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \quad (9)$$

donde s = coeficiente del tipo de cemento, endurecimiento normal o rápido

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \quad (10)$$

$$\beta_1(f_{cm}) = \frac{5,3}{\left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0,5}} \quad (11)$$

$$\beta_2(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} \quad (12)$$

$$\Phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100\%}}{0,46 \left(\frac{2 \frac{Ac}{u}}{100mm} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (13)$$

$$\phi_0(f_{cm}, t_0) = \Phi_{RH} * \beta_2(t_0) * \beta_1(f_{cm}) \quad (14)$$

$$\beta_H = 150 \left[1 + \left(1,2 \frac{RH}{100\%} \right)^{18} \right] \left[\frac{2 \frac{Ac}{u}}{100mm} \right] + 250 \quad (15)$$

$$\beta_H = \text{si } (\beta_H > 1500, 1500, \beta_H)$$

$$\beta_c(t-t_0) = \left[\frac{t-t_0}{\beta_H + (t-t_0)} \right]^{0,3} \quad (16)$$

$$\phi(t, t_0, f_{cm}) = \phi_0(f_{cm}, t_0) * \beta_c(t-t_0) \quad (17)$$

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0, f_{cm}) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{28}} \phi(t, t_0, f_{cm}) \quad (18)$$

4. PLANTEAMIENTO Y PROPIEDADES

4.1 Geometría

En la Figura 7, se presenta la geometría del arco y la denominación de las secciones donde se han calculado las deformaciones, estas secciones son A, B, C, D, E, F y G. En todas éstas, excepto en la sección D, actúan las cargas permanentes del tablero del puente, las mismas que están separadas cada 15 m. En este trabajo se estudian dos tipos de arcos parabólicos de sección cajón constante con apoyos rígidos, con una luz de 105 m y flechas de 15 y 30 m. La sección transversal es de 6 m de ancho, 2.60 m de canto y un espesor de las paredes de 0,30 m en todo el perímetro.

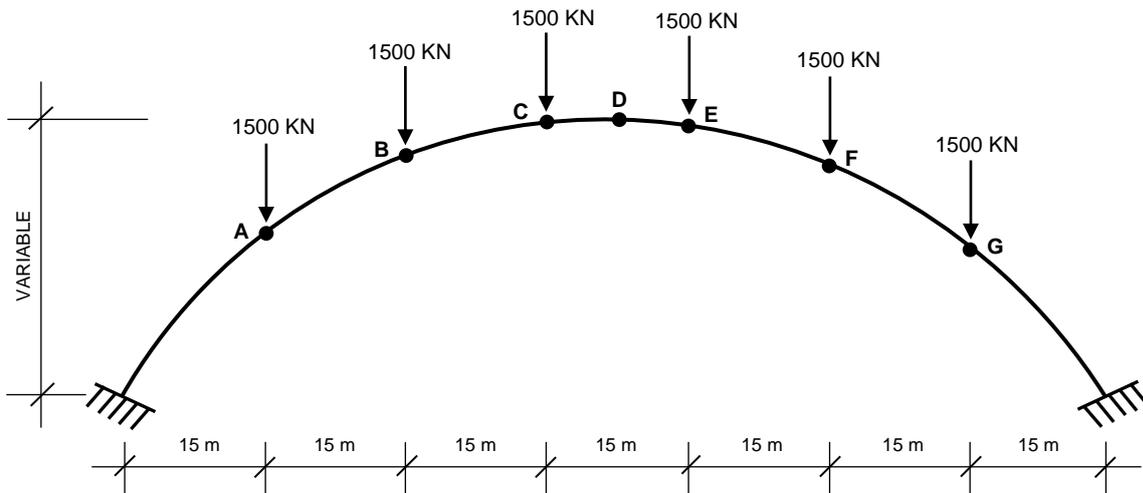


Figura 7 - Geometría del arco y ubicación de las secciones estudiadas.

4.2 Propiedades mecánicas

En este trabajo, se calculó manualmente el área y el momento de inercia: $A_c = 4,8 \times 10^6 \text{ mm}^2$, $I = 5,19 \times 10^{12} \text{ mm}^4$. Estos valores se mantienen constantes para los dos tipos de puentes arcos estudiados. Para elementos, como ser tipo placa, ANSYS [1] calcula automáticamente las propiedades mecánicas.

Las propiedades del hormigón para el estudio de los arcos fueron las siguientes:

$$\begin{aligned} E_{28} &= 32009319 \text{ KN/m}^2 \text{ (módulo de elasticidad a 28 días),} \\ \nu &= 0,20 \text{ (coeficiente de Poisson),} \\ \gamma &= 25 \text{ KN/m}^3 \text{ (peso específico del hormigón).} \end{aligned}$$

4.3 Acciones

El peso se deduce de las dimensiones reales de la estructura y del peso específico del hormigón. Para el análisis, se considera el peso propio como una carga uniformemente distribuida que actúa en todo momento y es constante en posición y magnitud.

Para el análisis, se consideró cargas permanentes del tablero de 100 KN/m. Esta acción fue transformada en cargas concentradas iguales a 1500 KN, ya que la distancia entre las péndolas es de 15 m. En la Figura 7 de la geometría del arco, se muestran las cargas en las seis secciones donde éstas actúan.

4.4 Discretización

La discretización del arco efectuada, es la misma para los dos tipos de arcos, es decir, para relaciones luz/flecha iguales a 3,5 y 7. Como en este trabajo se utiliza el método de los elementos finitos, el arco de 105 m se divide en 42 elementos finitos y 43 nudos, cada elemento tiene una longitud de 2,5 m en proyección horizontal.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la investigación analítica de la influencia de los efectos reológicos en puentes arcos de hormigón, suponiendo que el arco se construye por fases, en este trabajo se han considerado secciones cada 15 m de longitud en proyección horizontal. Cabe indicar que solamente se obtienen resultados para las secciones A, B, C y D, y para la E, F y G son iguales a la A, B y C por simetría.

Para el análisis de este trabajo, la resistencia característica del hormigón es $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, resistencia media $f_{cm} = 33 \text{ MPa}$, la humedad relativa del ambiente $RH = 80\%$ y el tipo de cemento es de endurecimiento normal o rápido $s = 0,25$. Este coeficiente se considera para determinar las deformaciones por fluencia y $\beta = 5$ para la retracción.

5.1 Esfuerzos Internos

En las Figuras 8 y 9 se presenta los momentos flectores para los dos tipos de arcos estudiados. En las mismas puede observarse cuatro diagramas de momentos flectores, la primera curva (sin picos) corresponde al momento cuando el arco se cierra en clave para la hipótesis de carga uniformemente distribuida (peso propio). Las siguientes superposiciones de diagramas de momentos flectores corresponden al momento cuando la estructura entra en carga y a dos y seis años de vida del hormigón.

La evolución de los momentos flectores en el tiempo para el arco de relación luz/flecha igual a 3,5, Figura 8, es menor a la obtenida para el puente arco de relación luz/flecha igual a 7. Estas diferencias son coherentes con la teoría expuesta en el marco teórico: a menor relación luz/flecha, el arco presenta menores deflexiones debido a que la estructura tiende a trabajar a compresión pura y los esfuerzos internos son mínimos. En un puente arco de directriz parabólica, cuando se consigue la antifunicularidad, los esfuerzos internos son prácticamente nulos.

En este trabajo se obtiene los momentos flectores superponiendo los efectos de retracción y fluencia en una sola Figura, ya que éstos actúan simultáneamente, cuando lo correcto sería exponerlos por separado, para observar la diferencia de evolución que existe en el tiempo para cada factor reológico y hacer mayores comentarios por separado para cada efecto.

Sin embargo, cabe destacar que cuando se estudian por separado los efectos reológicos del hormigón, los momentos flectores positivos por retracción se incrementan considerablemente y los negativos disminuyen en el tiempo, mientras que para la fluencia, los positivos disminuyen y los negativos se incrementan. Por otro lado, los momentos flectores debido a los efectos reológicos disminuyen considerablemente en arcos con relaciones luz/flecha menores, este resultado se ve reflejado de forma clara en las Figuras 8 y 9.

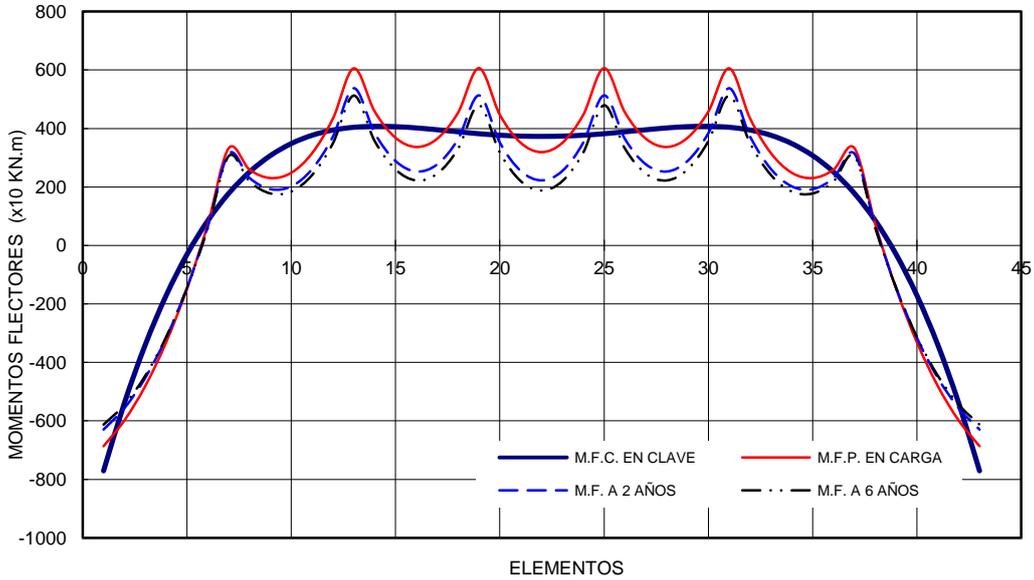


Figura 8 - Evolución de momentos flectores por retracción y fluencia para relación L/F 3,5.

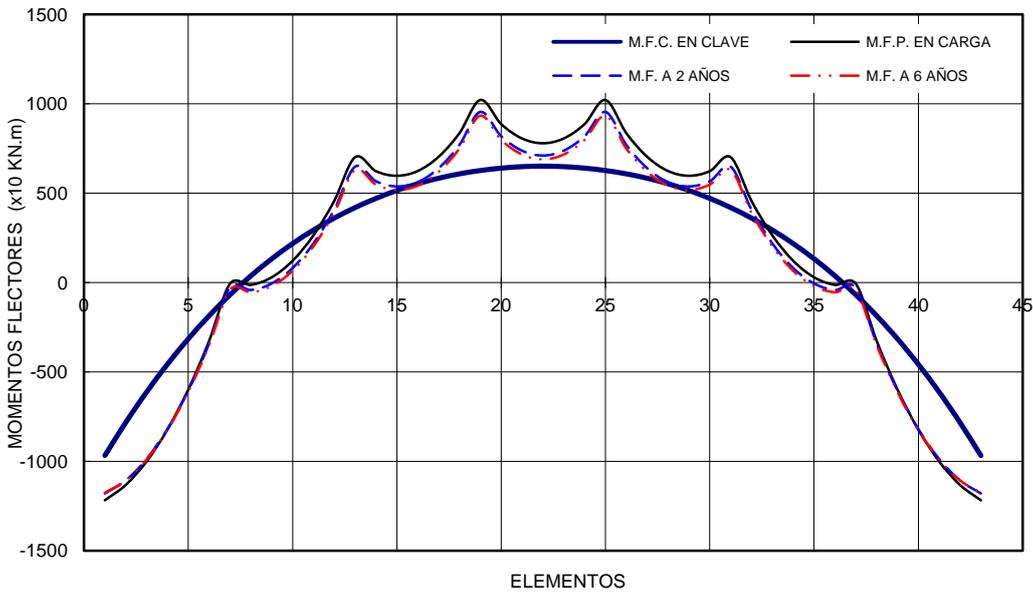


Figura 9 - Evolución de momentos flectores por retracción y fluencia para relación L/F 7.

Haciendo una comparación numérica de los momentos flectores de los dos arcos, se observó que los momentos flectores son mayores en un 60% para el arco con relación luz/flecha igual a 7 con respecto al arco con relación menor. Esto debido a que los arcos con flechas pequeñas presentan grandes deformaciones geométricas y esfuerzos internos. Por tanto, la directriz del arco parabólico se aleja de la antifunicularidad, lo que repercute directamente en la aparición de deflexiones y reacciones horizontales de consideración.

5.2 Deformaciones Elásticas

En el análisis de las deformaciones elásticas, cuando se cierra en clave la deformada del arco disminuye por el efecto arco. Al cargar a los 30 días el peso del tablero del puente, aumentan las deformaciones en cada sección

aproximadamente en un 45% de la deformación total. Una vez que entra en carga, las deformaciones en las cuatro secciones son constantes durante el periodo de análisis (seis años), Figuras 10 y 11.

En la Figura 10, se destaca que la deformación en la sección D, para el arco con relación luz/flecha igual a 3,5 es menor a la calculada para las secciones B y C. Mientras que, para el arco con relación luz/flecha igual a 7, Figura 11, en la sección D las deformaciones son inferiores solamente a las de la sección C. Este comportamiento deja entender que a mayor relación luz/flecha, las deformaciones elásticas en la clave (punto más alto del arco) son más importantes respecto a las obtenidas en los riñones del arco, secciones A, B y C. En los dos arcos estudiados, las deformaciones calculadas en la clave no superan a las determinadas en los riñones.

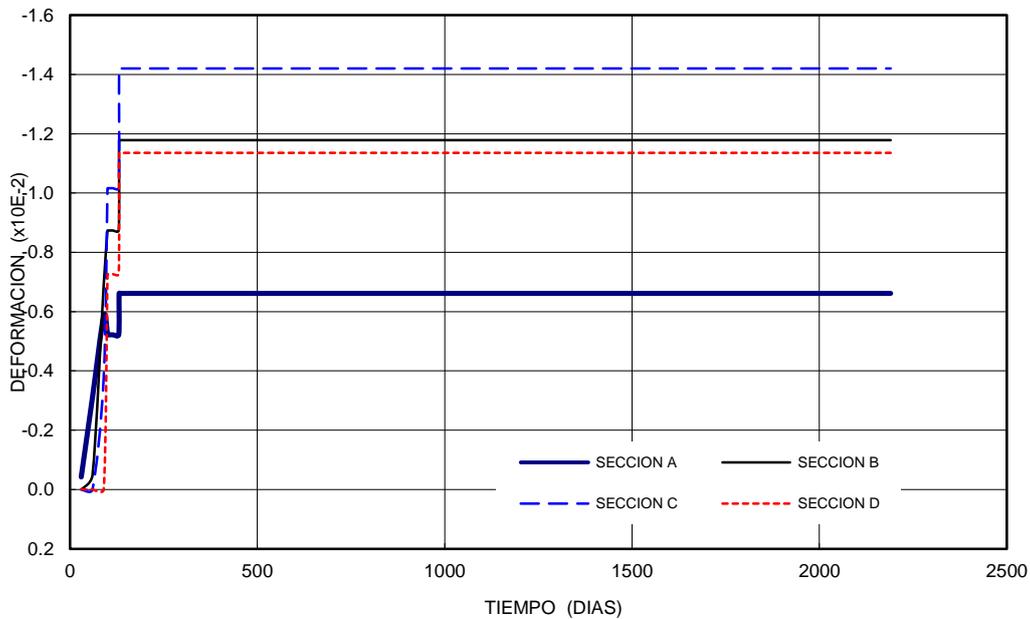


Figura 10 - Deformaciones elásticas en el arco para relación L/F 3,5.

Para el arco de relación luz/flecha igual a 3,5, Figura 10, las deformaciones en la sección D son inferiores a las obtenidas en las secciones B y C. Esto se debe a que para arcos con flechas grandes, las deflexiones son mínimas, mientras que para el arco con relación luz/flecha igual 7, Figura 11, las deformaciones son mucho más grandes. Asimismo, los momentos flectores y las deflexiones guardan una estrecha correlación y son coherentes con la teoría. Esta hipótesis se corrobora con los resultados que se muestran en las Figuras 8 y 9 que corresponden a esfuerzos internos en arcos.

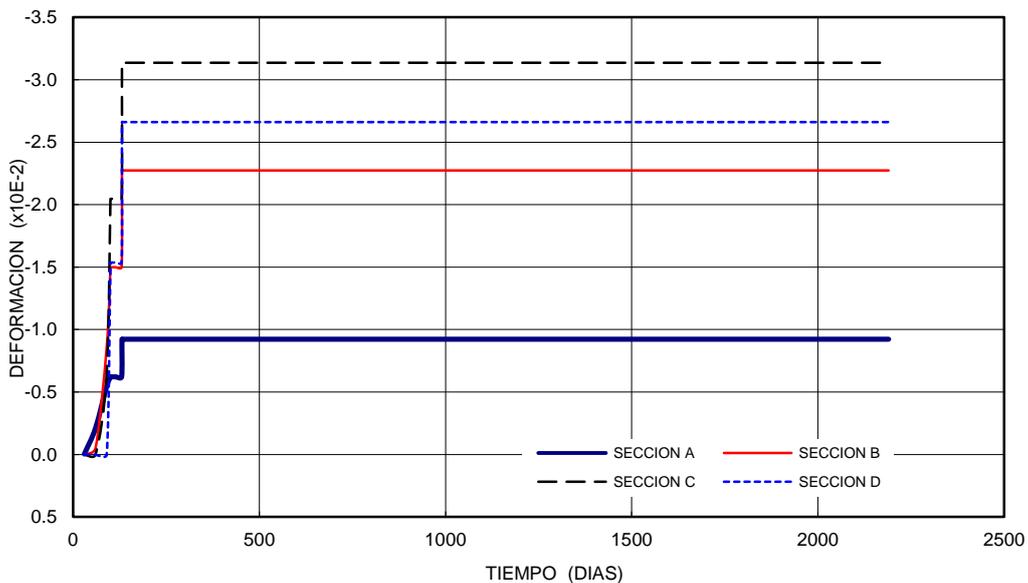


Figura 11 - Deformaciones elásticas en el arco para relación L/F 7.

5.3 Deformaciones Reológicas

El estudio reológico fue realizado para un periodo de 2190 días (6 años). Este período de análisis fue determinado en función de la variación del coeficiente de fluencia del hormigón. En las Figuras 12 y 13 se muestran los resultados de las deformaciones debidas a retracción y fluencia del hormigón. Puede observarse que en la sección A, la deformación presenta una variación importante en el instante del cierre en clave. En la etapa de la construcción el arco se analiza solamente para su peso propio hasta el cierre en clave. Con posterioridad al cierre, se carga el peso del tablero y luego el arco entra en carga.

Las deformaciones por retracción y fluencia evolucionan de manera considerable después de la incidencia de la carga del tablero del puente, lo cual es evidente a mayores solicitaciones, en las estructuras que trabajan a compresión, como es el caso de los arcos. Las deformaciones reológicas evolucionan significativamente durante los tres primeros meses de vida del hormigón prácticamente en línea vertical como puede observarse en las Figuras 12 y 13.

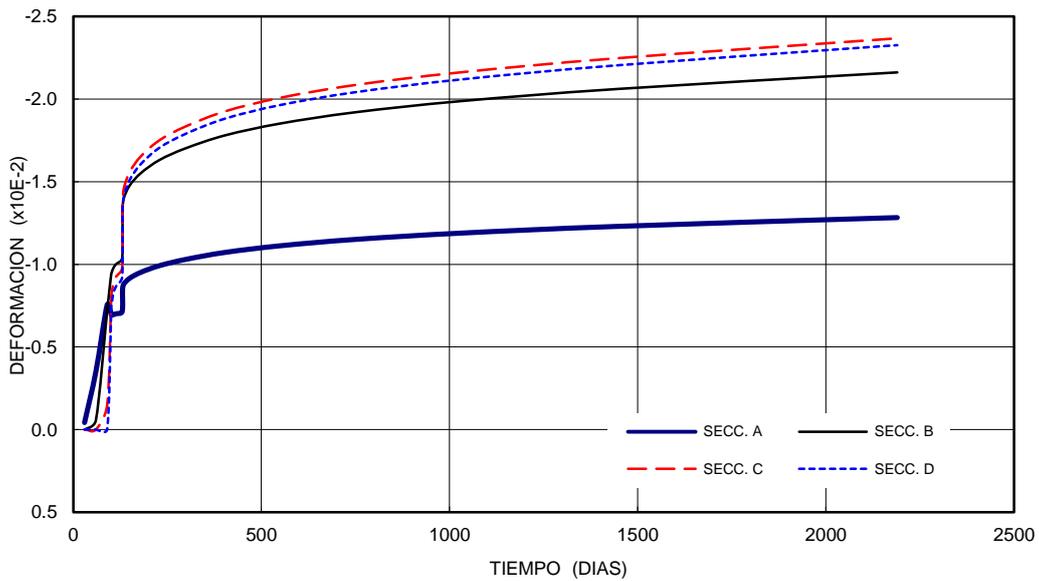


Figura 12 - Evolución de deformaciones por retracción y fluencia para relación L/F 3,5.

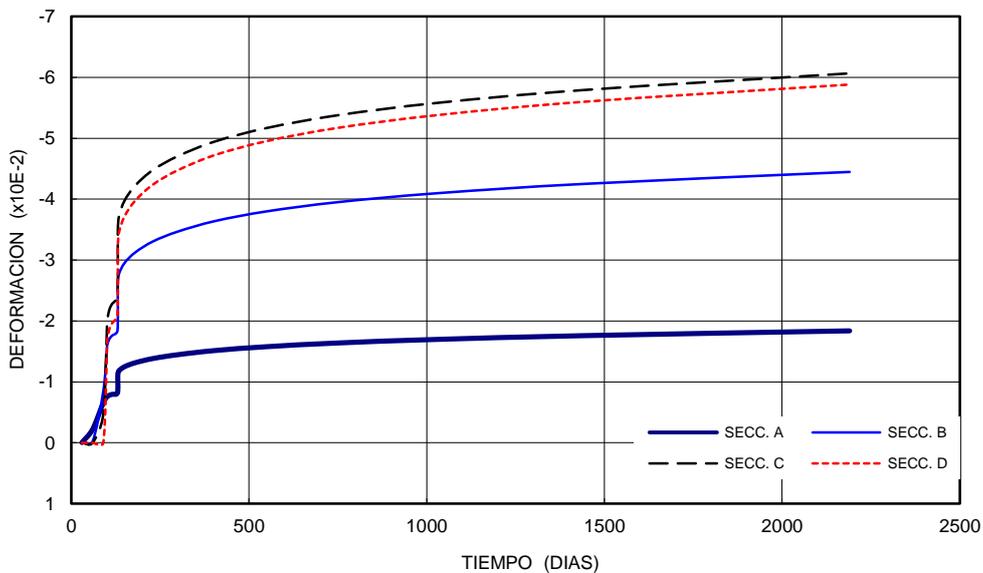


Figura 13 - Evolución de deformaciones por retracción y fluencia para relación L/F 7.

Asimismo, puede indicarse que las deformaciones debidas a la retracción y fluencia, poseen una evolución leve, después de un periodo de aproximadamente tres meses, casi hasta aproximadamente los tres años desde el momento de haber entrado en servicio, Figuras 12 y 13. Pasado este tiempo, las deformaciones se van haciendo asintóticas en el

transcurso del tiempo de análisis. Según los estudios realizados por Leonhard [9], las deformaciones reológicas pueden desarrollarse hasta los veinte años, desde el momento que la estructura entra en servicio.

Realizando una comparación de la evolución de las deformaciones en el tiempo en los dos arcos estudiados, se observa que éstas son mayores para el arco con relación luz/flecha igual a 7 en todas las secciones analizadas. Por la influencia de la relación luz/flecha las deformaciones en el arco de menor relación son inferiores aproximadamente en un 60% con respecto al arco de mayor relación en todas las secciones, Figuras 12 y 13.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo sobre la influencia reológica en puentes arcos de hormigón no son generales ni aplicables a otra estructura, debido a que influyen varios factores que intervienen en el análisis. Entre ellos, la relación superficie/volumen, la humedad relativa ambiente, el tipo de cemento, la resistencia característica del hormigón y otros.

Los momentos flectores por retracción y fluencia muestran que los valores positivos disminuyen, mientras los momentos los negativos aumentan en el tiempo, para los dos arcos en estudio. Asimismo, se observó que los momentos flectores son mayores en un 60% para el arco con relación luz/flecha igual a 7 con respecto al arco con relación luz/flecha igual a 3.

Las deformaciones elásticas, en la etapa de la construcción para peso propio del arco evolucionan aproximadamente el 55% de la deformación total y el restante 45% se deforma cuando el arco entra en carga y luego se mantienen constantes hasta los seis años que dura el análisis. Asimismo, se indica que las deformaciones en la sección D en los arcos en estudio son inferiores a las calculadas en las secciones A, B y C.

En lo referente a las deformaciones reológicas, éstas evolucionan considerablemente los tres primeros meses de vida del hormigón, cuando la retracción es mayor y la resistencia característica es aún baja. Sin embargo, esta evolución dura aproximadamente hasta los dos años de vida del hormigón hasta llegar a formar una curva asintótica a los seis años, al final del tiempo de análisis. Las deformaciones en el arco con relación luz/flecha igual a 3,5 son inferiores aproximadamente en un 60% con respecto al arco de mayor relación.

Las deformaciones numéricas a los seis años para la retracción y fluencia para el arco con relación luz/flecha igual a 3,5 en las secciones C y D son 0,0237 mm/m y 0,0233 mm/m, respectivamente, y para el arco con relación luz/flecha igual a 7 en las secciones C y D son 0,0607 mm/m y 0,0588 mm/m, respectivamente.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANSYS. *User's Manual Revision 5.0*, Swanson Analysis Systems Inc. 1992.
- [2] J. Calavera Ruiz y L. Garcia Dutari. *Cálculo de Flechas en Estructuras de Hormigón*, INTEMAC, 1992.
- [3] J. Courban. *Tratado de Resistencia de Materiales Tomo II*, Ediciones Aguilar, S.A. 1969.
- [4] CEB Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete, *Bulletin d'Information N° 136*, September 1990.
- [5] CEB-FIP MODEL CODE 1990, *Bulletins 203, 204, 205*, July 1991.
- [6] F. Escrig. *Pandeo de Estructuras*, SPUS Sevilla, 1985.
- [7] M. Fernández Canovas. *Hormigón*, ETSICCP Madrid, Octubre 1991.
- [8] C. Fernández Casado. *Formulario Para Proyectos de Puentes de Hormigón Armado*, Editorial Dossat 1964.
- [9] F. Leonhard. *Hormigón Pretensado Proyecto y Construcción*, IETCC Madrid 1977.
- [10] R. L Hermite. *Computational Fracture Mechanics in Concrete Technology*, París 1982.
- [11] J. Murcia Vela. *Fundamentos para el Análisis de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*, CSDIC Madrid, 1987.
- [12] E. Oñate Ibáñez de Navarra. *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*, Artes Gráficas Torres, S.A., Barcelona-España, 1992.
- [13] L.J. Parrot. *Mag. Concr. Res.*, vol. 251, 1973, pp. 17.
- [14] T.C. Powers. *The Physical Structure of Portland Cement Paste, Tomo I*, Academic Press London, 1964, pp. 407.
- [15] T.C. Powers. *Materials Construction 6*, Academic Press London, 1968, pp. 487.
- [16] A.F. Samartín. *Cálculo de Estructuras de Puentes de Hormigón*, Editorial Rueda, 1983.
- [17] S.P. Timoshenko. *Theory of Elastic Stability*, Second Edition, 1961.
- [18] S.P. Timoshenko. *Resistencia de materiales, Partes I y II*, Espasa-Calpe, 1970.
- [19] G. Winter y A. H. Nilson. *Diseño de Estructuras de Concreto*, Editorial McGraw-Hill Edición 11ª, 1994.
- [20] O.C. Zienkiwicz. *El Método de los Elementos Finitos*, 3ª Edición, Editorial Reverté, SA Barcelona, 1979.

- [21] N.J. Gardner and A. Scanlon. *Long-term deflections of two-way slabs*, Concrete International, January 1990.
- [22] H. Farmington. *ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99) and Commentary"*, American Concrete Institute, USA, 1999.