

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE UN COEFICIENTE PARA INCORPORAR EL EFECTO DE LAS DEFORMACIONES DIFERIDAS EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE ANILLO DE CONTRACCIÓN RESTRINGIDA

M. Paula Zappitelli¹, Ignacio Villa¹, Graciela Giaccio^{1,2}, M. Celeste Torrijos^{1,2,3}, Raúl Zerbino^{1,2,3}, Claudio Rocco¹

¹ Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, paula.zappitelli@ing.unlp.edu.ar

² Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC), La Plata, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET), La Plata, Argentina.

RESUMEN

El ensayo ASTM C1581 consiste en moldear un anillo de hormigón alrededor de un anillo de acero que restringe las deformaciones del hormigón, generando tensiones de tracción en el mismo, que al alcanzar la resistencia a tracción dan lugar a la aparición de fisuras. Estas tensiones se reducen por efecto de la fluencia lenta del material. Para incorporar dicho efecto en los modelos numéricos se reduce el módulo de elasticidad, multiplicándolo por un factor constante, generalmente 0,6, pero en la literatura no se indica por qué se adopta dicho valor ni cómo se lo obtiene. En el presente trabajo se propone una metodología experimental para determinar este factor a partir de datos de extensibilidad en prismas de hormigón e incorporarlo a un modelo de plasticidad con daño para validar el coeficiente obtenido experimentalmente. La variable analizada en la simulación fue la edad de fisuración, observándose una correspondencia entre los resultados experimentales y numéricos.

Palabras claves: fluencia lenta, anillo de contracción restringida, extensibilidad, modelos numéricos

INTRODUCCIÓN

El ensayo de contracción restringida en anillos de hormigón ASTM C1581 es el más utilizado para evaluar la fisuración por contracción en hormigón debido a su simplicidad y bajo costo [1-3]. Este ensayo permite determinar la edad de fisuración y las tensiones de tracción desarrolladas en una probeta de mortero u hormigón bajo contracción restringida y consiste básicamente en moldear un anillo de hormigón o mortero en un molde circular alrededor de un anillo concéntrico de acero. Las deformaciones por compresión en el anillo de acero, causadas por la contracción restringida en el hormigón, se miden utilizando galgas extensométricas (strain gages). Al momento de la aparición de una fisura se genera una disminución de las compresiones en el anillo de acero que se manifiesta a su vez como una reducción abrupta en los registros de deformaciones.

Las tensiones de tracción desarrolladas en el hormigón debidas a la contracción restringida se reducen por efecto de la fluencia lenta, entendida como las deformaciones generadas por la acción de una carga sostenida en el tiempo, por lo que resulta de gran interés cuantificar esta reducción [4]. Si bien los materiales metálicos y cerámicos presentan

deformaciones por fluencia lenta, el hormigón se diferencia de ellos en que dichas deformaciones tienen lugar a temperatura ambiente y en que la presencia de humedad es un factor de considerable influencia [5].

En los modelos numéricos se considera a la fluencia lenta como una deformación diferida simplemente reduciendo el módulo de elasticidad en el tiempo. Al módulo así obtenido se lo denomina módulo de elasticidad efectivo. En la literatura se suele aplicar el valor 0,6 como factor de reducción, [1, 3, 6, 7], pero no se indica por qué motivo se adopta este valor. Otros autores proponen calcular coeficientes midiendo deformaciones por fluencia lenta y contracción libre en probetas tipo hueso y validarlos utilizando el anillo de contracción restringida realizando en primer lugar el ensayo en forma experimental y luego numéricamente. En la simulación numérica se multiplica el módulo de elasticidad por los coeficientes resultantes del ensayo de fluencia lenta, obteniéndose de esta forma un módulo de elasticidad efectivo que se utiliza en la simulación elástica lineal realizada. El estado tensional calculado en los anillos simulados aplicando los coeficientes coincide con el obtenido en el ensayo de laboratorio [8].

Este trabajo tiene por objetivo determinar experimentalmente un coeficiente para incorporar el efecto de las deformaciones diferidas en la modelación numérica del ensayo de anillo de contracción restringida. Esto resulta de interés ya que en la bibliografía se propone adoptar un coeficiente de reducción constante, igual a 0,6, para cualquier edad, sin realizar ninguna justificación en cuanto a la razón de su adopción o cómo obtenerlo. Además, no se tiene en cuenta que el hormigón es un material cuyas propiedades mecánicas evolucionan en el tiempo, en particular a edad temprana, por lo que este efecto tendría que estar considerado en el cálculo del coeficiente de reducción.

METODOLOGIA PROPUESTA Y PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para obtener el coeficiente que permita incorporar el efecto de la fluencia lenta en el modelo numérico del ensayo de anillo de contracción restringida, se propone realizar un ensayo de extensibilidad a carga lenta, provocando deformaciones en las probetas debido a cargas sostenidas en el tiempo, y el mismo ensayo a carga rápida, es decir, aplicando el valor de la carga total en forma rápida. Una vez finalizados los ensayos a carga lenta, se efectúa el cociente entre las deformaciones finales obtenidas con carga lenta y con carga rápida al momento de la rotura. El resultado de este cociente es un factor, que se multiplica por el módulo de elasticidad, medido a la edad de rotura de los ensayos de larga duración, obteniéndose de esta forma un módulo de elasticidad efectivo para la edad de rotura del ensayo a carga lenta. Con este valor y con el valor del módulo de elasticidad a la edad de 1 día, se realiza un ajuste para estimar la evolución del módulo de elasticidad efectivo en el tiempo de manera que la reducción del módulo de elasticidad no resulte constante.

Para validar el factor obtenido a partir de los ensayos de extensibilidad se realiza en laboratorio el ensayo de contracción restringida ASTM C1581. La edad de fisuración obtenida en este ensayo se compara con la resultante de la simulación numérica del mismo, empleando un modelo de plasticidad con daño con propiedades mecánicas variables en el tiempo utilizando para representar la resistencia a tracción una distribución de Weibull [9]. En este modelo los valores del módulo de elasticidad efectivo se ingresan en forma discreta para distintos instantes de tiempo.

Para vincular el ensayo de extensibilidad con el ensayo de contracción restringida se determinó numéricamente la evolución en el tiempo de la tensión en un anillo con las propiedades mecánicas del hormigón utilizado en el ensayo de extensibilidad.

Materiales y mezclas

Se elaboró un hormigón de razón a/c 0,39, con 600 kg de cemento CPN40, 700 kg de arena silíceo natural y 800 kg de piedra partida de 12 mm de tamaño máximo. Con este hormigón se moldearon 18 cilindros de 10x20 cm para determinar la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción por compresión diametral. Para el ensayo de extensibilidad se moldearon siete vigas de 7x10,5x43 cm, compactadas con vibración externa a través de mesa vibradora y curadas en cámara seca (HR: 60 %; T: 20 °C).

Para el ensayo de contracción restringida en anillos se moldearon seis anillos de 406 mm de diámetro externo, 330 mm de diámetro interno y 150 mm de altura [10], curados en cámara seca (HR: 60 %; T: 20 °C).

Se determinaron las resistencias a compresión (f_c), tracción (f_{ct}) y el módulo de elasticidad (E) a las edades de 1, 7 y 28 días. En la Tabla 1 se indican los valores promedio de las tres probetas ensayadas para cada una de las propiedades mencionadas.

Tabla 1: Propiedades mecánicas del hormigón a distintas edades.

Edad (días)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E (MPa)
1	16,1	1,97	19000
7	40,2	3,39	27200
28	48,3	3,52	27300

Determinación de la extensibilidad

Se define como extensibilidad a la deformación de las fibras inferiores de una viga para el 95% de la carga última [11]. Para el ensayo a carga lenta se utiliza un pórtico de carga en el que se coloca una viga simplemente apoyada sobre cilindros y en la parte inferior de la misma, a la altura de la fibra más traccionada, se fija en un lado un transductor tipo LVDT y en el otro un flexímetro sobre una base de 150 mm, para medir la extensibilidad. La viga se carga a los tercios mediante un sistema de palancas en el pórtico de carga en cuyo extremo se colocan pesas de acuerdo con los escalones de carga definidos hasta la rotura de la viga [11].

Se ensayaron dos vigas a carga lenta aplicando diez escalones de carga a lo largo de diez días y nueve a lo largo de nueve días en la restante, con una velocidad de carga de 0,5MPa/día. Para determinar los escalones de carga, se igualó la tensión provocada en un ensayo de flexión en cuatro puntos con la tensión resultante de la simulación numérica del ensayo de anillo de contracción restringida, utilizando las mismas propiedades mecánicas que en el ensayo de flexión. Luego se despejó el valor de la carga correspondiente para cada instante de tiempo, obteniéndose de esta forma los escalones de carga. En la Figura 1 se observa el pórtico de carga y la viga para el ensayo a carga lenta.



Figura 1: Ensayo de extensibilidad a carga lenta.

En el caso de los ensayos a carga rápida, se coloca la viga con las mismas condiciones de apoyo y carga descritas anteriormente (simplemente apoyada y carga a los tercios) en una máquina de ensayos Instron (capacidad 1000 KN). Se fija un LVDT en la fibra más traccionada para registrar las deformaciones por extensibilidad, pero la carga se aplica en forma rápida. En la Figura 2 se muestra el ensayo de extensibilidad a carga rápida.



Figura 2: Ensayo de extensibilidad a carga rápida.

Fisuración en ensayos de contracción restringida

Simultáneamente con el ensayo de extensibilidad se realizó el ensayo de contracción restringida en anillos para el mismo hormigón, con el objetivo de validar los resultados obtenidos a partir del modelo numérico. En cada anillo se pegaron dos strain gages para medir las deformaciones. En la Figura 3 se muestra el ensayo ASTM C1581.



Figura 3: Ensayo de contracción restringida en anillos, ASTM C1581.

MODELO NUMÉRICO

Se utilizó un modelo de plasticidad con daño disponible en el código de análisis por el método de los elementos finitos ABAQUS/Standard denominado Concrete Damaged Plasticity (CDP). Este modelo considera la existencia de dos mecanismos de rotura: fisuración cuando el hormigón se encuentra sometido a tensiones de tracción y aplastamiento cuando se encuentra bajo la acción de tensiones de compresión [12].

La respuesta tensión-deformación bajo cargas uniaxiales sigue una relación elástica lineal hasta alcanzar el valor de la tensión de rotura, la cual se corresponde con el inicio de la microfisuración en el hormigón. Superada la tensión de rotura, la formación de microfisuras se representa macroscópicamente a través de un ablandamiento en la respuesta tensión-deformación, el mismo induce la localización de las deformaciones en la estructura del hormigón. Bajo la acción de compresión uniaxial la repuesta es de tipo lineal hasta que se alcanza la tensión de fluencia inicial. Superado este valor la respuesta se encuentra caracterizada por un endurecimiento de las tensiones seguido por un ablandamiento en las deformaciones luego de superada la tensión última [12].

RESULTADOS

Ensayo de extensibilidad

La edad de rotura de las probetas ensayadas a carga lenta fue 10 días, y la deformación promedio alcanzada en tracción a esa edad (e_{cl}) fue 264×10^{-6} . Por este motivo se realizó el ensayo de carga rápida a esa edad y se obtuvo una deformación final promedio (e_{cr}) de 182×10^{-6} . En la Figura 4 se observan las curvas extensión-tensión obtenidas de los ensayos de extensibilidad a carga rápida a 1 y 10 días y a carga lenta.

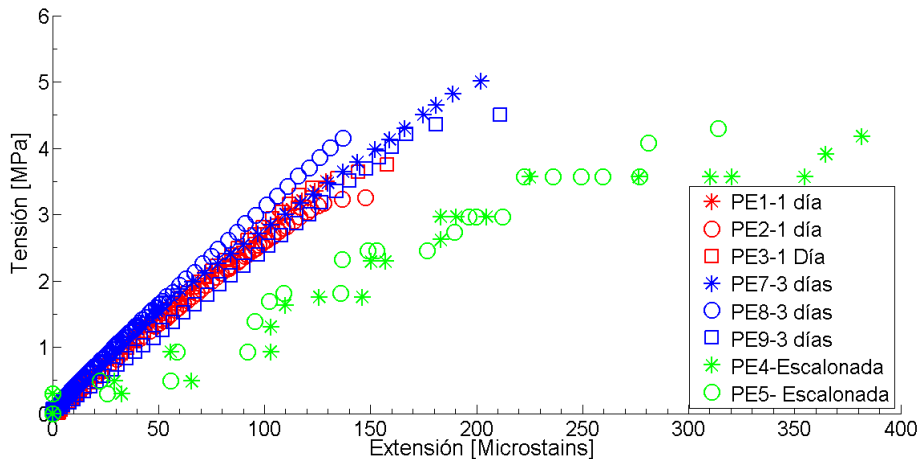


Figura 4: Resultados de los ensayos de extensibilidad a carga rápida y lenta.

Se realiza el cociente entre las deformaciones mencionadas anteriormente (e_{cr}/e_{cl}) obteniendo el valor 0,69 y luego se multiplica el valor del módulo de elasticidad a 10 días por este coeficiente. El resultado obtenido es el módulo de elasticidad efectivo a 10 días, por lo que, para poder predecir su evolución en el tiempo, se ajusta una función logarítmica que pase por este punto y por el valor del módulo de elasticidad a la edad de un día, ya que se acepta que hasta el día 1 todavía no hay relajación, como se observa en la Figura 5. A continuación se presenta la ecuación del ajuste, donde t es el tiempo medido en días:

$$E_{\text{efectivo}}(t) = -841 \ln(t) + 19956 \quad (1)$$

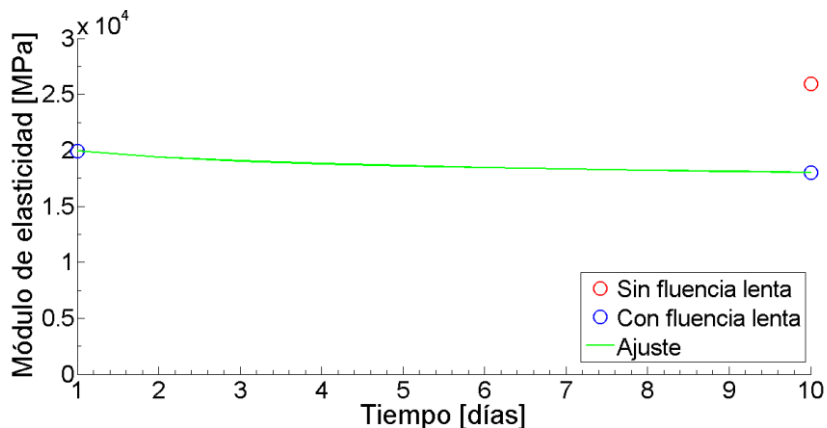


Figura 5: Ajuste del módulo de elasticidad considerando el efecto de la fluencia lenta.

Ensayo de contracción restringida en anillos de hormigón

En la Figura 6 se presentan los registros de deformaciones en los seis anillos ensayados, con la letra *F* y una flecha se indica la edad de fisuración. La deformación informada es el promedio de la medida por los dos strain gage presentes en cada anillo de acero.

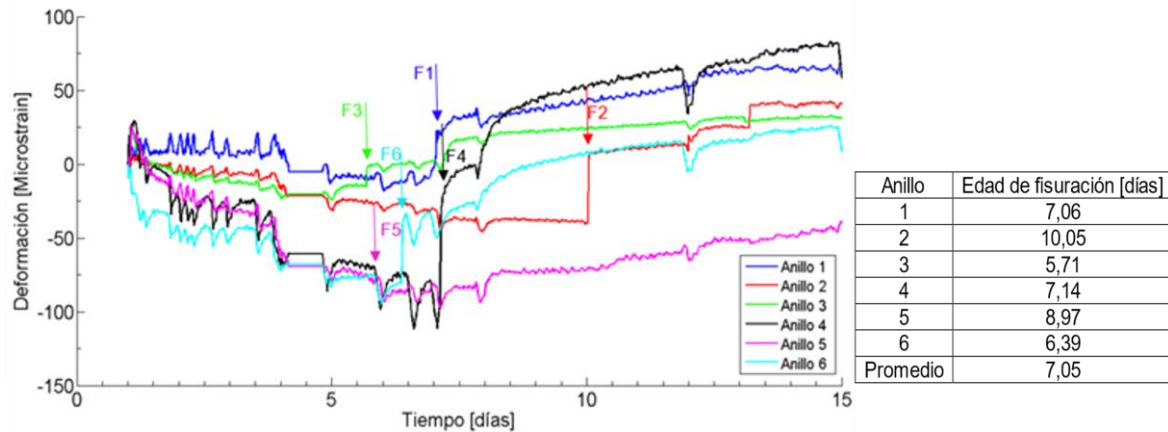


Figura 6: Registros de deformaciones para el ensayo de contracción restringida. Edades de fisuración de los anillos.

Resultados del modelo numérico

Se realizó un modelo numérico en dos dimensiones del ensayo de contracción restringida en anillos aplicando el modelo constitutivo de plasticidad con daño, presentado anteriormente, en el código de análisis por elementos finitos ABAQUS/Standard. Se utilizó un mallado rectangular de 7788 elementos rectangulares de cuatro nodos en tensión plana (CPS4), ver Figura 7. Además, es necesario determinar un estado de cargas que simule la contracción generada en condiciones de laboratorio. Este estado de cargas consiste en una temperatura ficticia, ya que puede considerarse que el cambio de longitud de elementos de hormigón bajo contracción es el mismo que experimentarían si fueran expuestos a una temperatura ficticia [7].

En el modelo numérico se utilizaron las propiedades mecánicas variables en el tiempo informadas en la Tabla 1, pero la resistencia a tracción se incorporó siguiendo una curva de distribución de Weibull, según la expresión (2). Esto permite otorgarle al análisis numérico un enfoque más realista, ya que en los modelos numéricos se suelen utilizar valores medios para la resistencia a tracción, pero experimentalmente se observa que la resistencia del hormigón puede representarse mediante distintas curvas de distribución de probabilidad.

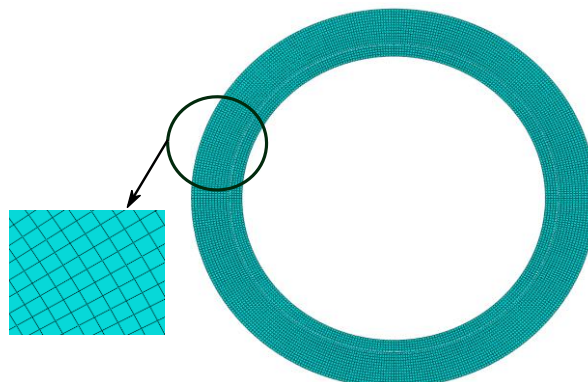


Figura 7: Modelo numérico, malla de Elementos Finitos utilizada

$$f_{cm} = \frac{12}{3.65} \left(\frac{x}{3.65}\right)^{(11)} e^{-\left(\frac{x}{3.65}\right)^{12}} \quad (2)$$

En la Tabla 2 se presentan las edades de fisuración obtenidas con el modelo numérico para distintos valores de la resistencia a tracción presentes en la curva de distribución de Weibull. Se efectuaron diez simulaciones ya que de los análisis realizados surge que a partir de este número las dispersiones en los resultados obtenidos dejan de presentar variaciones. Se consideró el módulo de elasticidad sin aplicar ningún factor de reducción (primera columna), el módulo de elasticidad efectivo aplicando el factor de reducción 0,6 para todas las edades, como se indica en la bibliografía, (segunda columna) y el módulo efectivo variable en el tiempo obtenido a partir de los ensayos de extensibilidad (tercera columna).

Tabla 2: Edades de fisuración obtenidas aplicando el modelo numérico.

N° de simulación	Tiempo de aparición de la fisura (días)		
	Sin factor	Con factor 0.6	Con factor variable
1	5,23	8,47	6,90
2	5,63	8,89	7,34
3	5,20	8,37	6,80
4	5,91	9,55	7,96
5	6,74	8,91	7,28
6	5,76	9,41	7,81
7	5,95	9,69	8,08
8	5,96	9,76	8,10
9	5,37	8,74	7,15
10	6,72	11,07	9,39
Promedio	5,85	9,29	7,68
Desviación estándar	0,54	0,80	0,77

Comparando las edades de fisuración obtenidas numéricamente con la resultante del ensayo de contracción restringida en anillos (7,05 días) se observa que, al no considerar el módulo de elasticidad efectivo se obtiene una edad de fisuración muy por debajo del valor resultante de los ensayos (5,85 días). Al utilizar el factor 0.6 se sobre estima la edad de fisuración (9,29 días) en relación con la obtenida experimentalmente. En cambio, al calcular la variación en el tiempo del módulo efectivo a partir del ajuste obtenido como resultado del factor calculado en los ensayos de extensibilidad, se observa una diferencia muy baja (0,63 días), en comparación con los casos anteriores (1,20 días para el primero y 2,24 días para el segundo), en la edad de fisuración obtenida numéricamente (7,68 días) con respecto a los resultados experimentales.

CONCLUSIONES

Es importante cuantificar la fluencia lenta ya que retrasa la edad de fisuración por contracción restringida. Por este motivo es fundamental al emplear modelos numéricos considerar este efecto en el análisis de fisuración, particularmente a edad temprana. En el presente trabajo se propuso incorporarlo mediante un coeficiente obtenido a partir de ensayos de extensibilidad en prismas de hormigón. Adicionalmente se determinó la variación de este coeficiente en el tiempo, lo cual es un aspecto clave en el análisis de fisuración a edad temprana, ya que el hormigón es un material cuyas propiedades mecánicas evolucionan en el tiempo, lo que condiciona los análisis tensionales.

La incorporación del efecto de la fluencia lenta en el modelo numérico se llevó a cabo mediante el método del módulo de elasticidad efectivo, modelando el ensayo de contracción restringida en anillos utilizando un modelo de plasticidad con daño. Al contrastar los resultados numéricos de edad de fisuración obtenidos con los correspondientes al ensayo de laboratorio, se observa que al incorporar un factor de ajuste variable en el tiempo los resultados numéricos predicen con menos error los resultados experimentales, lo cual no ocurre al no considerar este factor de ajuste o al considerarlo constante e igual a 0,6 a lo largo de todo el análisis. Por lo que puede concluirse que el método propuesto es válido para incorporar el efecto de la fluencia lenta a los modelos numéricos de contracción restringida en anillos de hormigón.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC) y al Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingeniería-UNLP, por permitir el uso de sus instalaciones para la realización de los ensayos presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Weiss WJ, Yang W, Shah SP, "Influence of the specimen size and geometry on shrinkage cracking of rings", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, (2000), 93-101.
- [2] Weiss WJ, Shah SP, "Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry", *Material & Structures*, Vol. 35, (2002), 85-91.
- [3] Moon JH, Rajabipour F, Pease B, Weiss J, "Quantifying the influence of the restrained ring test", *Journal of ASTM International*, Vol. 3, (2006), 1-13.
- [4] Biffaut M, Benboudjema F, Torrenti JM, Nahas G, "Numerical analysis of the active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures", *Engineering Structures*, Vol. 33, (2011), 1390-1401.
- [5] Mindess S, Young JF, Darwin D, "Concrete". Prentice Hall, (2003).
- [6] Zhou X, Dong W, Oladiran O, "Assessment of restrained shrinkage cracking of concrete using elliptical ring specimens: experimental and numerical", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 26, (2014), 871-878.
- [7] Dong W, Zhou X, Wu Z, Kastiukas G, "Effects of specimen size of shrinkage cracking of concrete via elliptical rings: Thin vs. Thick", *Computer and Structures*, Vol. 174, (2016), 66-78.
- [8] Khan I, Castel A., Gilbert RA, "Tensile creep and early-age concrete cracking to restrained shrinkage", *Construction and Building Materials*, Vol. 149, (2017), 705-715.
- [9] Zappitelli MP, Villa I, Fernández-Sáez J, Rocco C, "Desarrollo de un modelo con asignación aleatoria de propiedades para el estudio de la aparición de fisuras en un anillo de hormigón con deformación restringida", *Mecánica Computacional*, Vol. 35, (2017), 2047-2047.
- [10] ASTM. C 1581/C 1581M-09, "Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage", *ASTM International*, (2004), 7p.
- [11] Giovambattista A, Violini D, Zerbino R, "Extensibility of high strength concretes", *Materials and Structures*, Vol. 25, (1992), 552-557.
- [12] ABAQUS, "ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume III: Materials", *Dassault Systèmes Simulia Corp.*, (2013).