

Mechanical behavior of concrete cold joints

Comportamiento mecánico de juntas frías lisas de concreto

A. Torres, A. Ramos-Cañón^{1*}, F. Prada-Sarmiento*, M. Botía-Díaz*

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 01/12/2015

Fecha de Aceptación: 03/03/2016

PAG 151-162

Abstract

A smooth cold joint of concrete is an untreated weak plane caused by an interruption of the casting process, which can significantly affect the performance of a structural system. In this paper, the problem of the generation of cold joints is approached from two complementary perspectives. a) The loss of resistance due to the occurrence of cold joints is quantified through an extensive experimental program of concrete cylinders and b) a constitutive model is proposed and its performance is analyzed to simulate the time-dependent behavior of concrete under load (viscosity) and no load (setting). A loss of resistance over 30% for cold concrete cylinders with diagonal joints was found, while concrete cylinders with horizontal cold joints had no loss of resistance. Thus, the loss of resistance depends on the orientation of the cold joint with respect to the direction of the main stresses. This aspect is explained by the proposed constitutive model of viscous-reactive type, which is able to simulate the results of the experimental program. This work opens the possibility of numerical modeling of boundary value problems of structures with a cold joint and to study their influence on the structure's overall stability.

Keywords: Cold joint, constitutive model, stress, strain, finite element

Resumen

Una junta fría lisa en el concreto es un plano débil no tratado causado por la interrupción de suministro de mezcla en el vaciado que puede afectar de manera considerable el desempeño de un sistema estructural. En este trabajo se aborda el problema de la generación de juntas frías lisas desde dos perspectivas complementarias a. se cuantifica la disminución de la resistencia debido a la aparición de juntas frías en concreto por medio de un extensivo diseño experimental de cilindros de concreto y b. se propone un modelo constitutivo y se analiza su desempeño para simular el comportamiento esfuerzo – deformación dependiente del tiempo del concreto en condiciones de carga (viscosidad) y no carga (fraguado). Se encuentran pérdidas de resistencia máxima de más del 30% para cilindros de concreto con juntas frías diagonales comparadas con cilindros sanos en tanto que los cilindros de concreto con junta fría horizontal no presentan disminución de resistencia por lo que la disminución de la resistencia depende de la orientación de la junta fría con relación a la dirección de los esfuerzos principales. Este aspecto tiene su explicación en la propuesta del modelo constitutivo de tipo viscoso –reactivo capaz de simular los resultados de la campaña experimental. Este trabajo abre la posibilidad de hacer modelación numérica de problemas de valor de contorno de estructuras que presenten una junta fría y de esta manera estudiar su influencia en la estabilidad global

Palabras clave: Junta fría, modelo constitutivo, esfuerzo, deformación, elementos finitos

1. Introducción

Una junta fría lisa en el concreto es un plano débil causado por la interrupción de suministro de mezcla en el vaciado. Es ampliamente conocido que debido a dificultades en el método constructivo de estructuras de concreto, es posible que se presenten juntas frías que evidentemente afectan el desempeño estructural a partir de la disminución de las características esfuerzo deformación del sistema (Harsem, 2005). La disminución de la resistencia máxima del sistema depende de factores como inclinación de la junta fría, tiempo de formación de la junta fría y relación de la inclinación de la junta fría con la dirección del estado de esfuerzos (Wall y Shrive, 1988; Rathi y Kolase, 2013; Tapkire y Kumavat, 2015). Dicha disminución de las propiedades mecánicas debido a la presencia de la junta fría puede comprometer la integridad estructural de la edificación (Volz y Olson, 2008). A pesar que se conoce con cierta claridad los aspectos que intervienen en el problema de junta fría, no es

claro en qué proporción se disminuye la resistencia pico del concreto cuando tiene una junta fría y su evolución en el tiempo de fraguado. La normatividad en varios países establece que en caso de estar en la necesidad de construir una pieza estructural con una junta fría, esta debe ser desarrollada de forma tal que la discontinuidad no interfiera en el comportamiento mecánico ni en la estabilidad. El tratamiento de una junta fría se realiza en casos en donde se está realizando un proceso supervisado en la construcción. Sin embargo, en el caso en que se presente una junta fría que no se conozca si ésta fue mejorada con técnicas adecuadas, se estará en un escenario desfavorable debido a la incertidumbre en su comportamiento mecánico.

En este trabajo se aborda el problema de la generación de juntas frías lisa desde dos perspectivas complementarias:

1. Se cuantifica la disminución de la resistencia debido a la aparición de juntas frías en concreto por medio de un extensivo programa experimental de cilindros de concreto.
2. Se propone un modelo constitutivo y se analiza su desempeño en la capacidad de simular el comportamiento viscoso del concreto que permite generar las bases de

¹ Autor de correspondencia:



modelación de problemas de valor de contorno de estructuras reales y así el posterior uso en el diseño de las estructuras de concreto.

Este trabajo presenta un límite inferior del comportamiento mecánico de la discontinuidad dado que tanto a nivel experimental como la evaluación numérica se desarrolla con junta fría lisa. La junta fría lisa es el escenario más desfavorable y por lo tanto establece valores mínimos que deben considerarse en caso tal que sea necesario enfrentarse al análisis de una junta fría y no se conozca si esta fue tratada o no.

2. Campaña experimental

Se realizaron ensayos de resistencia última a la compresión uniaxial y tracción indirecta en cilindros normalizados de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, en los cuales se indujeron juntas frías planas y lisas de orientación horizontal, diagonal y vertical. Estas juntas frías tuvieron tiempos de formación de 2, 4, 6 y 8 horas y se usaron moldes metálicos para dar cada una de las inclinaciones, razón por la cual el plano resultante era liso. Así mismo los ensayos de resistencia última se realizaron a edades de la probeta de 3, 7 y 28 días. Los cilindros con junta fría horizontal y diagonal se sometieron a ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y los cilindros con junta fría diagonal a ensayos de tracción indirecta. En la Figura 1 se muestra un resumen de los ensayos experimentales realizados.

El proceso para la realización de esos cilindros consistió en preparar una mezcla de concreto fresco para elaborar las primeras mitades de los cilindros con junta fría, realizando también cilindros completos para tener testigos

sanos. Poco antes de cumplir los tiempos de formación de junta fría (2, 4, 6 y 8 horas) se preparó un segundo lote de concreto fresco para completar las mitades faltantes y así conformar las probetas con junta fría, fundiendo también cilindros sanos de esta segunda mezcla. Los cilindros sanos y con junta fría se desencofraron una vez tenían una consistencia apropiada y se llevaron a piscina de curado con una temperatura constante de donde se sacaron una vez cumplieron las edades predeterminadas de 3, 7 y 28 días para ensayar a compresión uniaxial o tracción indirecta según fuera el caso. Por cada cilindro con junta fría ensayado se fallaron dos probetas testigo sin junta del mismo lote de mezcla para poder establecer el porcentaje de disminución de resistencia. Para el ensayo de compresión uniaxial en cilindros con junta diagonal y horizontal, una vez se retiraron las probetas de la piscina de curado se les colocó un retenedor con almohadilla de neopreno en ambos extremos, disponiendo el cilindro en sentido vertical y alineándolo con el eje de la rótula de la placa superior de la máquina de ensayo. La prensa aplicó la carga a una velocidad de 0.25 MPa/s hasta que el cilindro falló y se obtuvo la fuerza en el instante en que se presentó la rotura. Para el ensayo de tracción indirecta en la probeta con junta fría vertical se colocó el cilindro con su eje orientado horizontalmente y la carga aplicada a lo largo de la altura del cilindro y paralela al plano de la junta. En la Figura 2 se muestra un esquema de la forma en que en aplicó la carga a los cilindros con junta fría en los ensayos.

Obtenidos los datos de falla de los diferentes cilindros con junta fría se compararon con los obtenidos de los cilindros sin junta y se determinó el porcentaje de reducción de resistencia que se muestra en las Figuras 3, 4 y 5.

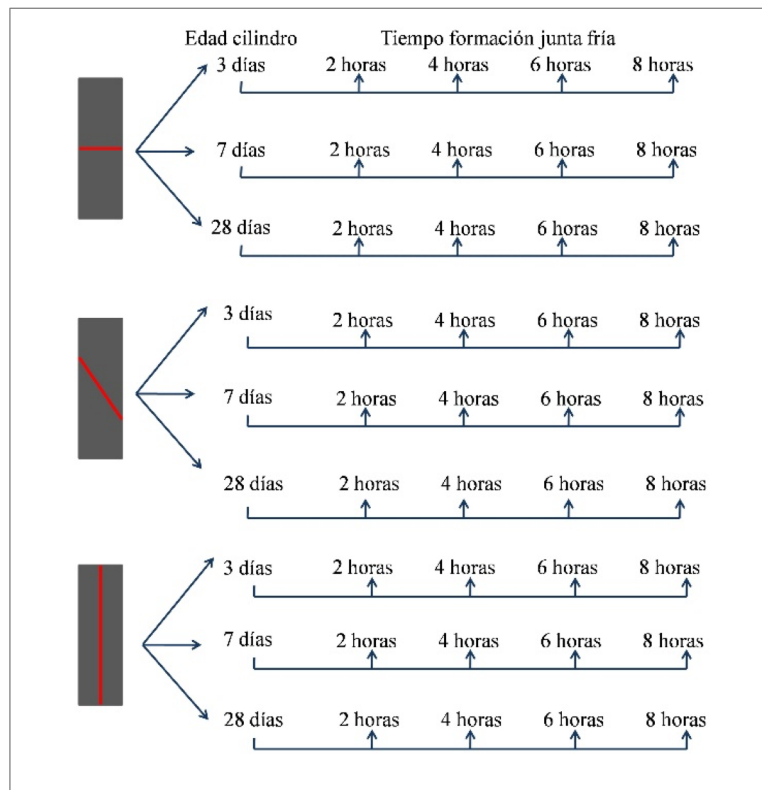


Figura 1. Experimentos de cilindros de concreto con junta fría

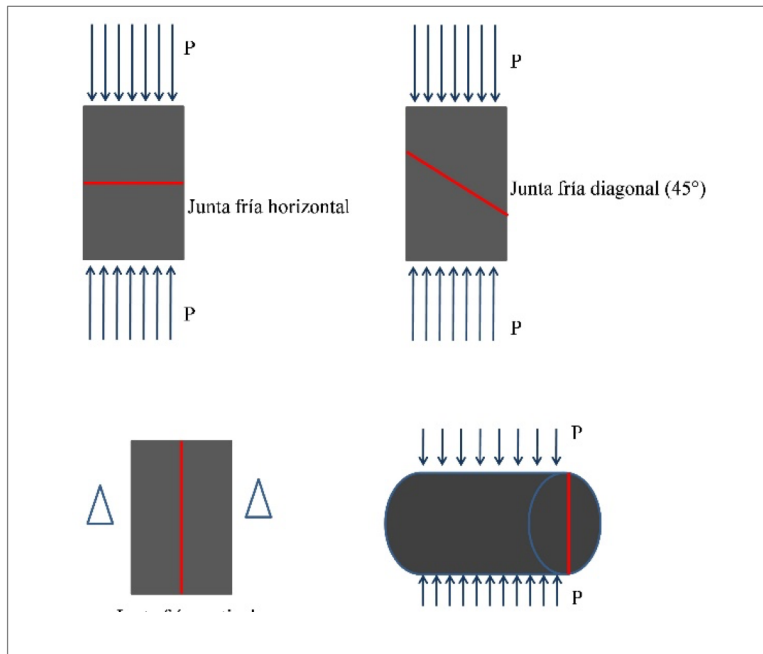


Figura 2. Forma en que se cargaron los cilindros con junta fría

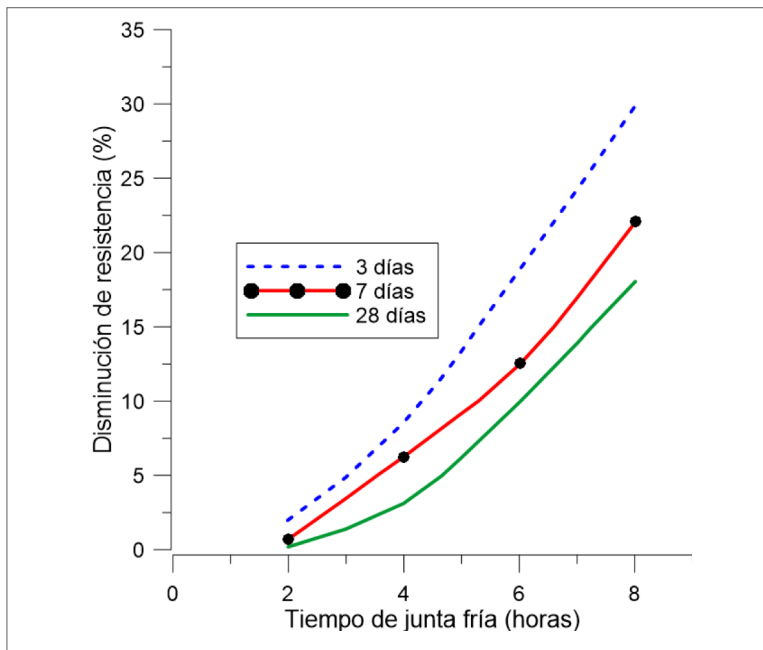


Figura 3. Disminución de la resistencia a compresión debido a junta fría diagonal en cilindros normalizados de concreto

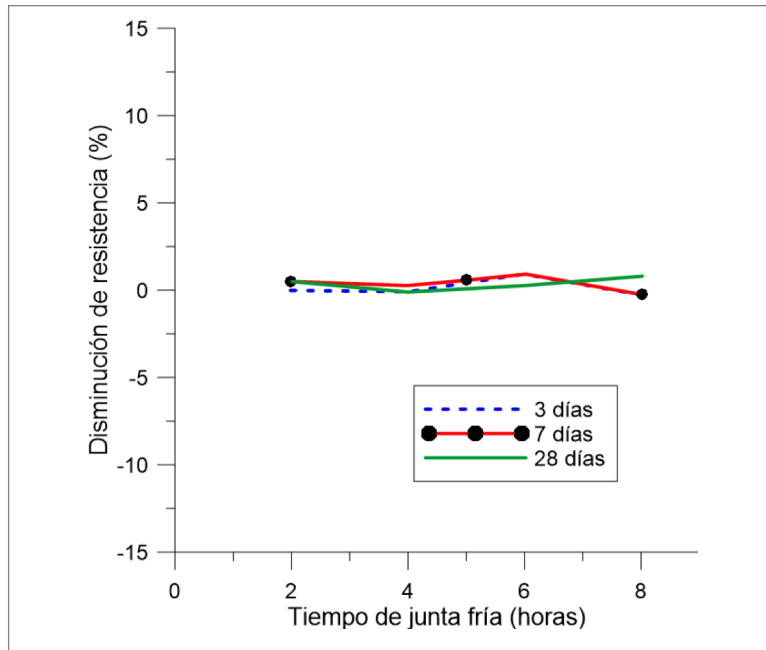


Figura 4. Disminución de la resistencia a compresión debido a junta fría horizontal en cilindros normalizados de concreto

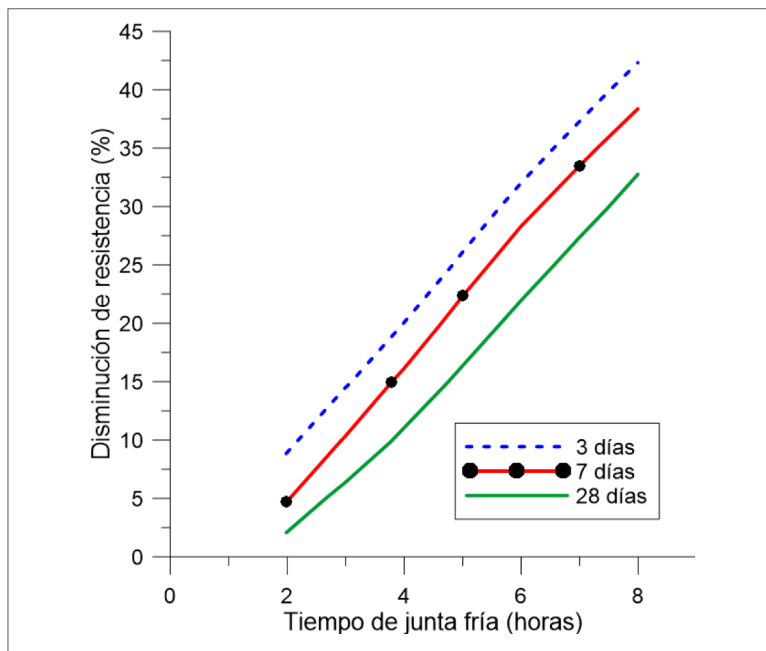


Figura 5. Disminución de la resistencia a tracción indirecta debido a junta fría vertical en cilindros normalizados de concreto

Se observa una pérdida de resistencia importante a la compresión de los cilindros con junta diagonal, en los que se reporta falla a lo largo de la junta fría. Los cilindros con junta horizontal no pierden resistencia y su forma de falla es igual a la de un cilindro sano. Los cilindros con junta vertical reportan la mayor pérdida de resistencia y la falla ocurre también por el plano de la junta. Los resultados anteriormente reportados son cualitativamente similares a los mostrados por Rathí y Kolase, (2013) y Tapkire y Parihar (2014) en función de las diferentes inclinaciones de la junta fría, sin embargo los porcentajes de disminución de resistencia son diferentes dado que las condiciones de los materiales son disímiles entre ellos y el tratamiento que se le da a la superficie de la junta fría en este trabajo genera superficies con baja rugosidad con relación al tratamiento dado por Rathí y Kolase (2013) y Tapkire y Parihar (2014). Los porcentajes de pérdida de resistencia reportados por Rathí y Kolase (2013) y Tapkire y Parihar (2014) son de máximo 17% en tanto que los reportados en este trabajo son de máximo 45%.

3. Modelo constitutivo propuesto

En esta sección se propone un modelo constitutivo para el concreto con la potencialidad de tener en cuenta la variación del comportamiento esfuerzo deformación variable en el tiempo. Los resultados mostrados en la sección experimental sirvieron para calibrar el modelo constitutivo propuesto y de esta manera evaluar su desempeño para modelar el comportamiento mecánico del concreto con la generación de una junta fría en un problema de valor de contorno.

Existen numerosos modelos matemáticos propuestos que relacionan los esfuerzos y deformaciones del concreto (Kunieda y Srisoros, 2007; Asamoto y Ishida 2006; Babu y Benipal 2005). La dificultad de dichos modelos es que están propuestos únicamente para la condición uniaxial por lo que su aplicabilidad a problemas de valor de contorno como simulación de estructuras cuyo campo de esfuerzos en multiaxial es limitado para su implementación en un programa de elementos finitos. Para sobreponer esta limitación, en este trabajo se propone un modelo constitutivo combinado que tiene en cuenta el comportamiento usual viscoelástico y otro de tipo reactivo (Suter y Benipal, 2007) que pretende simular la variación de las propiedades mecánicas a medida que el concreto fragua.

Suter y Benipal (2007) desarrollaron un modelo viscoelástico dependiente del tiempo usando un elemento Maxwell en paralelo con un elemento llamado "reactivo". Este modelo permite variar las propiedades del concreto con el tiempo y se pueden simular fenómenos en los cuales se presente pérdida o ganancia de rigidez debidas a la existencia de una reacción química al interior del material que le ocasiona modificaciones físicas. Varios fenómenos pueden hacer que el concreto pierda o gane propiedades mecánicas conforme transcurra el tiempo, como el ataque químico de sustancias nocivas y el proceso de hidratación del cemento que resulta en el endurecimiento del concreto. Cualquiera que sea la reacción que ocasione cambios físicos al concreto tiene una velocidad variable a lo largo del tiempo que está regida por una ecuación α que determina el porcentaje de la reacción que se ha completado, llamada también función de volumen (Suter y Benipal, 2006). Para

esta investigación en particular el elemento "reactivo" representa la parte del concreto que está en estado plástico y que con el transcurso del tiempo va endureciendo por partes, obedeciendo a una función de volumen específica.

El modelo viscoelástico se define con el módulo de Young del material E , la relación de Poisson ν y con los parámetros \bar{g}_i^p , \bar{k}_i^p y τ_i que indican cómo cambia el módulo de rigidez con el tiempo mientras se apliquen cargas (Simulia, 2015). Este modelo está en la capacidad de simular fenómenos dependientes del tiempo como el creep que exhibe el concreto o la relajación de esfuerzos. El modelo considera que si al material se le aplica una deformación cortante $\gamma(t)$ que depende del tiempo, la respuesta será un esfuerzo cortante $\tau(t)$ dependiente del tiempo que obedece a la Ecuación 1:

$$\tau(t) = \int_0^t G_R(t-s)\dot{\gamma}(s)ds \quad (1)$$

Donde G_R es el módulo de relajación de cortante dependiente del tiempo.

Si la deformación cortante $\gamma(t)$ se aplica instantáneamente y se deja constante durante algún tiempo t , la Ecuación 1 se reduce a 2:

$$\tau(t) = G_R(t)\gamma, \text{ con } \dot{\gamma} = 0 \text{ y } t > 0 \quad (2)$$

La variación en el tiempo del módulo de relajación de cortante puede definirse de manera más sencilla como 3:

$$g_R(t) = G_R(t)/G_0 \quad (3)$$

Donde $G_0 = G_R(0)$ es decir, el módulo de relajación de cortante instantáneo. Las Ecuaciones que definen el comportamiento volumétrico del material tienen una explicación igual, así la presión hidrostática ρ está dada por 4:

$$\rho(t) = -K_0 \int_0^t K_R(t-s)\varepsilon^{vol}(s)ds \quad (4)$$

Donde K_0 es el módulo bulk elástico instantáneo, $K_R(t)$ es el módulo de relajación bulk instantáneo adimensional y ε^{vol} es la deformación volumétrica. Las expresiones subsecuentes son las mismas presentadas para el comportamiento a cortante aplicadas al caso volumétrico.

La implementación numérica del modelo constitutivo propuesto se realizó en el software en ABAQUS, en donde los módulos adimensionales de relajación $g_R(t)$ y $k_R(t)$ se aproximan como una expansión de series de Prony al definir los parámetros \bar{g}_i^p , \bar{k}_i^p y τ_i antes mencionados. La expansión del módulo de relajación cortante está dada por 5:

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N \bar{g}_i^p \left(1 - e^{-t/\tau_i^G}\right) \quad (5)$$

Por su parte, la expansión para el comportamiento volumétrico está dado por 6:

$$\rho = -K_0 \left(\varepsilon^{vol} - \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^{vol}\right) \quad (6)$$



Donde:

$$\varepsilon_i^{vol} = \frac{\bar{k}_i^P}{\tau_i^K} \int_0^t e^{-s/\tau_i^K} \varepsilon^{vol}(t-s) ds \quad (7)$$

El programa ABAQUS supone que $\tau_i^G = \tau_i^K = \tau_i$. Con el ingreso de los parámetros \bar{g}_i^P , \bar{k}_i^P y τ_i además del módulo de Young y la relación de Poisson se define el comportamiento viscoelástico del material. Es importante recalcar que el modelo viscoelástico presentado tiene la capacidad de evolucionar las propiedades mecánicas del material en el tiempo mientras sea aplicada una carga. Por lo anterior, es necesario enriquecer el modelo viscoelástico con la posibilidad de simular el endurecimiento del concreto en el que hay un cambio de las propiedades mecánicas con el tiempo sin la aplicación de fuerzas. El modelo de Suter y Benipal permite simular el endurecimiento del material desde su estado fresco hasta que sea un material de mayor desempeño de sus características mecánicas a través de la incorporación de la variación de las propiedades elásticas de concreto (E y ν) en el tiempo para después incluirla en el modelo viscoelástico. La función matemática para la evolución del módulo elástico (Ecuación 8) incluida en el modelo fue calibrada con base en los resultados experimentales mostrados en la sección anterior.

$$E(t) = 6375t^{1/3} \quad (8)$$

Con E en MPa y t en segundos.

Esta relación se usó para determinar el módulo de Young de cada una de las dos capas de concreto que conformaron los cilindros con junta fría en el momento de la falla.

Además se conoce la relación de Poisson que debe tener un concreto con el tiempo según la Ecuación 9 propuesta por Reinhardt y Hilsdorf (2001) es:

$$\nu(t) = \nu_0 - (\nu_0 - \nu_{28})\beta(t), \quad (9)$$

$$\beta(t) = \sqrt{e^{s\left(1 - \sqrt{28\frac{t_1}{t}}\right)}} \quad (10)$$

Donde $t_1=86400$ s, $s=0.38$, $\nu_0=0.4999$ y $\nu_{28}=0.20$

La curva que representa la variación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto usado en el presente trabajo se muestra en la Figura 6.

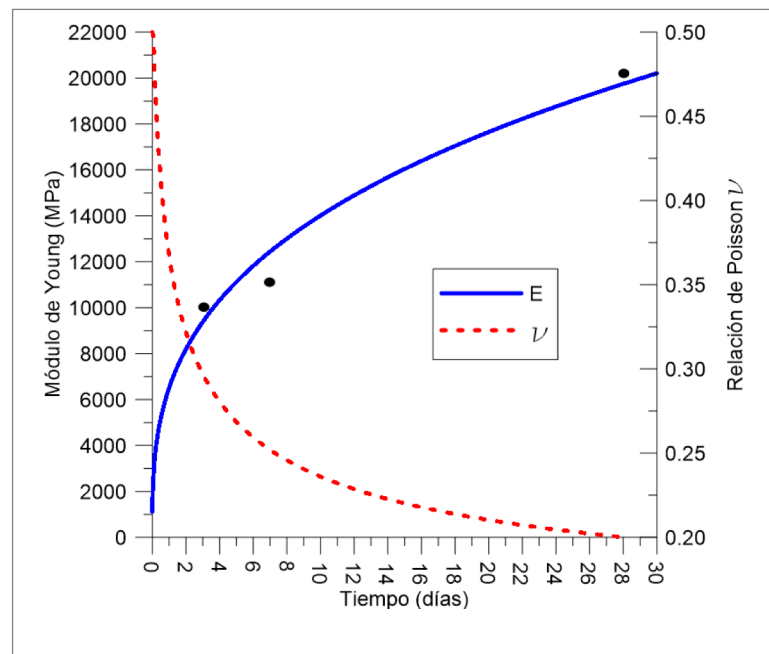


Figura 6. Variación del módulo de Young y relación de Poisson con el tiempo para el modelo constitutivo propuesto

Los parámetros del material a diferentes edades del concreto de acuerdo con la teoría propuesta por Suter y Benipal se pueden incluir dentro del modelo viscoelástico y de esta manera se propone un nuevo modelo constitutivo combinado que tiene en cuenta, por un lado, el comportamiento viscoso del concreto y la dependencia de la velocidad de carga, y por otro lado, posibilita incluir la variación del módulo de elasticidad E y la relación de Poisson ν con el tiempo. Esto no solo permite tener en cuenta el proceso de endurecimiento del concreto sino también la diferencia de rigideces que existe entre dos volúmenes del material que conforman un cilindro, que se han vertido en tiempos distantes y que se han sometido a carga a diferentes edades.

Para observar el desempeño del modelo constitutivo propuesto en condiciones sin junta fría, se procedió a hacer la calibración de ensayos experimentales a compresión uniaxial de cilindros de concreto de 3 días de edad (Figura 7). La Figura 7 muestra un desempeño aceptable del modelo constitutivo bajo condiciones de ensayo de tipo elemental tanto para la deformabilidad como para la resistencia última.

Luego de obtener los parámetros de los modelos que mejor representan las propiedades del concreto usado en laboratorio, se simularon los mismos ensayos experimentales de cilindros con junta fría con el método de elementos finitos en ABAQUS.

Los modelos de cilindros con junta fría están conformados por dos volúmenes de materiales diferentes que poseen las características para la edad que le correspondan, obtenidos de la curva de variación del módulo de elasticidad y relación de Poisson con el tiempo (Figura 6). Para un cilindro con tiempo de formación junta fría de 2 horas y sometido al ensayo de carga a los 3 días de edad, a una de las capas se le asignan las propiedades del concreto a 3 días de edad y a la otra capa las propiedades del concreto a 3.08 días, es decir, 2 horas de diferencia, y de esta misma manera se asignan las propiedades a cada cilindro con junta fría. A estos modelos se les aplica una carga de 0.25MPa/s hasta que alcancen una deformación unitaria máxima de 0.002. En estas simulaciones también cargaron cilindros sanos para observar cómo cambia el comportamiento cuando se induce la junta fría.

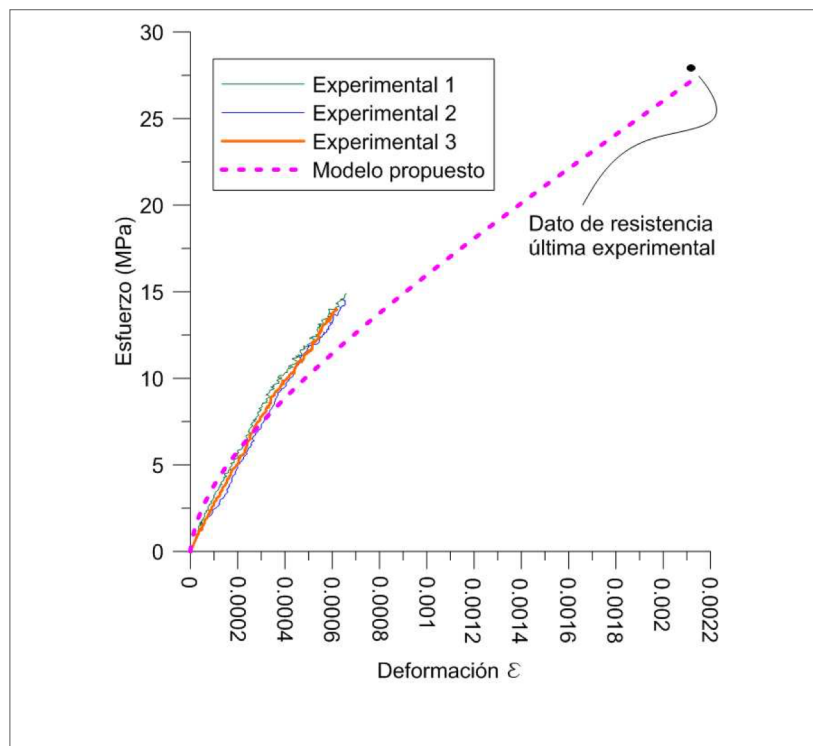


Figura 7. Relación esfuerzo axial – deformación axial a 3 días. Resultados de 3 ensayos con las mismas condiciones y modelo propuesto



4. Simulaciones numéricas – comparación con experimentos y discusión

En los cilindros sin junta fría sometidos a compresión uniaxial solo se presentan esfuerzos en la dirección de aplicación de la fuerza y además estos son iguales en toda la altura del elemento para cualquier magnitud de la carga aplicada. Ya que el cilindro no está restringido lateralmente no se generan esfuerzos en estas direcciones y existe libre deformación debido al efecto de Poisson. Por esta misma razón tampoco se presentan esfuerzos ni deformaciones de las componentes de cortante. Cuando la misma carga se aplica a un modelo de cilindro con junta fría diagonal se observa una concentración de esfuerzos y deformaciones que se dan típicamente en ciertas zonas cercanas a la junta. En la

Figura 8 se presentan los diagramas típicos de esfuerzos axiales para un cilindro sano, con junta fría diagonal y con junta horizontal.

Estas concentraciones de esfuerzos se presentan en menor medida conforme el tiempo de formación de junta sea menor. Tal situación puede observarse en la Figura 9 donde se muestra el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones axiales a lo largo de la altura de los cilindros, con diferentes horas de formación de una junta fría diagonal ubicada a 10 cm aproximadamente en la altura de la probeta; todas estas curvas corresponden a un concreto de una edad de 3 días. Puede apreciarse que la línea horizontal corresponde a una probeta sana en la cual no hay variación de esfuerzos a lo largo del cilindro pero cuando se presenta la junta fría y mientras el tiempo de formación de ella sea mayor las curvas se alejan cada vez más de la línea horizontal en la zona de interface de los dos concretos.

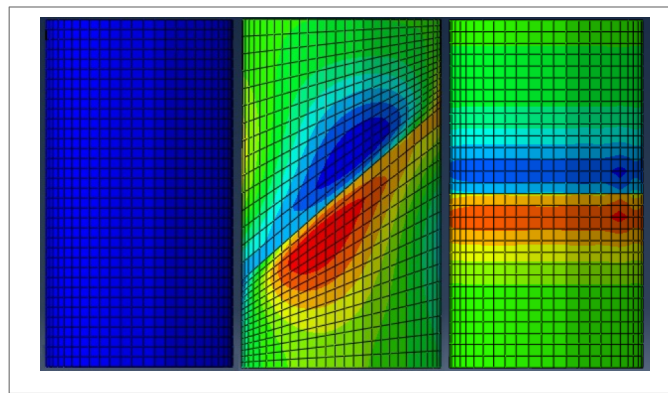


Figura 8. Diagrama de esfuerzos axiales en cilindro sano (izq), con junta fría diagonal (cen) y con junta fría horizontal (der)

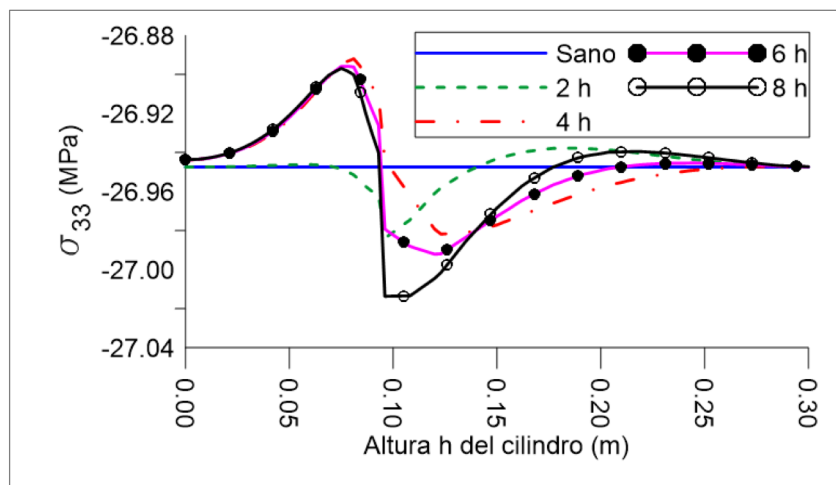


Figura 9. Esfuerzos axiales a lo largo de la altura de cilindros para diferentes tiempos de formación de junta fría

Un hecho importante que se ha observado en los modelos es que al someter a compresión uniaxial las probetas con junta fría, se presentan componentes de esfuerzos de cortante que posibilitan la reducción de su resistencia y que estos son mayores mientras la edad del concreto sea menor y el tiempo de formación de junta sea mayor como se muestra en la Figura 10. Esta tendencia de los esfuerzos de cortante concuerda con los datos experimentales de los cilindros con junta fría diagonal en los cuales se evidencia mayor pérdida de resistencia para probetas ensayadas en edad temprana con tiempo de formación de junta prolongado (Figura 3).

Al final de la etapa de carga pueden obtenerse los tensores de esfuerzo que se presentan en las zonas de mayores concentraciones para los casos de junta con orientación diagonal y horizontal. Los tensores de esfuerzo pueden cambiar de base con respecto al plano horizontal del modelo de ABAQUS con el fin de evaluar la variación de las componentes de corte en función del ángulo de cambio de base. En la Figura 11 se presenta el esfuerzo máximo de

cortante en la zona de junta de un cilindro con respecto al ángulo de cambio de base del tensor de esfuerzos. Es importante notar que se presenta únicamente para el caso de junta diagonal ya que el resultado para junta fría horizontal es muy cercano.

Se observa que el mayor componente de esfuerzo de corte se presentan al rotar la base del tensor de esfuerzos 45° respecto a la horizontal, ángulo que coincide precisamente con la orientación de la junta fría diagonal en estudio. Esto explica la reducción de la resistencia a compresión uniaxial de los cilindros con junta diagonal de 45° de las pruebas experimentales (Figura 3). En el caso de los cilindros con junta fría horizontal, se explica que no hubo pérdida de resistencia a la compresión, debido a que los mayores esfuerzos de cortante se presentan también a 45°, pero este ángulo no coincide con el plano de la junta y por lo tanto el comportamiento de la probeta a compresión es similar al de un cilindro sano sin junta.

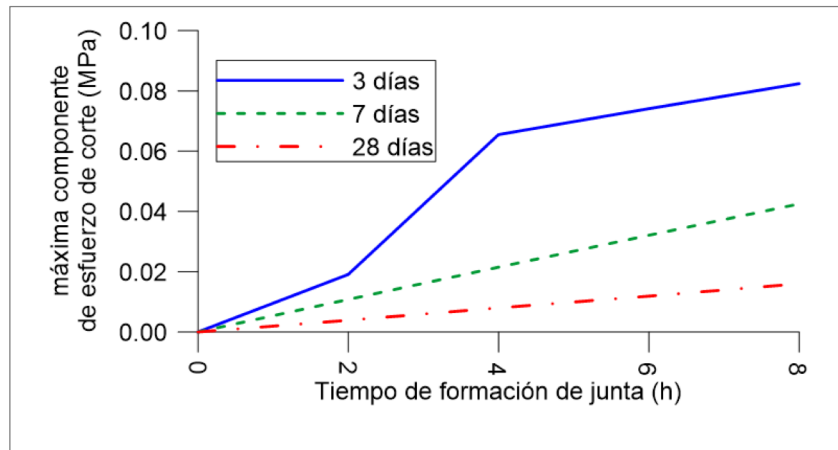


Figura 10. Esfuerzos cortantes en los cilindros dependiendo del tiempo de formación de junta y edad del concreto

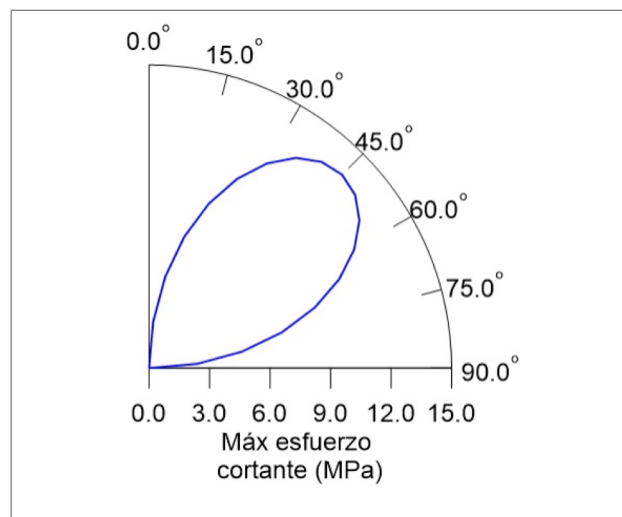


Figura 11. Máximo componente de esfuerzo de corte con respecto al ángulo de giro de la base

La concentración de esfuerzos se debe a que en los modelos de cilindro con junta fría hay diferencias entre los módulos de elasticidad de los dos materiales que conforman el primer y segundo volumen de concreto, pues al haber un intervalo en sus tiempos de colocación también sus edades y rigideces son diferentes. En el caso de los cilindros con junta fría, se generan esfuerzos de corte debido a la diferencia de rigideces de los dos volúmenes de concreto que es mayor en edades tempranas y tiempos de formación de junta más prolongados, lo que se explica por la velocidad de endurecimiento del concreto, que es muy rápida en los primeros días y a edades avanzadas el proceso se vuelve mucho más lento tendiendo casi a su detenimiento. Es por esta razón que habrá más diferencia entre los módulos de elasticidad de los concretos que conforman un cilindro en edades tempranas y tiempos de vertimiento entre uno y otro más distanciados, que en el caso de dos concretos de edad más avanzada y tiempo de formación de junta pequeño. Una mayor diferencia de rigidez lleva a que se presente más esfuerzos de cortante y por lo tanto más reducción de la resistencia de la probeta. Es importante recalcar que este comportamiento se da de manera muy similar en los cilindros con junta horizontal y diagonal.

En la Figura 12 se representa la diferencia de módulos de elasticidad entre dos capas de concreto que conforman el modelo del cilindro con junta fría, dependiendo del tiempo

de formación de junta y de la edad del concreto. Se observa como hay mayores diferencias de rigideces en los concretos de cilindros de edad temprana que de edad tardía, pero además se aprecia cómo evolucionan esas diferencias con el tiempo de formación de junta. La velocidad de aumento de la diferencia de rigidez con respecto al tiempo de formación de junta es mayor para los cilindros de edades tempranas que para los cilindros de edades maduras y así mismo ocurre con los esfuerzos de cortante como se muestra en la Figura 10.

Adicionalmente se realiza un análisis de la invariante de esfuerzos de Von Mises con respecto a la inclinación de un corte que se hace sobre una probeta con junta fría. Los modelos de los cilindros pueden cortarse en diferentes ángulos y sobre las superficies resultantes se encuentra la invariante de esfuerzos de Von Mises sobre las líneas dispuestas a lo largo del plano generado como se muestra en la Figura 13. Los resultados de esfuerzos promedio de Von Mises sobre estas líneas fueron los siguientes:

* $\sigma_{Von\ Mises}$ en un plano de corte inclinado $35^\circ = 26.95\text{ MPa}$

* $\sigma_{Von\ Mises}$ en un plano de corte inclinado $45^\circ = 27.05\text{ Mpa}$

* $\sigma_{Von\ Mises}$ en un plano de corte inclinado $55^\circ = 26.95\text{ MPa}$

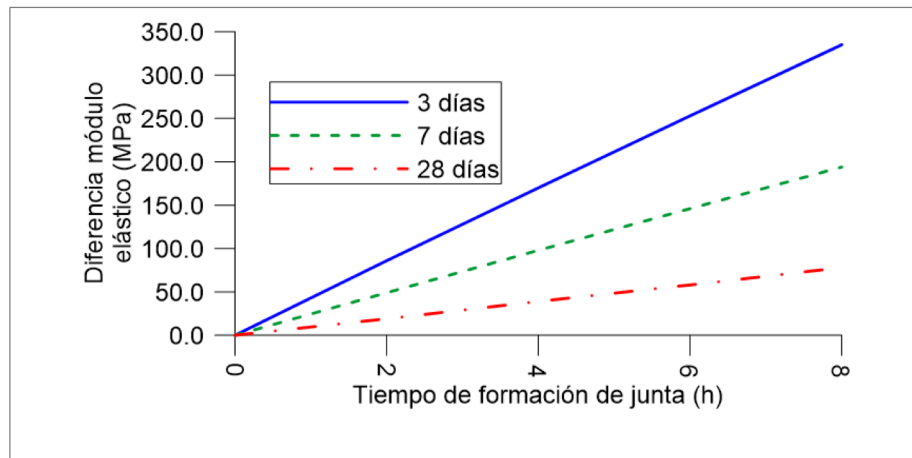


Figura 12. Evolución de diferencia de módulo elástico de volúmenes de concreto de modelos de cilindro con junta fría

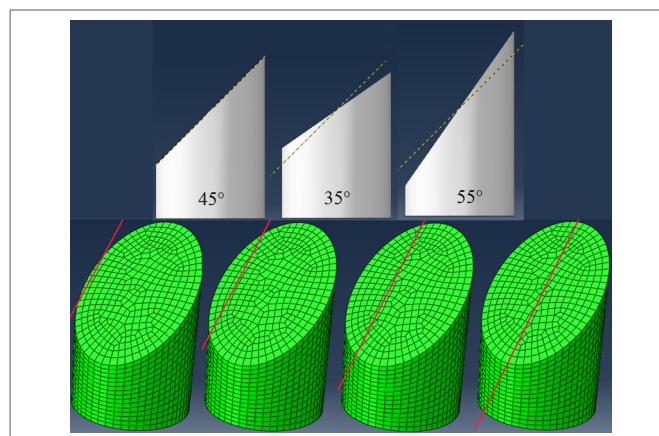


Figura 13. Líneas sobre planos con diferentes inclinaciones sobre las que se hallan los esfuerzos de Von Mises en un cilindro con junta fría

Los mayores esfuerzos de Von Mises se presentan en un plano que corta al cilindro con una inclinación de 45° con respecto a la horizontal, lo que traduce que en esa superficie se presentan los mayores esfuerzos desviadores que son lo que ocasionan el fallo del material. El plano donde se presentan los mayores esfuerzos desviadores coincide con el plano de la junta fría diagonal de los experimentos, lo que refuerza la explicación dada a la mayor pérdida de resistencias en probetas con junta diagonal que en probetas con junta horizontal.

A estas circunstancias se suma que la concentración de esfuerzos en un cilindro con junta fría diagonal se da en esta interface y hacia la superficie o fuste de la probeta donde hay más posibilidad de encontrar vacíos por la dificultad en la compactación del concreto en esta zona, situación que posibilita la ruptura del material con esfuerzos de compresión menores a los que se dan en un cilindro sano elaborado con la misma mezcla. En los cilindros con junta fría horizontal las máximas concentraciones de esfuerzo se dan al interior del

cilindro donde hay mejor compactación y colocación de la mezcla cuando está en estado fresco, condición que ayuda a que esta probeta se comporte de manera similar a una que no presenta discontinuidades. Esta condición puede observarse en la Figura 14 donde se presentan las zonas de mayores concentraciones de esfuerzo en cilindros con junta fría diagonal (izq) y horizontal (der) cortando por el plano de la interface de los dos concretos.

Los resultados encontrados no concuerdan con los obtenidos experimentalmente debido a que el modelo constitutivo usado considera que el comportamiento del material es el mismo a tracción o a compresión, aunque el concreto en realidad tiene un comportamiento diferente en ambas direcciones. En este sentido es notable que la simulación del concreto con juntas frías, empleando un modelo viscoelástico para relacionar los esfuerzos y las deformaciones del material, solo muestra resultados congruentes cuando el elemento es sometido a compresión.

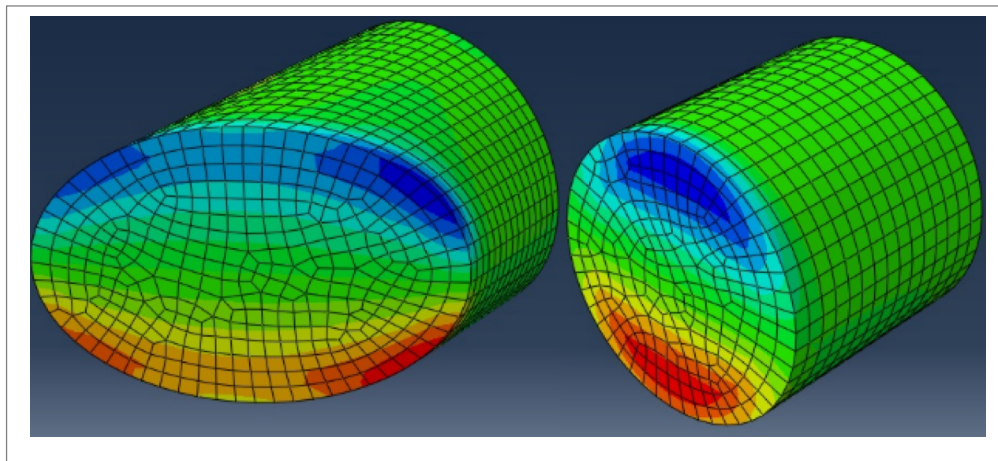


Figura 14. Zonas de mayores concentraciones de esfuerzo sobre la junta fría. Junta diagonal (izq) y junta horizontal (der)

5. Conclusiones

Los ensayos experimentales demostraron que los cilindros con junta fría horizontal sometidos a compresión no presentan pérdida de resistencia en ningún caso. Los cilindros con junta diagonal a compresión y con junta vertical a tracción indirecta si presentaron gran pérdida de resistencia (hasta 30% y 42% respectivamente), la cual fue mayor a con tiempos de formación de junta prolongados y edades tempranas de la probeta.

Los cilindros de concreto con junta fría sometidos a compresión uniaxial presentan concentraciones de esfuerzos y deformaciones en las inmediaciones de la junta. Las magnitudes de los esfuerzos concentrados son más grandes a medida que la diferencia de rigideces entre los volúmenes de concreto que conforman el cilindro sea mayor. Las diferencias más grandes de rigidez se dan en cilindros de edad temprana con tiempos de formación de junta fría prolongados y son menores en cilindros maduros con tiempos de formación de junta más cortos debido a la velocidad decreciente con la que se endurece el concreto. Esto explica porque un cilindro con tiempo de formación de

junta determinado pierde un porcentaje más grande de resistencia a la compresión en una edad temprana que en edad tardía.

La mayor pérdida del porcentaje de resistencia a compresión en un cilindro con junta fría diagonal que en un cilindro con junta horizontal puede explicarse porque las mayores componentes de esfuerzo cortante y esfuerzos de Von Mises se presentan en un ángulo de 45° , el cual coincide con la inclinación de la superficie de la junta diagonal.

El modelo constitutivo propuesto es capaz de simular el comportamiento mecánico de cilindros con junta fría horizontal y diagonal sometidos a compresión.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Pontificia Universidad Javeriana por el soporte económico a través del proyecto de investigación 5267 "Estudio experimental de la inestabilidad".

7. Referencias

- Asamoto S. y Ishida T. (2006)**, Time-dependent constitutive model of solidifying concrete based on thermodynamic state of moisture in fine pores. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4:301–323, <http://dx.doi.org/10.3151/jact.4.301>
- Babu R. y Benipal G. (2005)**, Constitutive modelling of concrete: An overview. *Asian Journal of Civil Engineering*, 6:211–246.
- Celigueta J. (2011)**, Método de los elementos finitos para análisis estructural, p. 65, San Sebastián: Unicopia.
- Harsem T. (2005)**, Diseño de estructuras de concreto armado, p. 50, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Kunieda M. y Srisoros W. (2007)**, Study on constitutive model considering hardening process and loading history for early age concrete. *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, 63(1):127–142, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceje/63/1/63_1_127/article
- Rathi V. y Kolase P. (2013)**, Effect of cold joint on strength of Concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* Vol. 2, No 9.
- Reinhardt H. y Hilsdorf H. (2001)**, *Beton*. En *Betonkalender 2001*. Berlín: Verlag Ernst & Sohn.
- Suter M. y Benipal G. (2006)**, Time-dependent behaviour of reacting concrete 1: Mechanism and theory. *Mechanics of Time Dependent Materials*, 10:51–62, <http://dx.doi.org/10.1007/s11043-006-9008-z>.
- Suter M. y Benipal G. (2007)**, Time dependent behaviour of reacting viscoelastic concrete. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 4(2): 103-120.
- Simulia (2015)**, Abaqus Theory Manual. <http://xn--90ajn.xn--p1ai:2080/v6.12/books/stm/default.htm>.
- Tapkire G. y Kumavat H. (2015)**, Effects of time laps affects the compressive strength of cement. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* Volume-4 Issue-10.
- Tapkire G. y Parihar S. (2014)**, Time laps and different joint affects quality of regular concrete. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. Vol 3 No 3.
- Volz J. y Olson C. (2008)**, Are they pour lines or cold joints, Assessment and repair of concrete structure. En *23rd International Convention & Trade Show* (pp. 26-33). Phoenix: Banville, M.
- Wall J. y Shrive N.(1988)**, Factors affecting bond between new and old concrete. *ACI Materials Journal*, 85, (2), 117-125. https://www.researchgate.net/publication/267211766_Factors_Affecting_Bond_between_New_and_Old_Concrete