Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Comportamiento experimental del concreto simple bajo flujo plástico a corto plazo en compresión uniaxial y su relación con el cambio de rigidez.

B. T. Terán-Torres[1], C. A. Juárez-Alvarado[1], J. M. Mendoza-Rangel[1], I. Flores-Vivian[1], D. Cavazos-de Lira[1], R. Hermosillo-Mendoza[1], M. D. Bojórquez-Calles[1], L. G. López-Yépez[1]*
*Autor de Contacto: llopezy@uanl.edu.mx
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.836

Recibido: 05/06/2025 | Correcciones recibidas: 07/08/2025 | Aceptado: 13/08/2025 | Publicado: 01/09/2025

RESUMEN

En esta investigación se ensayaron especímenes bajo carga sostenida a compresión axial para obtener el comportamiento por flujo plástico a corto plazo, esto es, duración de una hora. Los especímenes fueron sometidos a diversas cargas (20%, 50% y 80% de su capacidad) a diversas edades (7, 28 y 90 días), registrándose la deformación longitudinal y transversal en el tiempo. Posteriormente, los especímenes fueron ensayados a la falla, obteniéndose la gráfica esfuerzo-deformación, la capacidad a compresión y módulo de elasticidad. Se encontró que los especímenes sometidos al 20%, la capacidad y el módulo de elasticidad se incrementan ligeramente, mientras que en especímenes sometidos al 50% y 80%, su capacidad y módulo de elasticidad decrecen, para todas las edades.

Palabras clave: flujo plástico no lineal; concreto simple; cambio de rigidez; carga sostenida.

Citar como: Terán-Torres, B. T., Juárez-Alvarado, C. A., Mendoza-Rangel, J. M., Flores-Vivian, I., Cavazos-de Lira, D., Hermosillo-Mendoza, R., Bojórquez-Calles, M. D., López-Yépez, L. G. (2025), "*Comportamiento experimental del concreto simple bajo flujo plástico a corto plazo en compresión uniaxial y su relación con el cambio de rigidez.*", Revista ALCONPAT, 15 (3), pp. 315 – 334, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.836

[1] Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Contribución de cada autor
En este trabajo los autores C. A. Juárez-Alvarado y B. T. Terán-Torres contribuyeron con la idea original y la planificación de la experimentación en un 50% cada uno. L. G. López-Yépez, J. M. Mendoza-Rangel, I. Flores-Vivian y R. Hermosillo-Mendoza contribuyeron en la redacción del trabajo, la configuración de tablas y gráficas, así como en la discusión de los resultados en un 25% cada uno. M. D. Bojórquez-Calles y D. Cavazos-de Lira desarrollaron la experimentación y recolección de datos en un 50% cada uno.

Licencia Creative Commons
Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación
Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2026.

© 2025 ALCONPAT Internacional

Experimental behavior of plain concrete under short-term creep in uniaxial compression and its relation to stiffness change.

ABSTRACT

In this study, specimens were tested under sustained axial compression loads to obtain their short-term creep behavior, i.e., over a period of one hour. The specimens were subjected to various loads (20%, 50%, and 80% of their capacity) at various ages (7, 28, and 90 days), recording the longitudinal and transverse deformation over time. Subsequently, the specimens were tested to failure, obtaining the stress-strain curve, compressive strength, and modulus of elasticity. It was found that the specimens subjected to 20% load showed a slight increase in capacity and modulus of elasticity, while those subjected to 50% and 80% loads showed a decrease in capacity and modulus of elasticity for all ages.

Keywords: nonlinear creep; plain concrete; stiffness change; sustained load.

Comportamento experimental do concreto simples sob fluência de curto prazo em compressão uniaxial e sua relação com a mudança de rigidez.

RESUMO

Nesta investigação, foram testadas amostras sob carga mantida de compressão axial para obter o comportamento por fluxo plástico a curto prazo, ou seja, com duração de uma hora. As amostras foram submetidas a diversas cargas (20%, 50% e 80% da sua capacidade) em diversas idades (7, 28 e 90 dias), registrando-se a deformação longitudinal e transversal ao longo do tempo. Posteriormente, as amostras foram testadas até a falha, obtendo-se o gráfico tensão-deformação, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Verificou-se que nas amostras submetidas a 20%, a resistência e o módulo de elasticidade aumentam ligeiramente, enquanto nas amostras submetidas a 50% e 80%, a capacidade e o módulo de elasticidade diminuem, para todas as idades.

Palavras-chave: luxo de plástico não linear; concreto simples; mudança de rigidez; carga sustentada.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el concreto representa un material fundamental en la industria de la construcción, gracias a su facilidad de elaboración, economía y capacidad de adaptación a múltiples aplicaciones. Por ello, se ha empleado ampliamente en la edificación de diversas estructuras, incluyendo edificios, puentes, presas y otras obras civiles. No obstante, su naturaleza compuesta y su comportamiento cuasi-frágil complican la predicción precisa de su respuesta mecánica frente a distintas solicitaciones.

Si centramos nuestra atención en las estructuras listadas arriba, todas ellas se ven sometidas a solicitaciones similares, es decir ante cargas cíclicas y cargas sostenidas. Por ejemplo, para el caso de edificios, las cargas sostenidas son producto de las cargas muertas, mientras que las cargas cíclicas pueden ser producto de fuerzas accidentales como viento y sismo o incluso por la variabilidad de la carga viva, aunque en una menor proporción. Particularmente, en el caso de los sismos, estas cargas pueden generan ciclos con alto rango de esfuerzos (fatiga de alto ciclaje) (Zhongs and Deierlein, 2019). Por otro lado, los puentes se ven sometidos a cargas sostenidas producto de la carga muerta, mientras que la carga viva genera ciclos de esfuerzos (Zhou and Chen., 2024). Finalmente, para el caso de presas, las cargas sostenidas son producto del peso propio y de la presión hidrostática, mientras que las cargas cíclicas son producto del oleaje productos de sismo o viento (Ouzandja et.al., 2023). Por lo tanto, para analizar éstas y otras estructuras es posible plantear modelos constitutivos que puedan predecir los efectos de las cargas sostenidas y cíclicas simultáneamente. Desafortunadamente, la mayoría de los modelos constitutivos en la actualidad solo cuantifican el comportamiento desacoplado de cargas cíclicas y sostenidas (Terán-Torres et.al., 2024). Lo anterior puede ser una desventaja, ya que puede generar errores a la hora de estimar la vida remanente de una estructura existente, o bien, causar errores de diseño en su etapa inicial.

En el caso particular de los puentes, investigaciones previas (Bazant et.al., 2010; Bazant et.al., 2011) han demostrado que los modelos existentes que consideran únicamente la acción de cargas sostenidas (flujo plástico) tienden a subestimar las deflexiones a largo plazo, en especial en estructuras con grandes claros. Esta discrepancia se ha relacionado con la interacción entre cargas sostenidas y repetidas, fenómeno identificado como fluencia cíclica. Para abordar esta problemática, Bazant y Hubler (2014) propusieron una teoría de flujo plástico cíclico fundamentada en los principios de la mecánica de fractura elástica lineal. Los resultados obtenidos a partir de esta formulación revelaron que dicho efecto combinado influye negativamente en la deflexión a largo plazo de puentes con claros intermedios, comprendidos entre los 40 y los 80 metros. No obstante, esta teoría asume que el concreto se comporta como un material elástico lineal y no se basa en un enfoque termodinámico constitutivo riguroso, lo cual podría generar inconsistencias físicas durante la etapa de análisis estructural. En consecuencia, se pone de manifiesto la necesidad de desarrollar modelos constitutivos más avanzados y representativos para mejorar la predicción de estos efectos.

Por tal motivo, en una investigación previa (Terán-Torres et.al., 2024), se desarrolló un modelo constitutivo para predecir el flujo plástico cíclico, basado en la teoría termodinámica constitutiva, la mecánica del daño continuo (Murakami and Kamiya, 1997) y la teoría de solidificación para materiales con envejecimiento (Bazant and Prasannan, 1989; Bazant and Heut, 1999), la cual cuantifica el cambio de las propiedades mecánicas con la edad y considera por separado los efectos del flujo plástico a corto y largo plazo, al separar la deformación en dos términos, uno viscoelástico y otro como un fluido viscoso, respectivamente. El modelo teórico, mostró potencial durante su aplicación teórica, ya que se basa en conceptos fundamentales de la física. Asimismo, la teoría del daño continuo permite caracterizar el agrietamiento mucho más apegado a la realidad del concreto; y con la factibilidad de ser implementado bajo aplicaciones de cargas cíclicas. Además, al ser basado en una teoría matemática sólida, como son las integrales de Volterra, tiene la ventaja de ser implementado numéricamente con facilidad (Linz, 1985). Sin embargo, para definir los parámetros

de los modelos constitutivos se requieren pruebas en el concreto simple, bajo diversas condiciones de carga. Específicamente para el modelo constitutivo considerado (Terán-Torres et.al., 2024), para el flujo plástico a corto plazo, se requieren pruebas de tensión, compresión y cortante puro bajo carga sostenida a corto plazo.

Asimismo, para el flujo a largo plazo se requieren pruebas similares, pero a largo plazo. Finalmente, para los parámetros asociados a la parte del flujo plástico cíclico se requieren ensayes acoplados.

En estudios previos, ante cargas sostenidas en compresión, se encontró que la deformación por flujo plástico se incrementa directamente con un incremento en el nivel de esfuerzo aplicado y que el uso de aditivos reductores de agua no tuvo un efecto significativo en las deformaciones (Collins, 1989; Neville, 2011). Se encontró una marcada aceleración en el micro agrietamiento, cuando el concreto se somete a esfuerzos mayores al 50% f'c (Loo, 1992; Tang et.al., 2020). Se ha encontrado que el efecto de la humedad relativa del ambiente en la mezcla de concreto en las deformaciones por flujo plástico y contracción es insignificante. Sin embargo, la influencia de la humedad relativa en la contracción por secado sí es definitiva (Vandewalle, 2000). Asimismo, se encontró que los especímenes que has sido secados por completo, presentan un mayor flujo plástico que los especímenes de referencia saturados (Tamtsia et.al., 2000). Mazzotti y Savoia (2001, 2002) probaron que, a niveles medios de esfuerzo, el esfuerzo necesario para que se genere la deformación por flujo plástico es menor que el límite predicho. Asimismo, demostraron que la relación Poisson en flujo plástico depende del nivel de esfuerzo. Rossi et.al. (2012) demostraron que la deformación de flujo plástico es proporcional al número total de microgrietas creadas en el material. Así como, a mayor nivel de carga, mayor será la densidad de microgrietas creadas. Esta creación de microgrietas, durante la carga estática constituye el origen del flujo plástico. Mei et.al. (2017) encontraron que cuando la edad de carga o duración de la carga se mantiene constante, su aplicación reducirá la proporción de flujo plástico recuperable. Este efecto en la resistencia del concreto se vuelve mayor con el incremento de la edad de carga y se reduce gradualmente con el incremento de la duración de la carga. Se ha encontrado que el flujo plástico del concreto no solo depende de cargas constantes o sostenidas. La deformación durante el proceso de carga también contiene una componente de deformación dependiente del tiempo, que no puede ser tratada como una deformación instantánea o inicial y que la edad de carga, la duración de la carga y la resistencia del concreto a la edad de la carga no tienen una influencia obvia en el coeficiente de recuperación inicial. Además, el coeficiente de recuperación inicial disminuye cuando se incrementa la relación esfuerzo-resistencia al tiempo de la carga (Su et.al., 2017; Chen et.al., 2019).

Según la norma ASTM C512 (2002), para los ensayos de flujo plástico, las edades recomendadas son 2, 7, 28 y 90 días. Del mismo modo, en otros estudios, Iravani y MacGregor (1998) y Zhaozia (1994) realizaron estudios a los 28 días; Mazzotti y Savoia (2002), por su parte, realizaron ensayos a los 7, 28 y 60 días; Anker et al. (1998) realizaron ensayos a las edades de 1, 3, 7, 28 y 90 días, y a 1 y 3 años. Por último, Pan et al. (2022) consideraron edades de 7, 28, 90 y 360 días.

Del mismo modo, se recomienda realizar ensayos de flujo plastico a diferentes niveles de esfuerzo (es decir, bajo, medio y alto). El nivel bajo de esfuerzo, limitado a esfuerzos inferiores al 40 % de la resistencia a la compresión (Mazzotti y Savoia, 2002), genera deformaciones que no causan daños significativos (agrietamiento). A niveles de esfuerzo medios (es decir, el 50 % de la capacidad), el número de grietas aumenta, lo que hace que la deformación pierda su proporcionalidad. Pan et al. (2022) realizaron ensayos a varios niveles de esfuerzo, incluidos los de nivel medio. Por último, para los niveles de esfuerzo elevados, Zhaozia (1994) utilizó esfuerzo del 83, 85, 90 y 95 %, y Shah y Chandra (1970) utilizaron esfuerzos de alrededor del 60, 70, 80 y 90 % de la capacidad.

La presente investigación se centra en la primera etapa de ensayos en especímenes cilíndricos bajo carga sostenida, en compresión uniaxial, para obtener el comportamiento del material bajo flujo plástico a corto plazo, es decir, duración de una hora. Basado en lo anterior, los especímenes cilíndricos fueron sometidos a diversas cargas (20%, 50% y 80% de su capacidad última) a diversas

edades (7, 28 y 90 días), con la finalidad de obtener la relación deformación vs tiempo para la deformación longitudinal y transversal. Pasado el intervalo de 1 hora, los cilindros fueron ensayados a la falla, con la finalidad de obtener la gráfica esfuerzo-deformación, su capacidad a compresión y su respectivo módulo de elasticidad. La investigación se enfoca en los ensayos necesarios para determinar los parámetros experimentales para el modelo constitutivo mencionado para flujo plástico asociados a la deformación viscoelástica-viscoplástica y de daño a corto plazo, es decir, las funciones de relajación del material para diversos niveles de esfuerzos y edades.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Se utilizó cemento Portland Tipo CPC 30R, agregado grueso con tamaño máximo de 19 mm y arena N4 de acuerdo con la especificación ASTM C33 (2018), los agregados son calizos típicos de la región de Monterrey con una densidad relativa de 2.59 g/cm3 y 2.71 g/cm3 y un porcentaje de absorción de 0.72 y 1.82 para agregados gruesos y finos, respectivamente. El proporcionamiento de la mezcla de concreto se realizó mediante el ACI-211 (2022), definiendo una resistencia objetivo de f´c = 25 MPa, resistencia típicamente utilizada para estructuras convencionales en la zona de Monterrey, N.L. La dosificación por peso seco de la mezcla utilizada para las pruebas de flujo plástico por metro cubico estuvo compuesta de 302 kg de cemento, 227 kg de agua, 945 kg de agregado grueso y 820 kg de agregado fino.

2.2 Fabricación y ensaye de especímenes

Se fabricaron 36 cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura para las pruebas de compresión, cumpliendo con las normas ASTM C192 (2024), ASTM C143 (2020), ASTM C39 (2021), y ASTM C617 (2009). De los cuales, 9 especímenes fueron ensayados a compresión a edades de 7, 28 y 90 días, respectivamente, como especímenes de control para determinar la resistencia a compresión a dichas edades. Los 27 restantes fueron ensayados a flujo plástico por compresión sostenida, 9 especímenes fueron ensayados a 7 días con un esfuerzo sostenido de 20%, 50% y 80% (esto es, 3 especímenes para cada nivel de esfuerzo), 9 especímenes fueron ensayados a una edad de 28 días y 9 especímenes a 90 días, bajo los mismos niveles de esfuerzo. En la Figura 1 se presentan los especímenes fabricados.

Figura 1. Fabricación y cabeceo de cilindros 150 mm de diámetro x 300 mm de altura.

El esfuerzo sostenido fue transferido a los especímenes por medio de un marco de carga y un gato hidráulico de operación manual marca Enerpac con capacidad de 100 toneladas. La carga de compresión para cada espécimen fue sostenida por 1 hora (Mazzotti and Savoia, 2002), la cual se mantuvo constante mediante la operación del gato hidraulico durante toda la prueba, cuidando que la variacion no excediera los límites establecidos en ASTM C512 (2002) y en (Iravani and

MacGregor, 1998), por tratarse de un mecanismo manual. Las deformaciones longitudinales y transversales fueron medidas por medio de 4 transductores diferenciales de variación lineal (LVDT) de 100 mm de carrera basados en el puente de Wheatstone (2 LVDT de la marca Novotechnik modelo TRS para la deformación longitudinal y 2 LVDT de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo modelo CDP-10 para la deformación transversal), cabe resaltar que, previo a la prueba, se realizó una comparativa entre galgas extensométricas y LVDT's, dando estos últimos mejores resultados en las mediciones. Se utilizó una celda de carga de la marca PT modelo HCC-180 con una capacidad de 180 toneladas para el registro de la carga. Los datos de deformación y carga fueron recolectados mediante el uso de un adquisidor de datos marca Nacional Instruments modelo PXIe-1065. La Figura 2 muestra la configuración de la instrumentación para los cilindros a compresión durante los ensayes de flujo plástico.

Después de ensayados los especímenes a compresión sostenida para la determinación del flujo plástico a corto plazo (esto es, 1 hora), los especímenes fueron ensayados inmediatamente a la falla, por medio de una maquina universal marca Instron, modelo 600DX con una capacidad de 60 toneladas, donde las deformaciones fueron medidas mediante un par de LVDTs. Lo anterior con la finalidad de medir la degradación de la rigidez de las muestras, es decir, mediante el cambio en el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión. El módulo de elasticidad fue calculado conforme a la norma ASTM C469 (2014).

Figura 2. Configuración de la instrumentación para los ensayos de flujo plástico a corto plazo por compresión sostenida.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados experimentales bajo flujo plástico por compresión sostenida.

Basado en lo descrito en la metodología experimental, se obtuvieron los resultados para las diferentes edades y nivel de esfuerzo considerados. Primeramente, en la Figura 3 se presentan los porcentajes de esfuerzo promedio aplicados a los especímenes con diversas edades. Asimismo, para la edad de 7 días, bajo niveles de esfuerzo del 20% de su capacidad a compresión, se obtuvo una deformación longitudinal promedio de $1.2x10^{-4}$, deformación obtenida hasta alcanzar el nivel de esfuerzo solicitado. Mientras que, al cabo de una hora, la deformación longitudinal registró una medida de $1.42x10^{-4}$. Similarmente, la deformación transversal promedio fue $3.2x10^{-5}$ y $3.5x10^{-5}$, al alcanzar el nivel de esfuerzo y al transcurrir la hora, respectivamente. De modo similar, para el nivel de esfuerzo de 50% de la capacidad, las deformaciones longitudinales y transversales registradas al iniciar y finalizar la prueba fueron del orden de $2.24x10^{-4}$, $3.84x10^{-4}$, $9.9x10^{-5}$ y $1.09x10^{-4}$, respectivamente.

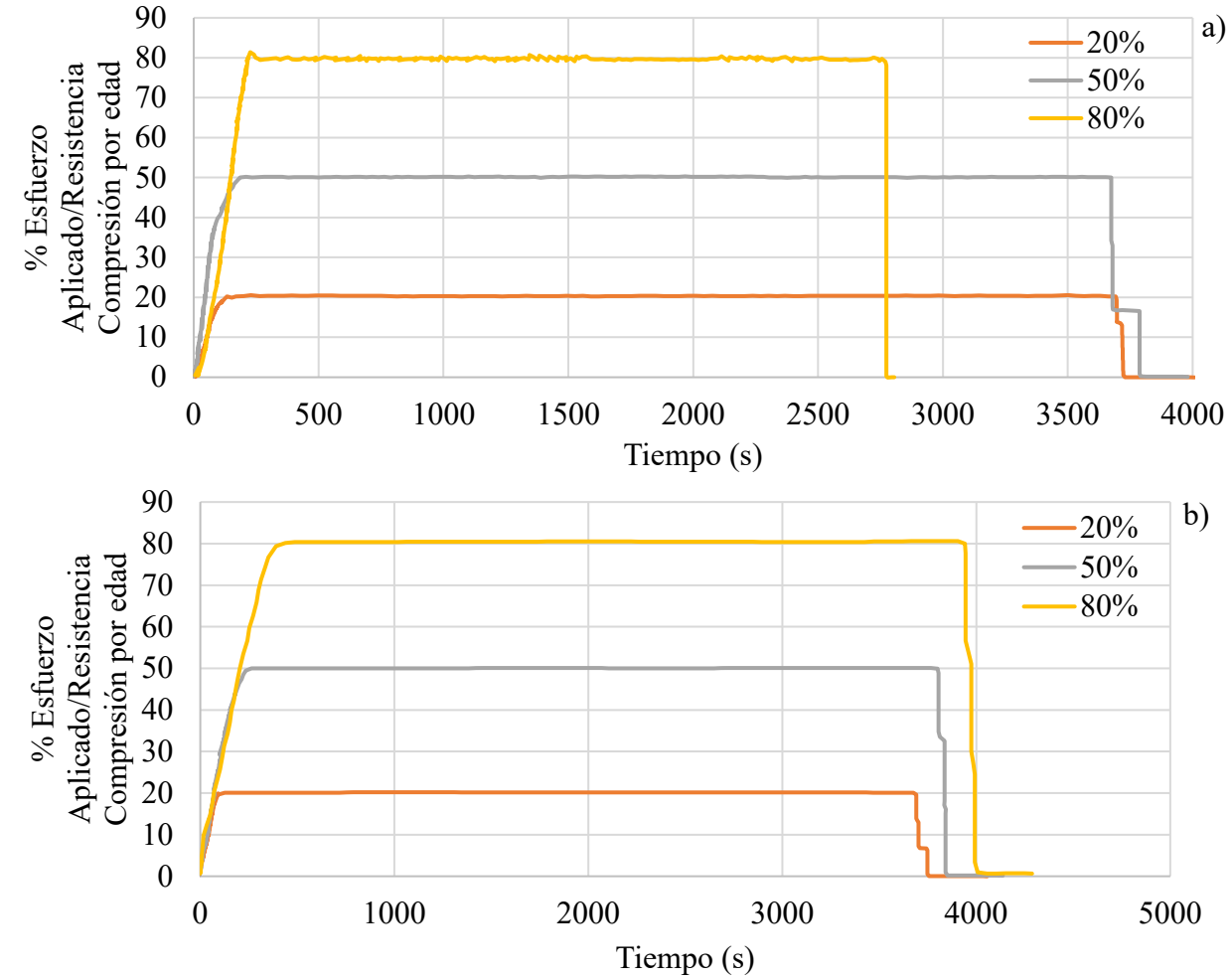

Figura 3. Porcentaje de esfuerzo aplicado contra la resistencia a la compresión para las diversas edades, a) 7 días, b) 28 y 90 días.

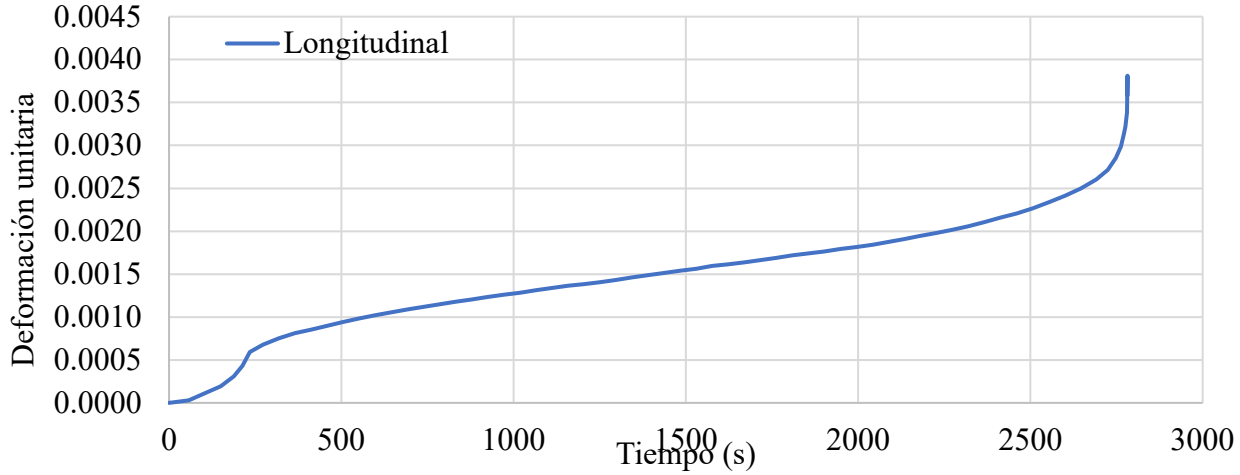

Figura 4. Deformación longitudinal temporal en especímenes con una edad de 7 días, sujetos a una carga sostenida de compresión del 80% de su capacidad.

Para la edad de 7 días y la compresión sostenida del 80% de la capacidad, la Figura 4 presenta la deformación longitudinal promedio. Como se muestra en la figura, los especímenes fallaron bajo flujo plástico terciario durante el tiempo de la prueba, lo cual concuerda con (Shah and Chandra, 1970), en donde se encontró que para edades tempranas los especímenes fallan por flujo plástico

terciario cuando son sometidos a niveles altos de esfuerzo. La gráfica es consistente con aquellas bajo flujo plástico terciario (Shah and Chandra, 1970). En la gráfica se muestra una aceleración en la velocidad de deformación una vez que el espécimen ha alcanzado una deformación de aproximadamente $2x10^{-3}$, esto debido al acumulamiento interno de grietas en el espécimen. La falla del espécimen es alcanzada a aproximadamente 2750 segundos, es decir, a aproximadamente 45 minutos de haber iniciado la prueba. Es importante mencionar que no fue posible determinar la deformación transversal, lo anterior debido a que la instrumentación falló durante la prueba, además de que se presentó alta variabilidad en la deformación transversal. La Figura 5 muestra el comportamiento de las deformaciones longitudinales y transversales para esfuerzos bajos y medios, para la edad de 7 días para los niveles de esfuerzos bajos y medios.

Del mismo modo, para la edad de 28 días, particularmente para el nivel de esfuerzo bajo, se presentaron deformaciones del orden de $8.3x10^{-5}$ y $8.8x10^{-5}$, para la deformación longitudinal tanto al inicio como al final de la prueba; mientras que, transversalmente, las deformaciones medidas fueron del orden de $1.7x10^{-5}$ y $2.0x10^{-5}$, para el inicio y final de la prueba, respectivamente. Para esfuerzos medios, la deformación longitudinal fue del orden de $1.97x10^{-4}$ y $2.33x10^{-4}$, mientras que la transversal del orden de $6.7x10^{-5}$ a $7.5x10^{-5}$, para el inicio y final de la prueba, respectivamente. La Figura 6 muestra el comportamiento de las deformaciones longitudinales y transversales para esfuerzos bajos, medios y altos, para la edad de 28 días.

Por otro lado, la Figura 6a muestra el comportamiento de la deformación longitudinal promedio para una edad de 28 días y niveles de esfuerzos altos. Se muestra que la deformación inicial es del orden de $1.16x10^{-3}$, mientras que al finalizar la prueba se alcanzó una deformación longitudinal del orden de $2.61x10^{-3}$. Asimismo, es posible notar que la velocidad de deformación se incrementa ligeramente al alcanzar una deformación de $2.43x10^{-3}$. Esta tendencia es similar a aquella en la Figura 4, lo cual indica que las probetas pudieron haber alcanzado una etapa inicial del flujo plástico terciario. De igual modo que para la edad de 7 días, la deformación transversal promedio no pudo ser determinada debido una falla en la instrumentación durante la prueba, además de que se presentó alta variabilidad en los datos.

Finalmente, para los especímenes con edades de 90 días, para esfuerzos bajos (20% de capacidad), se encontraron deformaciones longitudinales del rango de $5.2x10^{-5}$ y $5.9x10^{-5}$, para el inicio y el final de prueba; transversalmente, se encontraron deformaciones del orden de $1.3x10^{-5}$ a $1.4x10^{-5}$. Para esfuerzos medios, en otras palabras, 50% de su capacidad, se encontraron deformaciones longitudinales de $1.69x10^{-4}$ y $2.03x10^{-4}$ y transversalmente $5.4x10^{-5}$ a $6.4x10^{-5}$. Para esta edad y para los niveles de esfuerzos del orden de 80% de su capacidad, las deformaciones longitudinales registradas fueron del orden de $7.88x10^{-4}$ a $1.22x10^{-3}$, y transversalmente se encontraron deformaciones con valores entre $5.04x10^{-4}$ a $6.06x10^{-4}$. La Figura 7 muestra las deformaciones longitudinales y transversales temporales para la edad de 90 días y para los 3 niveles de esfuerzo.

3.2 Comparativa de resultados experimentales bajo flujo plástico por compresión sostenida

Para entender mejor el comportamiento de las deformaciones longitudinales y transversales en el tiempo para las diferentes edades y los niveles de esfuerzo se decidió presentar los resultados mediante una comparativa, primeramente, fijando la edad y variando los niveles de esfuerzo y, posteriormente, fijando los niveles de esfuerzo y variando la edad. En las siguientes figuras, ε_i representa la deformación inicial al alcanzar el nivel de esfuerzos deseado, ε_f indica la deformación al final de la prueba, y ε_p representa la deformación residual al descargar la probeta.

La Figura 5a muestra una comparativa de la deformación longitudinal promedio, para la edad de 7 días y los niveles de esfuerzos 20% y 50% de su capacidad a compresión, mientras que la Figura 5b muestra la comparativa para la deformación transversal. Es importante mencionar que la comparativa con los niveles de esfuerzos altos (80% de su capacidad) fue omitida dado que los especímenes fallaron durante la prueba debido al flujo plástico terciario. En la Figura 5a, se observa

que la deformación longitudinal al alcanzar la carga de prueba para el nivel de esfuerzos medio es 1.86 veces mayor aquella registrada para el nivel de 20% de su capacidad; asimismo, la deformación longitudinal al final de la prueba, para el nivel de esfuerzos medio es 2.70 veces mayor que aquella registrada para el nivel bajo, esto indica un incremento del 45.16% debido al incremento en la velocidad de deformación. Además, es visible que la velocidad de deformación es mayor para aquella del nivel medio que para aquella del nivel bajo. Esto se debe a la falta de proporcionalidad (no linealidad) en el flujo plástico cuando se sobrepasa el límite del 40% de la capacidad, esfuerzo para el cual microgrietas en el concreto empiezan a aparecer internamente. Lo anterior se ha reconocido por muchos investigadores en el área del flujo plástico (Pan et.al., 2022). Sin embargo, este fenómeno no se ve reflejado para la deformación transversal, donde el cociente de deformación transversal, en otras palabras, $\varepsilon_{50\%}/\varepsilon_{20\%}$, tanto para el inicio y final de la prueba, es del orden de 3.10, manteniendo la proporcionalidad mencionada. Finalmente, es importante destacar que ambas figuras muestran la deformación permanente, la cual está presente sin importar si se encuentra por debajo del 40% de la magnitud del esfuerzo. Esto se ha observado previamente en otras investigaciones (Mazzotti and Savoia, 2002; Pan et.al., 2022). Es importante destacar que, puesto que se sobrepasó dicho límite para los niveles medios, la deformación permanente debe estar asociada al nivel de agrietamiento del material (Rossi et.al., 2012).

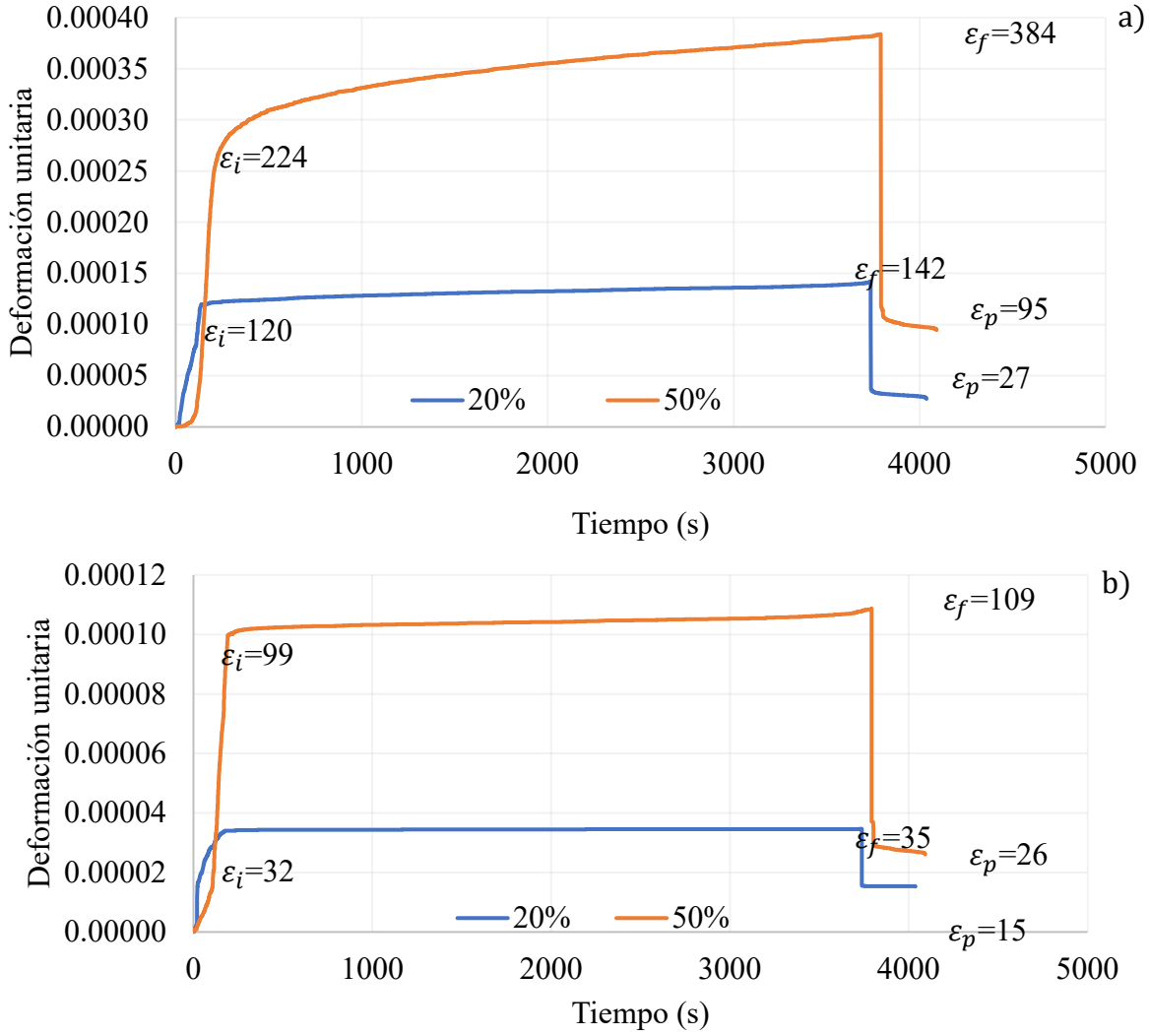

Figura 5. Comparativa entre la deformación temporal para la edad de 7 días y los esfuerzos del 20% y 50% de la capacidad, a) deformación longitudinal, b) deformación transversal.

La Figura 6a muestra la comparativa de las deformaciones longitudinales para los niveles de esfuerzos bajo, medio y alto (20%, 50% y 80%, respectivamente), mientras que la Figura 6b muestra las deformaciones transversales para esfuerzos bajos y medios, para los especímenes con edad de 28 días. En similitud, se encontró que la deformación longitudinal inicial para el nivel medio es 2.37 veces que aquella registrada para el nivel bajo, mientras que la final es 2.65 veces, esto representa un incremento del 11.81%, debido al incremento en la velocidad de deformación que se presenta para esfuerzos superiores al 40% de la capacidad. Es importante notar, que este incremento es inferior en comparación con aquellos especímenes con edades de 7 días. Lo anterior se debe principalmente al endurecimiento que adquirió por el cambio de edad, pues se sabe que conforme el concreto envejece, este se vuelve menos susceptible al flujo plástico (Bazant and Prasannan, 1989). De forma similar, comparamos nivel alto con medio, donde al inicio la deformación para el nivel alto es 5.89 veces mayor y para el final es 11.22 veces mayor, esto representa un 90.5% de diferencia del inicio al final, debido al incremento en la velocidad de deformación.

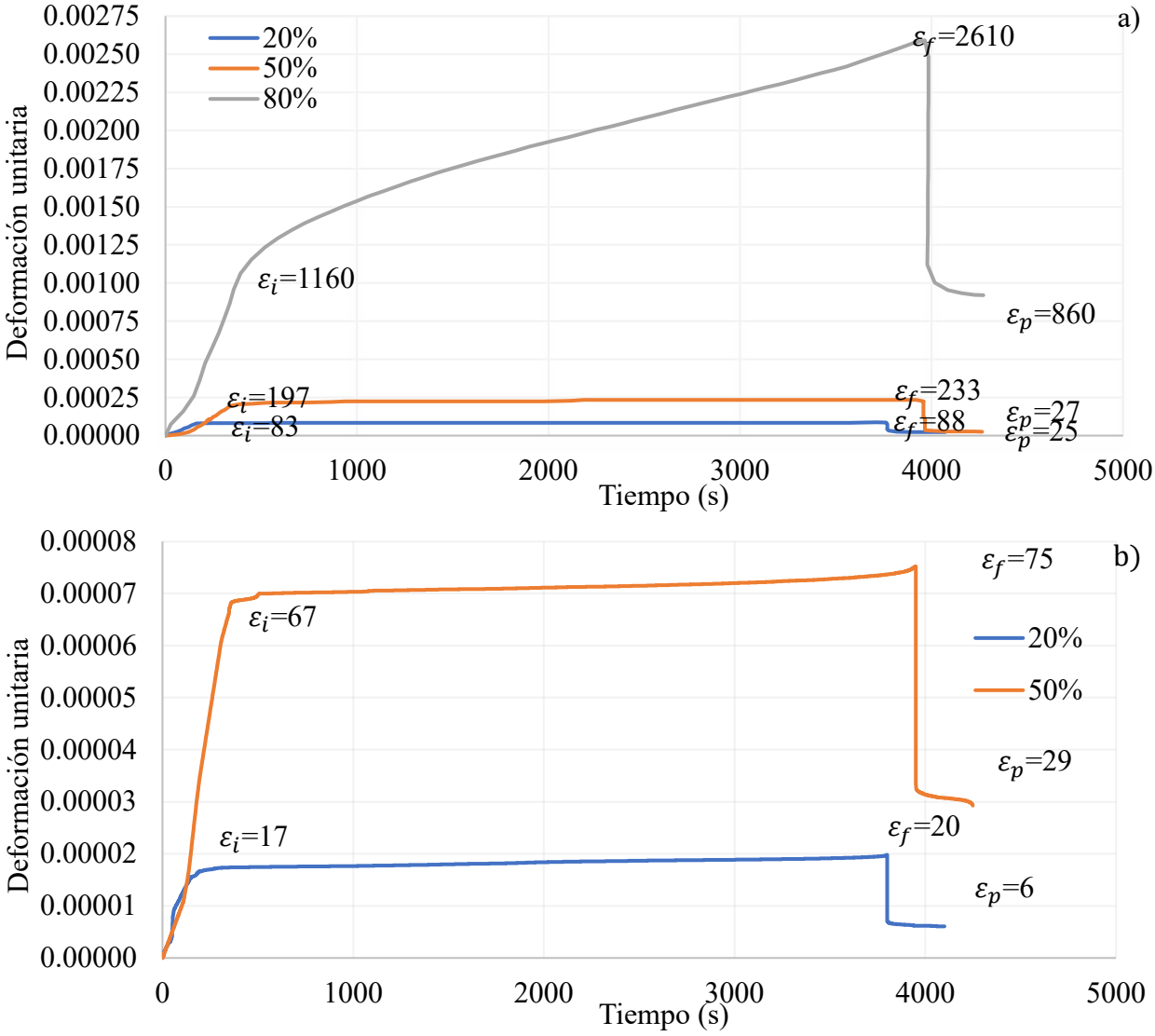

Figura 6. Comparativa entre la deformación temporal para la edad de 28 días y los esfuerzos del 20%, 50% y 80% de la capacidad, a) deformación longitudinal, b) deformación transversal.

La Figura 7 muestra la comparativa de las deformaciones longitudinales y transversales para los especímenes con edad de 90 días, considerando la variación de niveles de esfuerzos sostenidos de compresión, esto es, 20%, 50% y 80% de su capacidad. Para la deformación longitudinales iniciales encontramos que la deformación para el nivel alto es 4.66 veces más grande que aquella de nivel medio y 15.15 veces aquella del nivel bajo, mientras que la de nivel medio a la de nivel bajo es del orden de 3.25 veces. Para la deformación final, encontramos que, para niveles altos, la deformación es 6.01 veces más que aquella de nivel medio, para los esfuerzos altos a los bajos es del orden 20.68 veces, y para los medios a los bajos es del orden de 3.44 veces. Lo anterior indica el cambio entre la deformación inicial a la final es de 28.97% del alto al medio, 36.5% del alto al bajo, y 5.85% del medio al bajo. Es importante denotar que la diferencia entre la velocidad de deformación de 28 días a 90 días, para la relación de medio a alto es de 3.12 veces al final de la prueba (relación de porcentajes, es decir, 90.5/28.97). El análisis anterior puede replicarse para las deformaciones transversales mostrada en la Figura 7b.

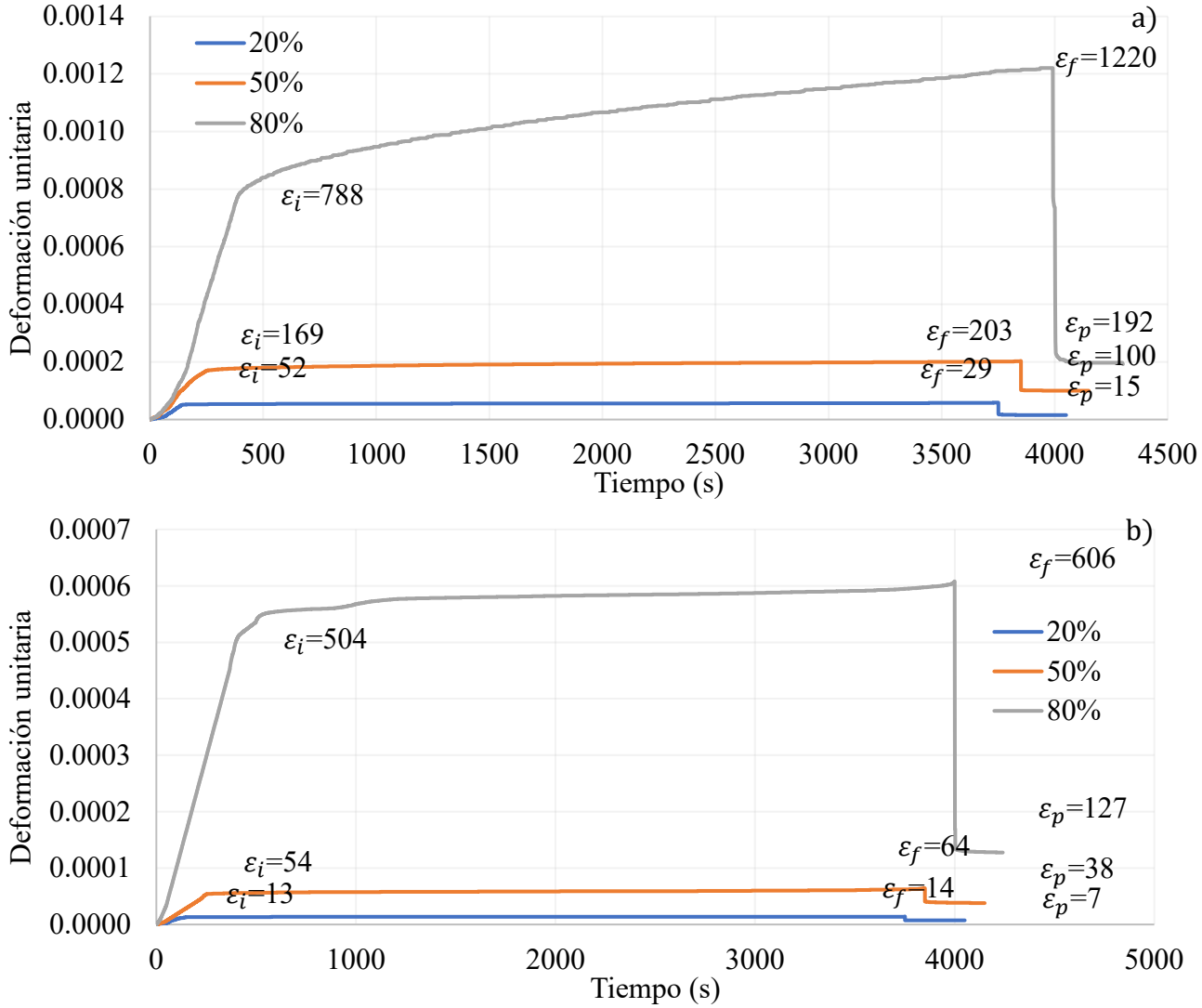

Figura 7. Comparativa entre la deformación temporal para la edad de 90 días y los niveles de esfuerzo del 20%, 50% y 80% de la capacidad, a) deformación longitudinal, b) deformación transversal.

Se comparan ahora las deformaciones para un nivel de esfuerzo fijo, con la variación de la edad, esto con la finalidad de verificar el decremento de susceptibilidad del concreto a flujo plástico

conforme madura con la edad (Bazant and Prasannan, 1989). Primeramente, la Figura 8 presenta el comportamiento de las deformaciones longitudinales y transversales para el nivel de esfuerzo bajo, es decir, 20% de la capacidad, con la variación de la edad. Si obtenemos los cocientes de deformación de menor edad a mayor edad encontramos la diferencia que existen entre ellas. Por ejemplo, el cociente de deformación de edad de 7 días a 28 días, es decir, $^{\varepsilon_{7d}}/_{\varepsilon_{28d}}$, encontramos que para la deformación longitudinal inicial es de 1.45, mientras que el cociente de deformación final es 1.61, indicando un cambio del 11.03% con respecto del final a la inicial. Similarmente, el cociente entre las edades de 7 a 90, encontramos que la deformación inicial a 7 días es 2.31 veces mayor que aquella de 90 días, mientras que para la relación final es de 2.41 veces, es decir, un incremento de 4.33%. Finalmente, la deformación inicial a 28 días es 1.60 veces mayor que aquella de 90 días, mientras que la final es 1.49 veces mayor, mostrando un decremento de 6.88%. Al observar la Figura 8 es evidente que la velocidad de deformación decae conforme la edad aumenta, consistente con lo previamente descrito.

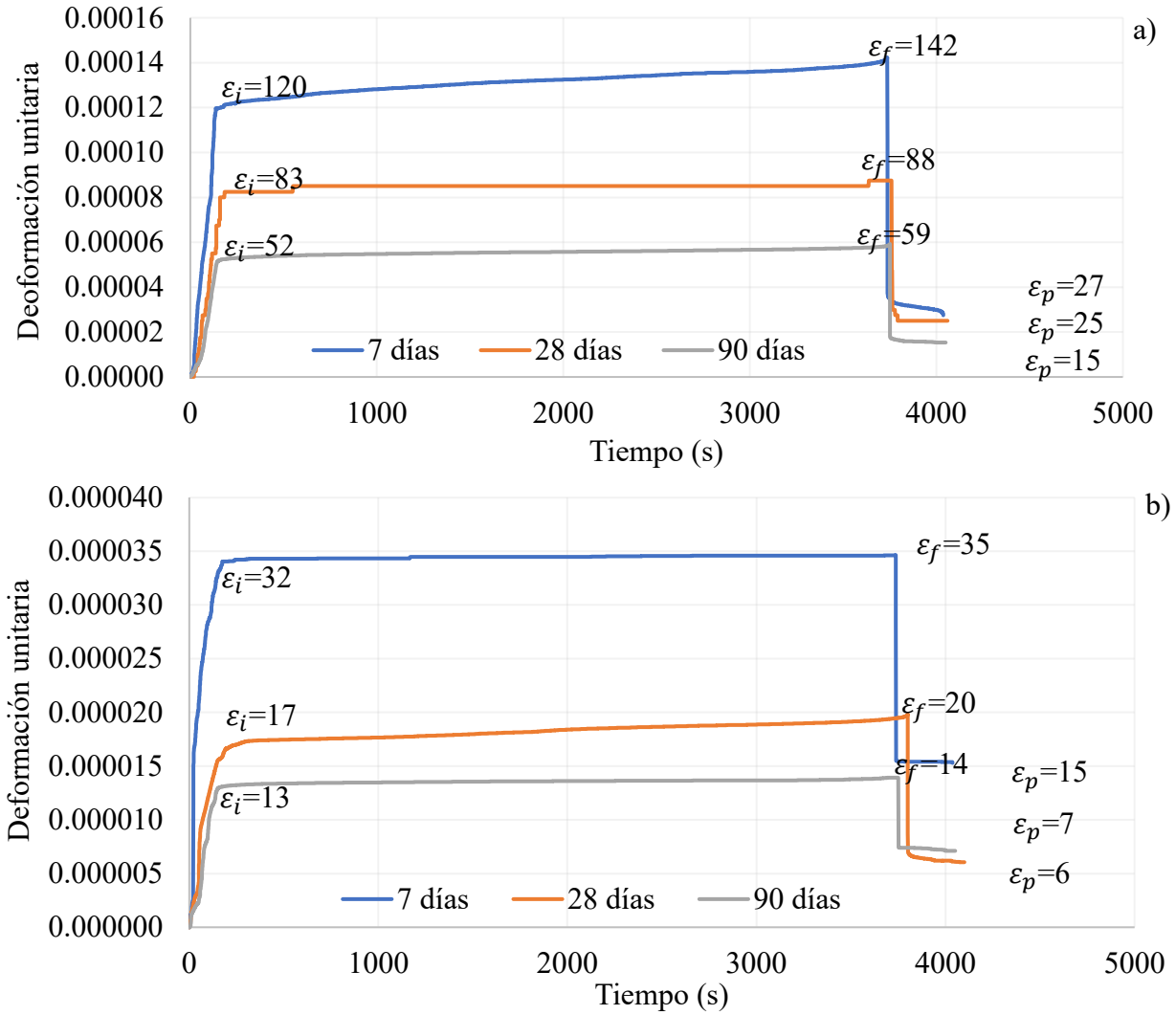

Figura 8. Comparativa entre la deformación temporal para el nivel de esfuerzo bajo (20%), para las edades 7, 28 y 90 días, a) deformación longitudinal, b) deformación transversal.

Asimismo, la Figura 9 muestra la comparativa de las deformaciones temporales longitudinales y temporales para nivel de esfuerzo medio, variando las edades. Se observa que la deformación longitudinal inicial a 7 días es 1.14 veces mayor que aquella presente a 28 días, mientras que para

la deformación final esta es 1.65 veces mayor, indicándose un incremento del 44.74% mayor, debido dentro del rango de flujo plástico no lineal previamente mencionado. Sin embargo, si ahora comparamos las deformaciones para 7 y 90 días, encontramos que la inicial es 1.33 veces mayor, mientras que la final es 1.89 veces, notándose un incremento del 42.11%. Por último, la relaciones de 28 a 90 días, son 1.17 y 1.15 veces mayores, para la inicial y final, respectivamente. Es importante mencionar que la comparativa para los niveles altos de esfuerzos no pudo ser llevada a cabo debido a que los especímenes fallaron durante la prueba de flujo plástico.

Finalmente, la Figura 10 muestra la comparativa para el nivel de esfuerzo alto, con variación de la edad. Primeramente, es fácilmente notable la diferencia en la velocidad de deformación, en donde se muestra que la pendiente de la curva para la de 28 días es notablemente mayor a aquella de 90 días. La relación de deformación de edad menor a mayor, es decir, para este caso $\varepsilon_{28d}/\varepsilon_{90d}$, es de 1.42 al inicio, mientras que al final es de 2.14. Este análisis indica la no linealidad o no proporcionalidad del concreto, pero esta vez bajo el cambio de maduración.

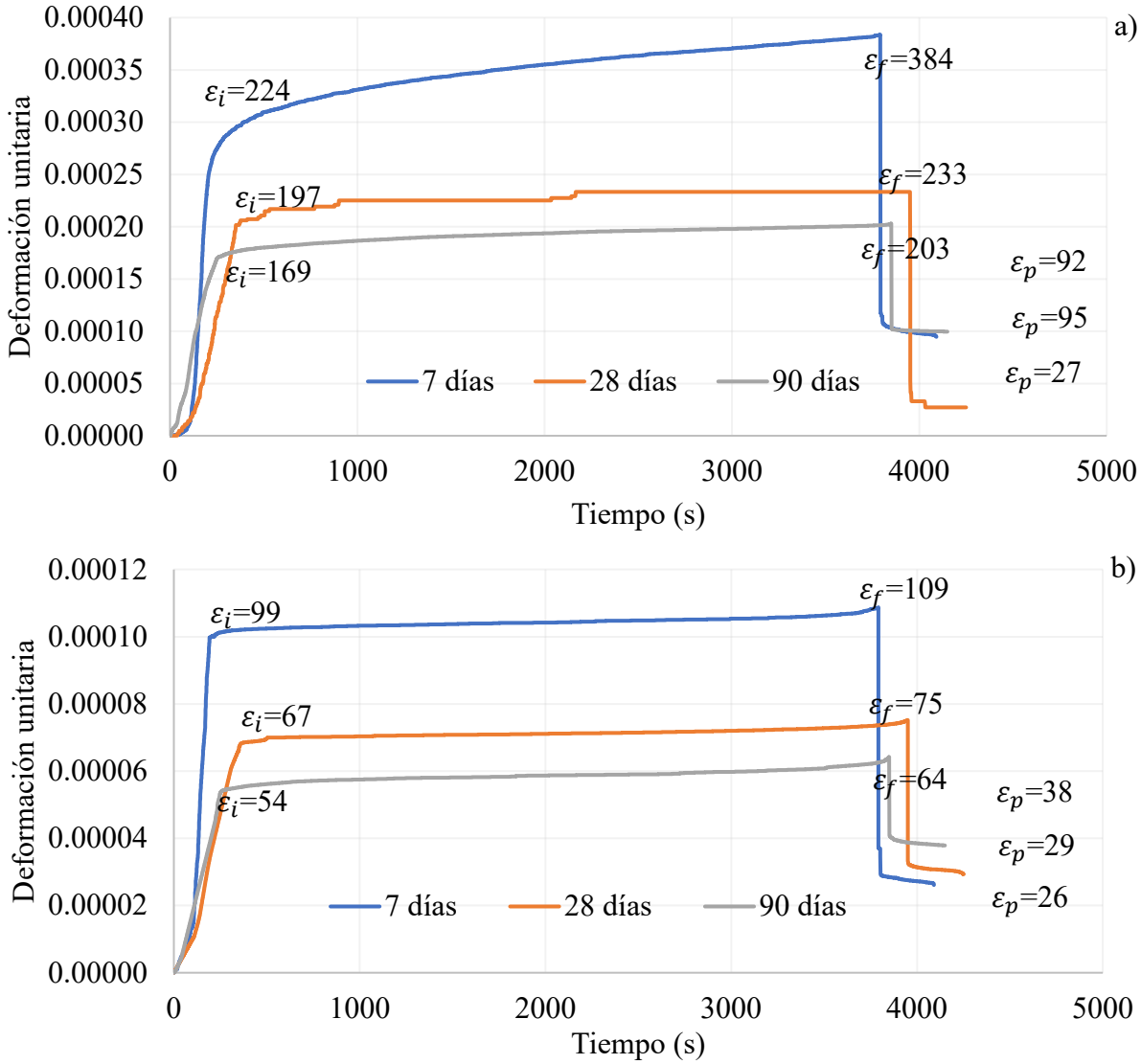

Figura 9. Comparativa entre la deformación temporal para el nivel de esfuerzo medio (50%), para las edades 7, 28 y 90 días, a) deformación longitudinal, b) deformación transversal.

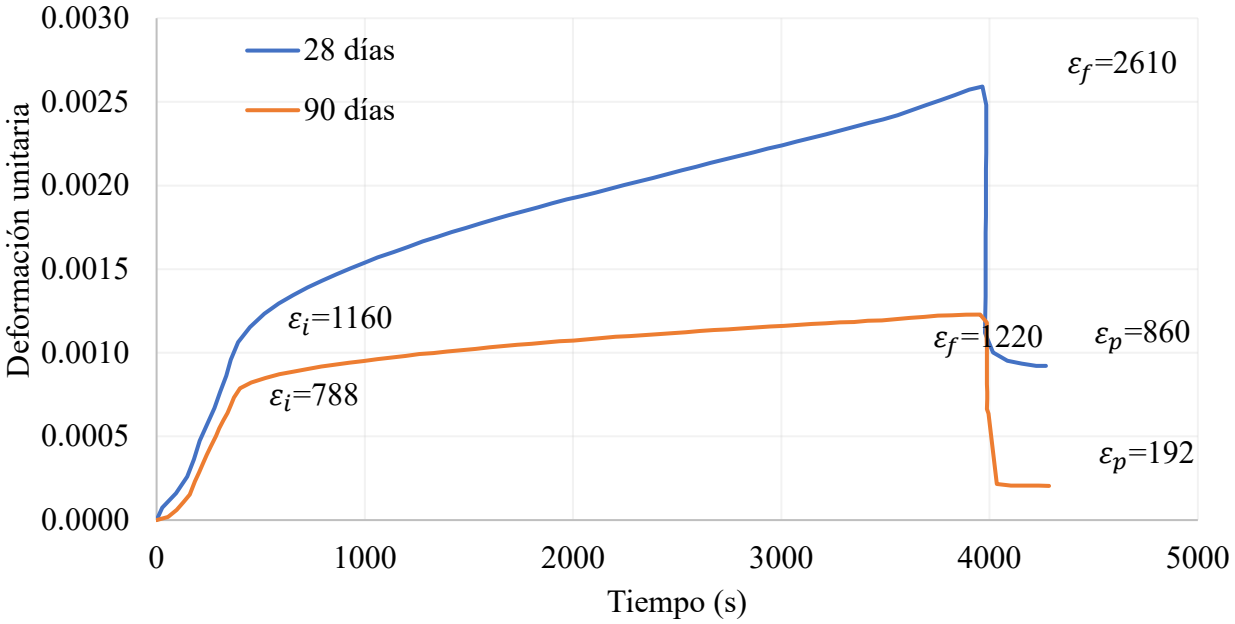

Figura 10. Comparativa entre la deformación longitudinal temporal para el nivel de esfuerzo medio (80%), para las edades 28 y 90 días.

3.3 Variación la capacidad a compresión, el módulo de elasticidad, y la pérdida de rigidez por daño

La Figura 11 provee una comparativa de las gráficas esfuerzo-deformación para las diversas edades con la variación del nivel de esfuerzo sostenido. En todas las figuras el control es representado por la línea azul. Es evidente que, para todos los especímenes cargados a compresión sostenida a niveles de esfuerzo bajo, existe una tendencia a incrementar ligeramente su capacidad a compresión, mientras que, para los especímenes cargados de forma sostenida al 50% y 80% de su capacidad a compresión, existe una pérdida de capacidad asociada al agrietamiento interno sufrido. Aunque menos perceptible, este comportamiento también se ve reflejado en el módulo de elasticidad, donde los especímenes cargados de forma sostenida al 20% de la capacidad exhiben un ligero incremento en el módulo de elasticidad, mientras que, los especímenes bajo carga sostenida a niveles medios y altos, su módulo de elasticidad decae. La Tabla 1 provee los valores de la capacidad y los módulos de elasticidad obtenidos.

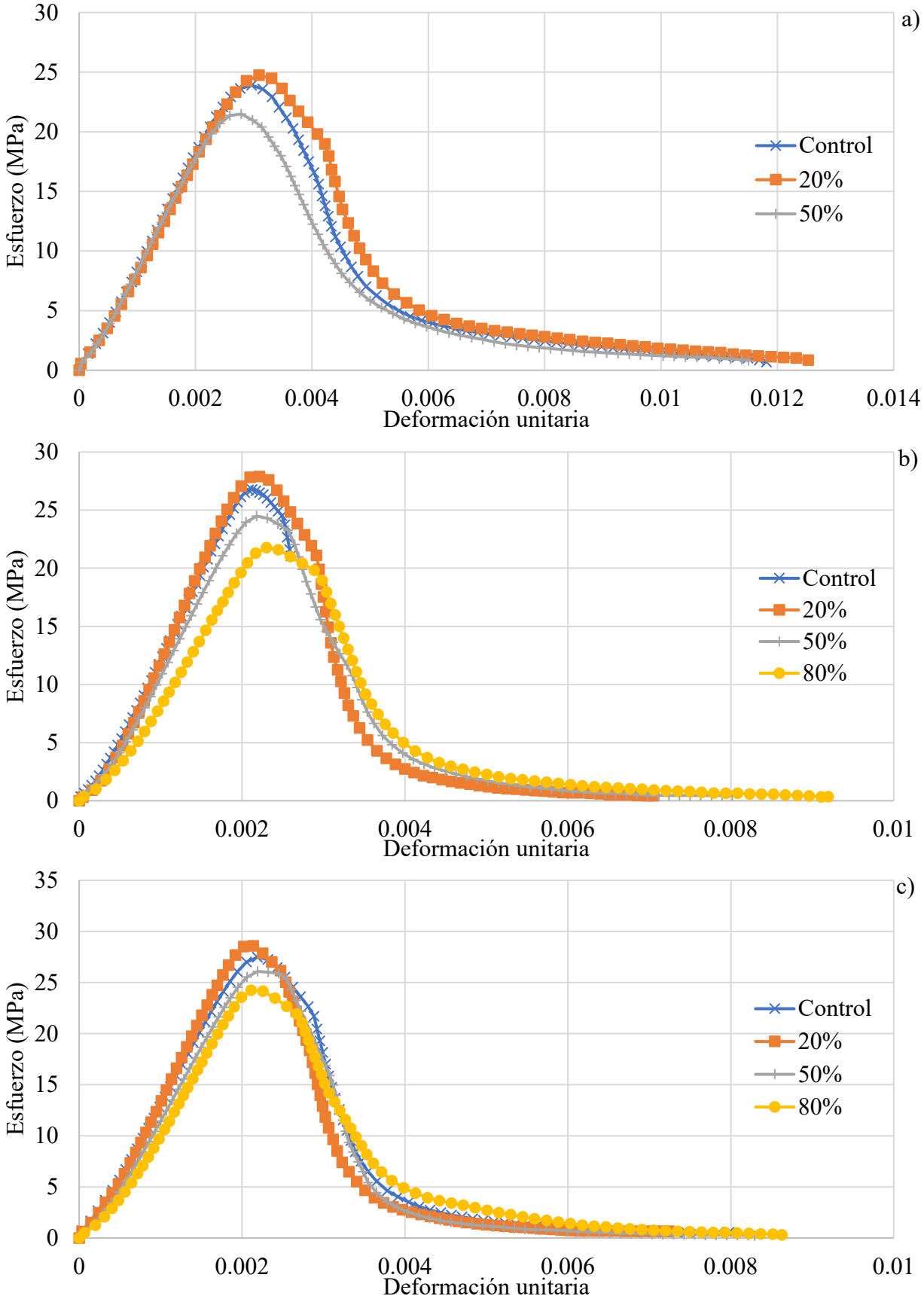

Figura 11. Comparativa de la gráfica esfuerzo-deformación control vs niveles de esfuerzo, a) 7 días, b) 28 días, c) 90 días.

La pérdida (o ganancia) de rigidez puede definirse a partir del daño en el material, entendido como el nivel de agrietamiento presente. Una forma de cuantificar dicho daño es mediante la hipótesis de equivalencia de deformación (Murakami, 2012), expresada en la ecuación (1),

$$D = 1 - \frac{E(D)}{E_0} \quad (1)$$

donde $E(D)$ es el módulo de elasticidad del material evaluado, E_0 es el módulo de elasticidad del espécimen de control, y D representa el daño.
Otra forma de estimar el daño es a partir del cambio en la capacidad resistente previamente descrita, como se muestra en la ecuación (2),

$$D = 1 - \frac{\sigma(D)}{\sigma_0} \quad (2)$$

donde $\sigma(D)$ es la capacidad a compresión del material evaluado, σ_0 corresponde a la capacidad del espécimen de control, y D representa nuevamente el daño. Esta última ecuación puede interpretarse como una variante de la formulación del esfuerzo efectivo (Liang et al., 2025; Murakami, 2012).
La Tabla 1 provee el nivel de daño causado por los diversos niveles de esfuerzo sostenido en los especímenes ensayados a las diversas edades bajo pérdida de capacidad y bajo pérdida de módulo de elasticidad, y sirve como valores en un tiempo dado para las ecuaciones de evolución en (Terán-Torres et al., 2024). Es importante mencionar que el daño mostrado en la Tabla 1 es aquel producto de la deformación inicial y la deformación temporal. El daño producto de la deformación inicial puede ser fácilmente calculado al someter especímenes bajo carga monotónica hasta los niveles de esfuerzos correspondientes, descargar y luego volver a cargar hasta la falla y posteriormente, determinar el módulo de elasticidad y la capacidad de carga con los resultados de la prueba. La diferencia entre el cambio del módulo y de las capacidades reportadas corresponde al daño temporal, para la ecuación (1) y la ecuación (2), respectivamente.

Tabla 1. Porcentaje de daño correspondiente a cada nivel de esfuerzos y edad, asociado a capacidad y módulo de elasticidad.

Edad (días)	Nivel de esfuerzo	Capacidad a compresión (MPa)	% Daño por capacidad	Módulo de elasticidad (GPa)	% Daño por módulo elástico
7*	Control	24.00	-	24.792	-
	Bajo (20%)	24.75	-3.13	26.333	-6.2
	Medio (50%)	21.58	10.08	23.956	3.4
28	Control	26.79	-	26.821	-
	Bajo (20%)	27.91	-4.18	27.158	-1.3
	Medio (50%)	24.49	8.59	23.985	10.6
	Alto (80%)	21.83	18.51	19.224	28.3
90	Control	27.59	-	28.433	-
	Bajo (20%)	28.71	-4.06	29.211	-2.7
	Medio (50%)	26.22	4.97	24.940	12.3
	Alto (80%)	24.27	12.03	22.549	20.7

* Nota: Los valores reportados sobre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad a los 7 días de los especímenes fueron extrapolados en base a la prueba realizada y las estimaciones a los 28 días (Narayanan, 2021).

Es importante mencionar que, para los especímenes cargados al 20% de su capacidad a compresión, existe una ganancia de rigidez y, por lo tanto, el espécimen exhibió una variable de daño negativo.

Este fenómeno es conocido en la mecánica del daño continuo como “curación” y fue introducido en (Abu Al Rub and Darabi, 2012). Lo anterior fue observado en (Shah and Chandra, 1970), donde se consideró que la distancia entre dos partículas decrece, causando un aumento en la fuerza de unión entre ellas. Mientras que, para los casos de esfuerzo medio y alto, el daño es positivo, lo cual concuerda con (Iravani and MacGregor, 1998; Mazzotti and Savoia, 2002). Es importante notar que, el daño relacionado con la capacidad a compresión es inversamente proporcional con la edad, es decir, a mayor edad el daño es menor bajo el mismo nivel de carga sostenida, como se muestra en la Tabla 1. Esto es consistente con aquello observado en la deformación. Sin embargo, lo contrario ocurre con el daño asociado al módulo de elasticidad, donde a mayor edad el daño aparenta incrementarse.

3.4 Relación de Poisson temporal

Finalmente, se analizará la relación de Poisson por flujo plástico. Algunos autores concluyeron que la relación de Poisson depende del nivel de esfuerzo: para esfuerzos bajos y medios, el valor es constante, mientras que para niveles altos de esfuerzo se produce un incremento, este fenómeno está estrictamente relacionado con el crecimiento de macro grietas y precede a la falla del concreto debido al flujo plástico terciario (Mazzotti and Savoia, 2002). En la Figura 12 se puede observar que el efectivamente la relación de Poisson depende del nivel de esfuerzos aplicado. Por ejemplo, para el nivel bajo de esfuerzo, la relación de Poisson tiende a un valor aproximado de 0.25. Mientras que, para niveles medios, esta tiende a 0.30. Sin embargo, es importante resaltar que hay una ligera variación temporal, mayormente en los especímenes de menor edad. Finalmente, para niveles altos, la variación temporal es mucho más notable, mostrando valores de entre 0.65 y 0.50, las cuales son consistentes con lo observado por Mazzotti y Savoia (2002). Estas relaciones sobrepasan el límite teórico para la relación de Poisson para materiales isotrópicos, lo que indica una relación aparente debida al agrietamiento.

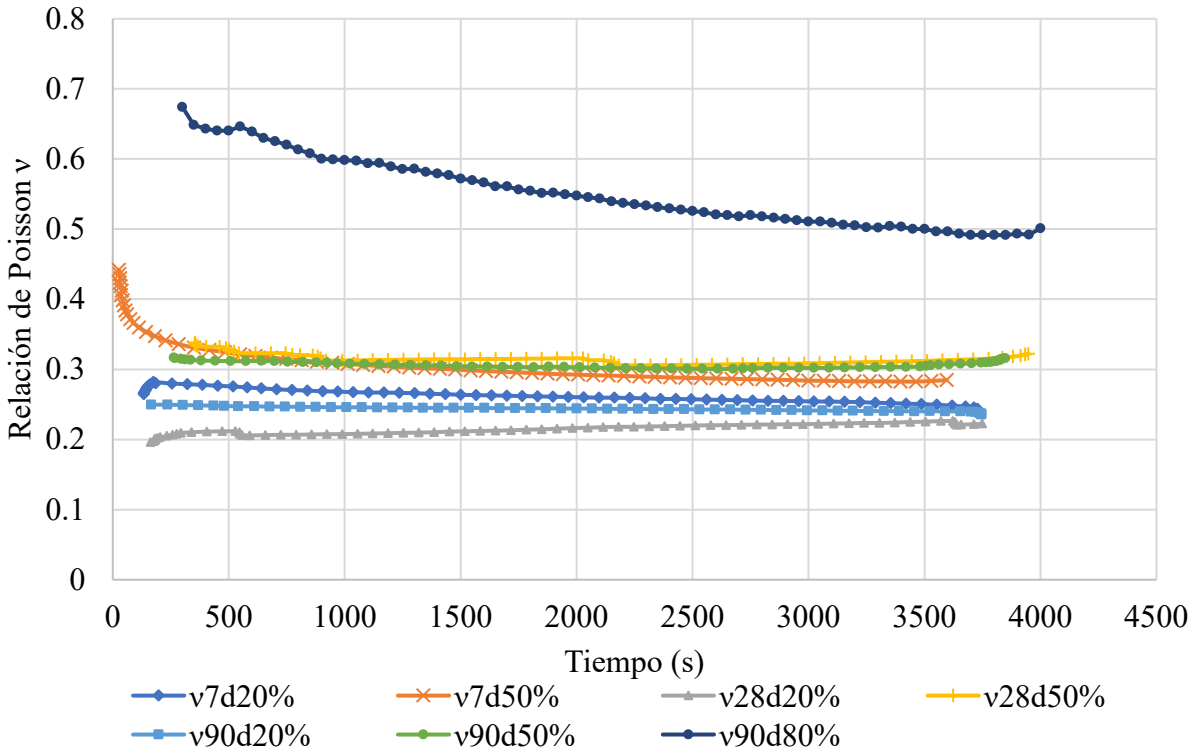

Figura 12. Comparativa de la relación de Poisson para diversas edades y nivel de esfuerzo en la carga sostenida.

4. CONCLUSIONES

En la presente investigación se realizaron pruebas de flujo plástico de corto plazo (aprox. 1 hr) en especímenes de concreto simple con diversas edades, esto es, 7, 28 y 90 días, los cuales fueron sometidos a carga de compresión sostenida bajo diversos niveles de esfuerzos, es decir, 20%, 50% y 80% de su capacidad a compresión. De los ensayes se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se obtuvieron las deformaciones longitudinales y transversales temporales para los diversos estados de esfuerzo y edades. Se encontró que conforme la edad decrece las deformaciones son menores. Asimismo, la velocidad de deformación se incrementa conforme el estado de esfuerzos sostenido aumenta. Esto es consistente con lo que otros autores han reportado al respecto.
2. Posterior a la prueba de flujo plástico, los especímenes fueron ensayados a la falla. Se encontró que, en especímenes sometidos a niveles bajos de esfuerzos, su capacidad a compresión y módulo de elasticidad se incrementan. Mientras que, para especímenes ante esfuerzos sostenidos medios y altos, la capacidad y el módulo de elasticidad decaen.
3. El daño (nivel de agrietamiento) asociado a la capacidad a compresión es inversamente proporcional a la edad del espécimen, es decir, el daño para el mismo nivel de esfuerzos es menor conforme la edad aumenta. Sin embargo, lo contrario fue observado en el daño asociado al módulo de elasticidad, el cual se incrementa conforme la edad incrementa.
4. Finalmente, la relación de Poisson, determinada con las deformaciones transversales y longitudinales, mostró que, para niveles de esfuerzos bajos y medios, esta tiende a un valor fijo. Para esfuerzos sostenidos bajos, la relación tiende a 0.25. Mientras que, para esfuerzos medios, la relación tiende a 0.30. Esto no ocurre para esfuerzos sostenidos altos, donde mostró una variación temporal, la cual se encuentra en el rango de 0.50 a 0.65.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma de Nuevo León, por el apoyo financiero provisto para adquirir los insumos usados en esta investigación a través de la convocatoria PAICYT 2018, bajo el proyecto IT634-18. También, se agradece a las autoridades de la Facultad de Ingeniería Civil, en especial al Dr. Pedro Valdez, por proveer la beca del estudiante de posgrado que realizó los ensayes. Finalmente, agradecer a las autoridades del Instituto de Ingeniería Civil "Dr. Raymundo Rivera Villarreal" de la UANL, por su apoyo para el uso de la infraestructura necesaria para llevar a cabo las pruebas experimentales.

6. REFERENCIAS

Abu Al-Rub, R. K., Darabi, M. K. (2012). *A thermodynamic framework for constitutive modeling of time- and rate-dependent materials. Part I: Theory*. International Journal of Plasticity. 34:61–92. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.002

ACI Committee 211. (2022). *Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete – Guide (ACI PRC-211.1-22)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Acker, P., Bažant, Z. P., Chern, J. C., Huet, C., Wittmann, F. H. (1998). *Measurement of time-dependent strains of concrete*. Materials and Structures. 31(212):507–512. https://doi.org/10.1007/BF02481530

ASTM International. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33).* ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143).* ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C39).* ASTM International, West Conshohocken, PA.
ASTM International. (2024). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C192).* ASTM International, West Conshohocken, PA.
ASTM International. (2009). *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C617-09).* ASTM International, West Conshohocken, PA.
ASTM International. (2002). *Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression (ASTM C512-02).* ASTM International, West Conshohocken, PA.
ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (ASTM C469-14).* ASTM International, West Conshohocken, PA.
Bažant, Z. P., Prasannan, S. (1989). *Solidification Theory for Concrete Creep. II: Verification and Application*. Journal of Engineering Mechanics, 115(8):1704–1725. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:8(1704)
Bažant, Z. P., Huet, C. (1999). *Thermodynamic Functions for Ageing Viscoelasticity: Integral Form Without Internal Variables*. International Journal of Solids and Structures, 36(24):3993–4016. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00184-X
Bazant, Z. P., Yu, Q., Li, G. H, Klein, G. J., Kristek, V. (2010). *Excessive deflections of record-span prestressed box girder*. ACI: Concrete International. 32(6):44-52.
Bazant, Z. P., Hubler, M. H., Yu, Q. (2011). *Pervasiveness of Excessive Segmental Bridge Deflections: Wake-Up Call for Creep*. ACI: Structural Journal. 108(6):766-774. https://doi.org/10.14359/51683375
Bazant, Z. P., Hubler, M. (2014). *Theory of cyclic creep of concrete based on Paris law for fatigue growth of subcritical microcracks*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 63:187-200. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.09.010
Chen, P., Zheng, W., Wang, Y., Du, K., Chang, W. (2019). *Strain recovery model for concrete after compressive creep*. Construction and Building Materials, 199:746–755. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021
Collins, T., (1989). *Proportioning High-Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage*. ACI Materials Journal. 86(6):576-580. https://doi.org/10.14359/2211
Iravani, S., MacGregor, J. G. (1998). *Sustained Load Strength and Short-Term Strain Behavior of High-Strength Concrete*. ACI Materials Journal. 95(5):636–647. https://doi.org/10.14359/406
Liang, W., Wang, S., Lv, X., Li, Y. (2025). Dynamic mechanical properties and damage constitutive model of frozen–thawed basalt fiber-reinforced concrete under wide strain rate range. *Materials*, 18(14),3337. https://doi.org/10.3390/ma18143337
Linz, P. (1985). *Analytical and Numerical Methods for Volterra Equations*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). ISBN: 978-0898711981.
Loo, Y. H. (1992). *A new method for microcrack evaluation in concrete under compression*. Materials and Structures. 25(10):573-578. https://doi.org/10.1007/BF02472225
Mazzotti C., Savoia, M. (2001). *An isotropic damage model for nonlinear creep behavior of concrete in compression*. Fracture Mechanics of Concrete Structures. pp. 255-262.
Mazzotti, C., Savoia, M. (2002). *Nonlinear creep, Poisson's ratio, and creep-damage interaction of concrete in compression*. ACI Materials Journal. 99(5): 450–457. https://doi.org/10.14359/12323
Mei, S.-q., Zhang, J.-c., Wang, Y.-f., Zou, R.-f. (2017). *Creep-recovery of normal strength and high strength concrete*. Construction and Building Materials, 156:175–183. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.163
Murakami, S. (2012). *Continuum Damage Mechanics: A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture*. Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 185. Dordrecht: Springer.

Murakami, S., Kamiya, K. (1997). *Constitutive and damage evolution equations of elastic-brittle materials based on irreversible thermodynamics*. International Journal of Mechanical Sciences, 39(4): 473–486. https://doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00044-5
Narayanan, S. (2021). Elastic Modulus of Concrete. CE & CR. July:1-7.
Neville, A. M. (2011). "*Properties of Concrete"*. Pearson Education Limited, Cap 9.
Ouzandja, D. J., Talhaoui, A., Belmekki, M., Bachari, H. (2023). *3D numerical simulation of seismic failure of a concrete gravity dam considering base sliding*. Modelling in Civil and Environmental Engineering, 17(2), 43–53. https://doi.org/10.2478/mmce-2022-0010
Pan, Z., Cao, D., Zeng, B., Wang, Y. (2022). *Nonlinear Creep Amplification Factor Considering Damage Evolution of Concrete under Compression*. Materials, 15(19). https://doi.org/10.3390/ma15196742
Rossi, P., Tailhan, J.-L., Le Maou, F., Gaillet, L., Martin, E. (2012). *Basic creep behavior of concretes: Investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission*. Cement and Concrete Research. 42(1):61–73. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.07.011
Shah, S. P., Chandra, S. (1970). *Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading*. Journal Proceedings of the American Concrete Institute. 67(10):816–827. https://doi.org/10.14359/7312
Su, L., Wang, Y.-f., Mei, S.-q., Li, P.-f. (2017). *Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep*. Construction and Building Materials, 152:250–258. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.162
Tamtsia, B. T., Beaudoin, J. J. (2000). *Basic creep of hardened cement paste: A re-examination of the role of water*. Cement and Concrete Research. 30(9): 1465–1475. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00279-9
Tang, C., Zheng, W., Wang, Y. (2020). *Creep Failure of Concrete under High Stress*. Journal of Testing and Evaluation, 48(5): 3410–3416. https://doi.org/10.1520/JTE20170554
Terán-Torres, B. T., Mohammadi, J., Nair, S. E., Mendoza-Rangel, J. M., Flores-Vivian, I., Juárez-Alvarado, C. A. (2024), *Non-Linear Creep-Relaxation Constitutive Damage Model for Aging Concrete*. Applied Science. 14(10):1-28. https://doi.org/10.3390/app14104270
Vandewalle, L. (2000). *Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions*. *Cement & Concrete Composites.* 22(3): 201-208. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00004-4
Zhaoxia, L. (1994). *Effective Creep Poisson's Ratio for Damaged Concrete*. International Journal of Fracture, 66(2):189–196. https://doi.org/10.1007/BF00020083
Zhong, K., Deierlein, G. G. (2019)**.** *Low-cycle fatigue effects on the seismic performance of concrete frame and wall systems with high strength reinforcing steel*. CRC, Pankow Foundation / ACI Foundation. https://doi.org/10.1016/51734214
Zhou, M., Chen, Y. (2024). *Fatigue assessment of reinforced concrete bridge decks under realistic traffic loading using a hybrid model*. Advances in Bridge Engineering, 5(1), 12. https://doi.org/10.1186/s43251-023-00112-2