

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL DAÑO POR TRACCIÓN PRODUCIDO EN DURMIENTES DE HORMIGÓN PRETENSADO DURANTE LA PRODUCCIÓN

NUMERICAL ANALYSIS OF TENSION DAMAGE IN PRESTRESSED CONCRETE SLEEPERS DURING PRODUCTION

Melina Scasserra ^a, Marianela Ripani ^b, Hernán Xargay ^a, Luis Fernández Luco ^a

^a Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina,
mscasserra@fi.uba.ar, <https://www.fi.uba.ar/>

^b Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina, CONICET,
marianela.ripani@uns.edu.ar, <https://www.uns.edu.ar/>

Palabras Clave: Hormigón Pretensado, Durmientes Ferroviarios, Daño, Elementos Finitos.

Resumen. Los durmientes constituyen uno de los elementos más relevantes de la superestructura ferroviaria. A nivel mundial, los de hormigón pretensado son los más utilizados; sin embargo, este tipo de durmientes es susceptible a diversos modos de falla, siendo las fisuras longitudinales una de las más frecuentes. Estudios internacionales, indican que la resistencia alcanzada por el hormigón durante la fabricación del durmiente influye de manera significativa en la aparición de dichas fisuras. El presente trabajo aborda esta problemática mediante un estudio computacional que considera geometrías de durmientes y normativas aplicables en Argentina. Los resultados confirman que la fisuración puede producirse cuando los esfuerzos de tracción inducidos por el pretensado superan la resistencia a tracción del material. En este sentido, el modelo numérico desarrollado constituye una herramienta útil para identificar las condiciones específicas necesarias para prevenir este tipo de daño.

Keywords: Prestressed Concrete, Railway Sleepers, Damage, Finite Elements.

Abstract. Sleepers are among the most relevant elements of railway superstructure. Worldwide, prestressed concrete sleepers are the most widely used; however, this type of sleeper is susceptible to various failure modes, with longitudinal cracking being one of the most frequent. International studies indicate that the concrete strength achieved during the manufacturing process significantly influences the occurrence of such cracks. This study addresses the problem through a computational approach that considers geometries of sleepers and standards applicable in Argentina. The results confirm that cracking may occur when the tensile stresses induced by prestressing exceed the tensile strength of the material. In this regard, the numerical model developed represents a useful tool to identify the specific conditions required to prevent this type of damage.

1. INTRODUCCIÓN

Una vía férrea se encuentra dividida en dos componentes: (1) la superestructura, conformada por los rieles, durmientes, fijaciones, balasto y elementos accesorios y (2) la infraestructura (Taherinezhad et al., 2013). En este trabajo, se estudian las características de uno de los elementos más importantes de la superestructura férrea: los durmientes.

En líneas generales un durmiente de hormigón monoblock pretensado está compuesto por hormigón, armaduras de pretensado y elementos del sistema de fijación embebidos en el hormigón. Desde el punto de vista estructural, dado que la carga transmitida por los pares montados constituye la solicitación más importante que reciben los durmientes, los mismos son calculados principalmente para resistir los momentos flexores provocados por dicha solicitación (Gao et al., 2016). En este sentido, y para mejorar la capacidad estructural de los durmientes en cuanto a resistencia a flexión, se ha implementado el uso de hormigón pretensado para la fabricación de los mismos (Rezaie et al., 2015). Más allá de los beneficios antes mencionados, el uso del hormigón pretensado también introduce complejidades adicionales al sistema productivo, favoreciendo el desarrollo de diferentes tipos de defectos constructivos.

Como es bien sabido, las fallas en los durmientes de hormigón pueden estar relacionadas con diversos factores, entre los que se incluyen el proceso de fabricación, los materiales empleados y las condiciones ambientales del lugar de instalación (de Souza Lima y Pereira Carneiro, 2022). Según algunos autores, las fallas más frecuentes son aquellas que afectan al sistema de fijación, la aparición de fisuras transversales en la zona central del durmiente y el deterioro en la zona de apoyo del riel (Taherinezhad et al., 2013; Van Dyk et al., 2012; Li et al., 2022).

En Argentina la falla observada con más frecuencia es la presencia de fisuras longitudinales, como se muestra en la Figura 1, las cuales también han sido identificadas por otros autores como una de las fallas más comunes en durmientes monoblock de hormigón pretensados (Ferdous y Manalo, 2014; El-sayed et al., 2022; You et al., 2022; de Souza Lima y Pereira Carneiro, 2022).



Figura 1: Fisuración longitudinal en durmiente de hormigón pretensado instalado en vía.

Diferentes autores han asociado la aparición de fisuras longitudinales al proceso de producción, estableciendo que pueden deberse al daño que ocurre en la microestructura del hormigón durante la aplicación del pretensado, cuando los esfuerzos de tracción inducidos por

este superan la resistencia a tracción del hormigón (Ma C. et al., 2010; Rezaie et al., 2016; Yu N. 2017). Estos autores han realizado cálculos analíticos y modelos numéricos para arribar a esta conclusión. En lo que refiere especialmente a la modelación numérica, Rezaie et al. (2016) utilizaron el modelo constitutivo Concrete Damage Plasticity (CDP) provisto por el software ABAQUS (Dassault Systems, 2016) para representar el comportamiento plástico del hormigón. El modelo CDP tiene la capacidad de caracterizar el comportamiento mecánico de materiales frágiles, incluido el hormigón, considerando el comportamiento inelástico a tracción y a compresión, así como la degradación de la rigidez bajo deformación plástica utilizando parámetros de daño. De esta forma, la presencia de daño diferente a cero puede asociarse a la presencia de fisuras por tracción o de colapso por compresión (Wahalathantri et al., 2011). Diferentes autores han propuesto expresiones analíticas para representar este comportamiento del hormigón. Sin embargo, las presentadas por Wahalathantri et al. (2011) fueron desarrolladas específicamente para ser empleadas en ABAQUS, facilitando la representación del comportamiento plástico del hormigón y la convergencia en el programa. Por tal motivo, dichas curvas fueron las utilizadas en el presente trabajo.

En lo que respecta a la definición de la resistencia mínima a la compresión del hormigón al momento de la aplicación del pretensado, no todas las normas internacionales establecen un valor umbral. Entre los documentos analizados, solo la norma brasileña ABNT NBR 11709-2016 (ABNT, 2015), la australiana AS 1085.14-2019 (Australian Standards, 2019) y la india IRS T 39-85 (Fourth Revision – May 2011) (Research Design Standard Organisation, 2011) recomiendan una resistencia mínima a la compresión del hormigón de 21 MPa, 30 MPa y 46 MPa, respectivamente. Debe tenerse en cuenta que las dos primeras normas mencionadas utilizan probetas cilíndricas para los ensayos de compresión, mientras que la última emplea probetas cúbicas. Para tener valores comparables, el Código Estructural Español (CEE) recomienda, para una resistencia menor a 60 MPa, un factor de conversión de 0,9 para obtener la resistencia a compresión en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm a partir de probetas prismáticas (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenibles, 2021), derivándose un requisito equivalente de resistencia mínima de 41,4 MPa para la norma india.

Es importante mencionar que la norma argentina IRAM 1609-1:2019 (IRAM, 2019) no establece un requisito mínimo para la resistencia a compresión del hormigón al momento de aplicar el pretensado. Por tal motivo, el presente trabajo, basado en modelación computacional, busca analizar si para el diseño de un durmiente de trocha métrica utilizado en nuestro país pueden producirse daños por tracción en el hormigón durante el proceso de fabricación, cuando la tensión inducida por el pretensado supera la resistencia a tracción del material. De esta forma, evalúa la pertinencia de las normativas de aplicación en Argentina.

2. METODOLOGÍA DE ANALISIS

Se realizó un Análisis por Elementos Finitos (FEA) utilizando el Software ABAQUS (Dassault Systems, 2022) de cuatro durmientes de hormigón: uno con la geometría del durmiente de hormigón B-70 estudiado en Rezaie et al. (2016) para una validación inicial del modelo, y otros tres durmientes de hormigón de trocha métrica con la misma geometría, pero aplicando el esfuerzo de pretensado para las siguientes resistencias a la compresión y tracción del hormigón: (1) Muestra A con $f_c = 21$ MPa / $f_t = 1,36$ MPa, resistencia igual a la especificada por la norma ABNT NBR 11709-2016, correspondiente al límite mínimo establecido por las normas revisadas; (2) Muestra B con $f_c = 30$ MPa / $f_t = 2,01$ MPa, resistencia igual a la especificada por la norma AS 1085.14-2019; y (3) Muestra C con $f_c = 41,4$ MPa / $f_t = 2,69$ MPa, resistencia igual a la especificada por la norma T-39:2011, correspondiente al límite máximo establecido por las normas revisadas. Para definir la

resistencia a la tracción se respetó la relación utilizada por otros autores (Rezaie et al., 2016).

Para los tres modelos, se analizaron los siguientes resultados de los FEA: (1) Tensiones principales máximas generadas en los elementos ubicados alrededor del inserto y (2) Distribución del daño por tracción en los elementos ubicados alrededor del inserto.

Cabe mencionar que, de acuerdo con el trabajo desarrollado por Rezaie et al. (2016), la presencia de valores diferentes a cero en la distribución de daño en los modelos de ABAQUS se considera un indicador del posible inicio de una fisura. Finalmente, es importante señalar que, si bien en los durmientes de hormigón pueden presentarse distintos estados de esfuerzos durante su instalación y vida útil en servicio, este estudio se centra únicamente en los esfuerzos iniciales que pueden generarse cuando se liberan las fuerzas de pretensado durante el proceso de producción.

Para la validación del modelo se respetaron las características geométricas, las propiedades del hormigón y del acero y el esfuerzo de pretensado del durmiente B-70 estudiado por Rezaie et al. (2016).

Con respecto a los durmientes de hormigón de trocha métrica, los mismos se modelaron con una geometría equivalente al diseño comercial, con una longitud de 2000 mm, un área en coincidencia con el asiento del riel de 46.806 mm² y 6 alambres de pretensado de 6 mm de diámetro. Las propiedades del acero fueron equivalentes al tipo de acero de baja relajación que se utiliza en este tipo de industrias, con un límite elástico de 1580 MPa, una resistencia última de 1750 MPa y un módulo de Young de 199 GPa. La tensión de pretensado aplicada fue de 1177 MPa, similar a la utilizada en los diseños comerciales.

3. MODELO NUMÉRICO Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Para el desarrollo de los modelos numéricos, el hormigón fue representado ABAQUS como un elemento “Solid”, utilizando un mallado con elementos finitos hexagonales, mientras que los alambres de pretensado se modelaron como elementos tipo “Truss”. Con el fin de simplificar el modelo, y debido a la simetría de los durmientes de hormigón, solo se representó un cuarto del durmiente, definiéndose las condiciones de contorno de simetría que se muestran en la Figura 2. El elemento modelado no presenta apoyos sobre el suelo ya que la única carga aplicada es la de precompresión en el sentido longitudinal (paralelo al eje longitudinal del durmiente) y el durmiente tiene libertad de deformación en esa dirección.

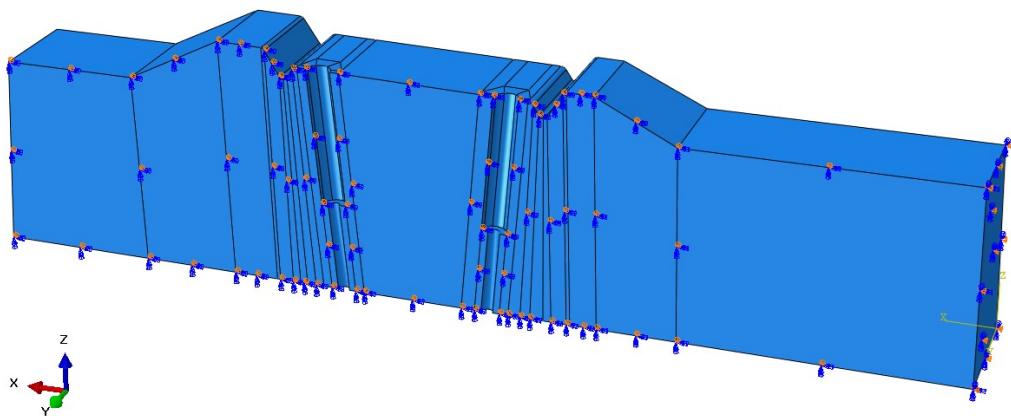


Figura 2: Representación de un cuarto de durmiente modelado según sus planos de simetría.

En una etapa inicial, se desarrollaron modelos que incluían la geometría exacta del orificio, representando el paso de la rosca generado por el tarugo plástico inserto. Sin embargo, se observó que dicha modelación agregaba un costo considerable al modelo computacional sin aportar mejoras significativas en los resultados de daño y de tensión, los cuales constituyen el objetivo principal del presente estudio. En consecuencia, y en concordancia con lo señalado en estudios previos (Rezaie et al., 2016), se optó por simplificar el modelo, omitiendo tales detalles geométricos.

Para la definición de la relación tensión-deformación del hormigón, tanto a tracción como a compresión, y los valores de daño por tracción se utilizaron las expresiones presentadas por Wahalathantri, et al., 2011. Para la validación inicial del modelo, se utilizaron los valores de resistencia a tracción y resistencia a compresión informados por Rezaie, et al. (2016). Asimismo, para la modelación de las Muestras A, B y C, se utilizó una resistencia a la compresión al momento de destesado de 21 MPa, 30 MPa y 41,4 MPa, respectivamente. De acuerdo con el trabajo desarrollado por Rezaie et al. (2016), se utilizaron, para todos los modelos analizados, los parámetros definidos en la Tabla 1 para representar las características adicionales del hormigón solicitadas por el modelo constitutivo CDP. La definición de cada uno de los parámetros del modelo CDP están detalladas en el Manual del Usuario del programa (Dassault Systems, 2016).

| Propiedad / Parámetro | Valor |
|---|------------------------|
| Coeficiente de poisson, ν = | 0,15 |
| Densidad, γ = | 2500 kg/m ³ |
| Ángulo de dilatación, ψ = | 36° |
| Excentricidad, e = | 0,1 |
| Parámetro de forma "yield surface", k = | 0,667 |
| Coeficiente de viscosidad, μ | 0,005 |

Tabla 2: Características del hormigón para el modelo CDP.

Con respecto al acero, para la validación inicial del modelo se tomaron en consideración las características del acero declaradas por Rezaie et al. (2016). Para la modelación de las Muestras A, B y C se utilizaron las propiedades del acero informadas en el Apartado 4 y se complementaron con el valor de coeficiente de poisson (0,3) y densidad (7869 kg/m³) informados por Rezaie et al., 2016.

Para modelar las fuerzas de pretensado, se aplicó una temperatura negativa (o de enfriamiento) a los alambres de acero. La fuerza de pretensado resultante, así como los esfuerzos iniciales de compresión y tracción en la masa de hormigón, se compararon con los valores teóricos esperados a fin de validar esta simplificación.

Cabe destacar, que se realizó un análisis sensibilidad del modelo para determinar el tamaño de malla óptimo y el número de elementos necesarios para lograr la convergencia en los resultados de esfuerzos de pretensado y de daño.

3.1 Validación del modelo

Para verificar que el modelo propuesto proporciona resultados equivalentes a los obtenidos por otros autores, se modeló el durmiente B-70 analizado por Rezaie et al. (2016) y se

compararon las tensiones principales máximas en los elementos ubicados alrededor del inserto con los resultados obtenidos por dichos autores. De los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 3) se observa que el esfuerzo principal máximo obtenido fue de 2,80 MPa, mientras que el mismo esfuerzo obtenido por Rezaie et al. (2016) fue de 2,77 MPa. De esta forma se comprueba que el modelo propuesto en el presente estudio permite obtener resultados equivalentes.

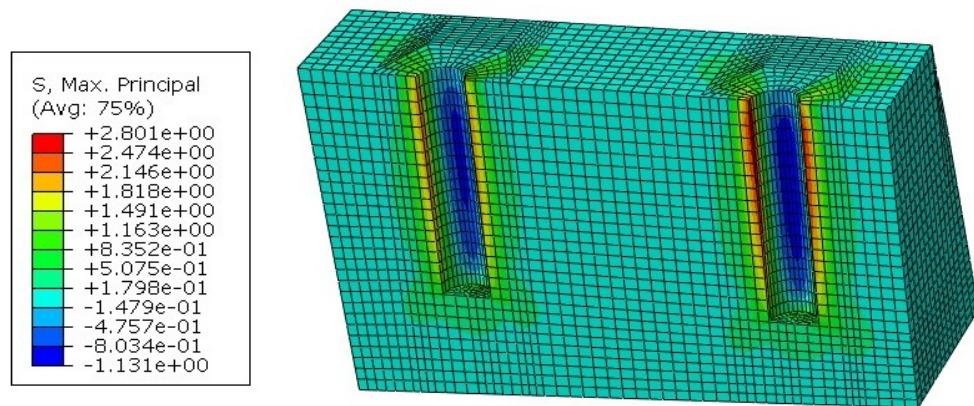


Figura 3: Tensión principal máxima (en MPa) obtenida en el presente estudio en un modelo equivalente al presentado por Rezaie et al., 2016.

3.2 Análisis de los resultados obtenidos en los Modelos A, B y C

A continuación, las figuras 4, 5 y 6 muestran los resultados de daño por tracción obtenidos a partir de los modelos A, B, y C implementados en ABAQUS.

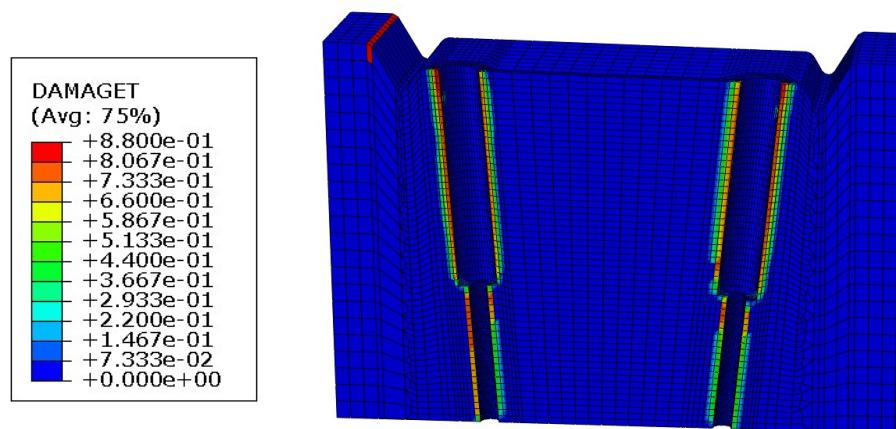


Figura 4: Daño por Tracción en Modelo A.

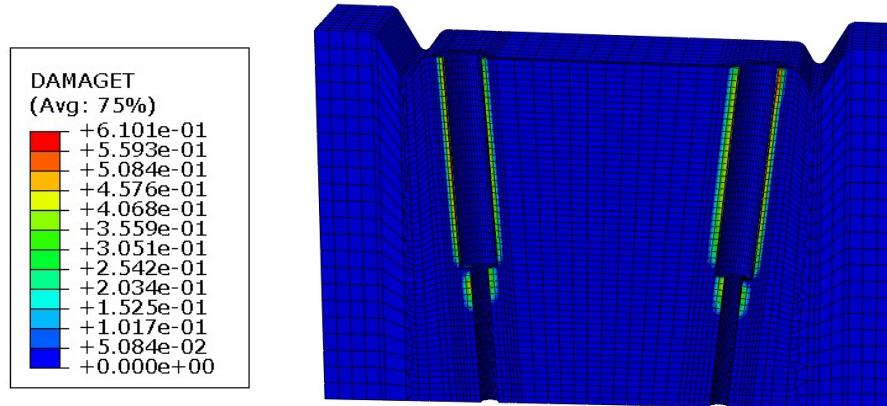


Figura 5: Daño por Tracción en Modelo B.

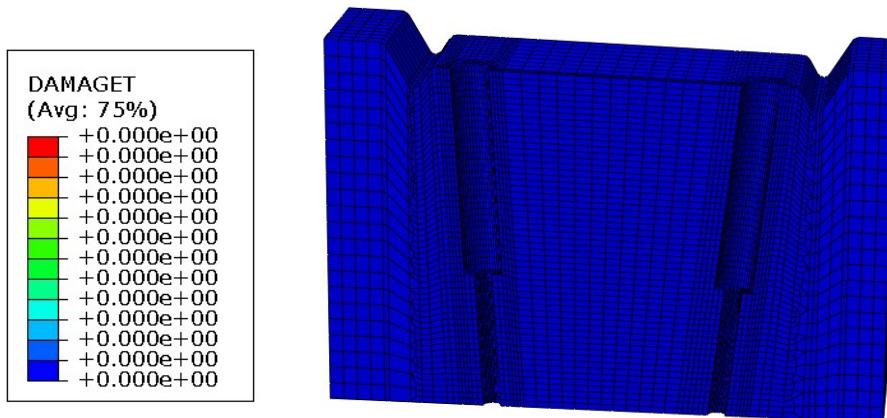


Figura 6: Daño por Tracción en Modelo C.

A partir de los resultados mostrados en las Figuras 4, 5 y 6, se puede observar que el hormigón ubicado alrededor de los insertos plásticos en la Muestra A parece haber sufrido un daño mayor debido a la aplicación de la fuerza de pretensado que en la Muestra B, mientras que en la Muestra C no se observa daño. Incluso, para la muestra A se observa daño a lo largo de todo el inserto de la fijación, mientras que para la muestra B no se observa daño en los elementos próximos a la superficie inferior del durmiente.

A continuación, en la Figura 7 se muestran las curvas de Tensión Principal Máxima ($S_{max} \cdot P$) y valores de Daño por Tracción (T. Damage) frente a Deformación Principal para un elemento (7402) ubicado alrededor del inserto. Mediante el análisis de la evolución de las tensiones principales máximas y el daño a tracción producido en las Muestras A y B, se observa que la mayor tensión principal de 1,36 y 1,95 MPa se presentó para una deformación aproximada de 0,00005 y 0,00007, respectivamente. A partir de ese punto, el daño a tracción comienza a incrementarse, reduciendo las tensiones de tracción. Por otro lado, en la Muestra C las tensiones principales máximas en el elemento nunca alcanzan la resistencia a tracción del

hormigón. En consecuencia, no se genera daño en el elemento y la tensión principal máxima registrada es de 2,36 MPa.

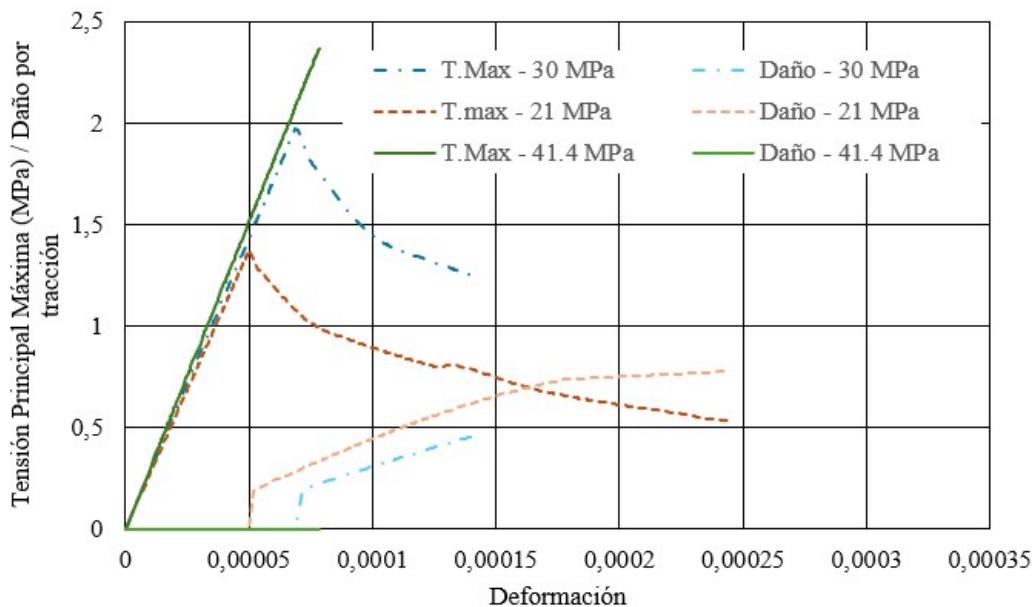


Figura 7: Tensión principal máxima y daño por tracción vs. deformación para el elemento 7402.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio verifica numéricamente que, para materiales, geometría y normativas de aplicación en Argentina, una relación inadecuada entre los esfuerzos de tracción y la resistencia requerida del hormigón durante la producción de los durmientes puede conducir al desarrollo de daño por tracción en la microestructura del hormigón.

Se observa asimismo que la norma argentina IRAM 1609-1:2019 no especifica una resistencia mínima a la compresión al momento de aplicar el pretensado, situación que podría favorecer el desarrollo de este tipo de patología. Incluso, no todos los límites establecidos por otras normas internacionales previenen la aparición de daño en la estructura de hormigón para el diseño analizado. En consecuencia, este valor umbral puede variar según las características geométricas del durmiente y la fuerza de pretensado de diseño. En este sentido, el modelo numérico utilizado en este trabajo puede resultar una herramienta útil para identificar, en una etapa de diseño, las condiciones específicas necesarias para prevenir la fisuración de los durmientes.

Para futuros trabajos se prevé aplicar alguna metodología experimental sobre durmientes fabricados a escala real para validar los resultados obtenidos en la modelación numérica. Cabe destacar que este estudio ha analizado únicamente los esfuerzos y daños producidos por la aplicación de la fuerza de pretensado en durmientes de hormigón sin armadura de refuerzo local en el inserto. Como trabajo futuro, se analizará si la presencia de una armadura de refuerzo local en el inserto sería capaz de prevenir el desarrollo del daño por tracción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Laboratorio de Materias y Estructuras (LAME) de la FIUBA por su colaboración en el desarrollo de este estudio y a la Universidad de Buenos Aires por financiar el “Proyecto de Desarrollo Estratégico 06 2021”.

REFERENCIAS

- ABNT, ABNT NBR 11709-2015 – Concrete sleepers: Design, materials, and components, 2015.
- Australian Standards. AS 1085.14. Railway track material, Part 14: Prestressed concrete sleeper, 2019
- Dassault Systems. ABAQUS/CAE user's guide, 2016.
- Dassault Systems. Simulia Academic, Version: Abaqus 2022 QRX.
- De Souza Lima, E.H., and Pereira Carneiro, A.M., A review of failures of railway monoblock prestressed concrete sleepers. *Engineering Failure Analysis*, 137: e106389, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106389>
- El-sayed, H.M., Fayed, M.N., Riad, H.S., and Zhony, H.N., A review of the structural performance of prestressed monoblock concrete sleepers in ballasted railway tracks. *Engineering Failure Analysis*, 140, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106522>
- Ferdous, W., and Manalo, A., Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – review of current practice. *Engineering Failure Analysis*, 44: 17-35, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.020>
- Gao, Z., Wolf, H.E., Dersch, M.S., Qian, Y., and Edwards, J.R. Field Measurements and Proposed Analysis of Concrete Crosstie Bending Moments, *AREMA 2016 Annual Conference & Exposition*, Orlando, FL, 2016.
- IRAM, IRAM 1609-1. Concrete Sleepers. Prestressed monoblock concrete sleepers. Part 1 – Testing requirements and methodologies, 2019.
- Li, D., You, R., and Kaewunruen, S., Mechanisms and Evolution of Cracks in Prestressed Concrete Sleepers Exposed to Time-Dependent Actions. *Applied Science*, 12: (11), 2022. <https://doi.org/10.3390/app12115511>
- Ma, C., Li, X., and Bu, J., Cause and Modification Measures of Longitudinal Cracks from Bolt Hole of the PC Sleepers II. In: *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, Beijing, China, 2010.
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenibles, *Código Estructural Español*, 2021.
- Research Design Standard Organisation. Standard Specification IRS T 39-85 (Fourth Revision – May 2011) “Indian Railway Standard Specification for Pretensioned concrete sleepers for broad gauge and metric gauge”, 2011.
- Rezaie, F., and Farnam, S.M., Fracture mechanics analysis of pre-stressed concrete sleepers via investigating crack initiation length, *Engineering Failure Analysis*, 58(1) : 267-280, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.09.007>
- Rezaie, F., Bayat, A., M., and Farnam, S.M., Sensitivity analysis of pre-stressed concrete sleepers for longitudinal crack propagation effective factors. *Engineering Failure Analyses*, 66: 358-397, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.015>
- Taherinezhad, J., Sofi, M., Mendis, P.A., and Ngo T.D., Review of Behaviour of Prestressed Concrete Sleepers. *Special Issue: Electronic Journal of Structural Engineering*, 13 (1), 2013. <https://doi.org/10.56748/ejse.131571>
- Van Dyk, B.J., Dersch, M.S., Edwards, J.R., and Barkan, C.P.L., Results of International Concrete Crosstie and Fastening System Survey. In: *2012 Joint Rail Conference*,

Philadelphia, 17-19 April 2012.

- Yu, H., Causes and Prevention of Splitting / Bursting Failure of Concrete Crossties : A Computational Study. Indianapolis, Indiana, United States, In: *American Railway Engineering. Maintenance-of-Way Association Annual Conference*, 2017.
- You, R., Wang, J., Nang, N., Wang, M., and Zhang, J., The Typical Damage Form and Mechanism of a Railway Prestressed Concrete Sleeper. *Materials*, 15: (22), 8074, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15228074>
- Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D., Chan, T., and Fawzia S., A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. *Proceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Queensland University of Technology, Brisbane, Qld, 260-264, 2011.