

FATIGA EN BULONES SOMETIDOS A TRACCIÓN: INFLUENCIA DE LA PRETENSIÓN Y EL EFECTO DE PALANCA - ESTUDIO PRELIMINAR

FATIGUE IN BOLTS UNDER TENSION: INFLUENCE OF PRETENSION AND LEVER ARM EFFECT - A PRELIMINARY STUDY

Sabrina Bisogno Eyler^{a,b}, Zenón J. Guzmán Núñez del Prado^b y Daniel de Lima Araújo^b

^aUniversidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, CIFICEN. Olavarría, Buenos Aires, Argentina, sabrina.bisogno@fio.unicen.edu.ar, <https://www.fio.unicen.edu.ar/>

^bUniversidad Federal de Goiás, Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental. Goiânia, Brasil. zenon@ufg.br, <https://gecon.eeca.ufg.br/>

Palabras clave: uniones abulonadas, efecto de palanca, pretensión.

Resumen. Si bien muchas estructuras de acero comúnmente utilizadas en la ingeniería civil no experimentan tensiones cíclicas ni un número de ciclos suficiente como para generar problemas de fatiga, este fenómeno no siempre puede ser ignorado o subestimado, especialmente en los elementos de unión. Esto ocurre en estructuras offshore, soportes de maquinaria industrial, aerogeneradores, entre otras. Las uniones abulonadas son ampliamente utilizadas por su facilidad de montaje y desmontaje. Sin embargo, cuando están sometidas a cargas cíclicas, tienden a aflojarse con el tiempo durante su vida útil en servicio. Dependiendo del tipo de sollicitación, las uniones abulonadas pueden estar sometidas a cargas axiales de tracción, corte, torsión o a momentos de palanca. La pérdida de sujeción incrementa los requerimientos de mantenimiento y puede derivar en fallas, en ocasiones con consecuencias graves. En este trabajo se estudia, mediante un modelo de elementos finitos, la respuesta tensional cíclica como paso previo al análisis de fatiga, en bulones sometidos a tracción cuando son pretensados o están sometidos a un efecto de palanca. El reglamento argentino CIRSOC 301 aclara que el rango de tensión de diseño provisto no resulta adecuado para situaciones con alta cantidad de ciclos y presencia significativa de acción de palanca. El objetivo es evaluar el impacto del efecto de palanca y de la geometría de los bulones bajo cargas cíclicas.

Keywords: bolted joints, prying action, prestressing.

Abstract. Although many steel structures in civil engineering do not experience cyclic stresses or enough cycles to cause fatigue problems, this phenomenon cannot always be ignored, especially in connection elements. Such cases occur in structures like offshore platforms, industrial machinery supports, and wind turbines. This work employs a finite element model to study the cyclic stress response as a preliminary step towards fatigue analysis, in pretensioned bolts under tensile loading with or without prying action. According to the Argentine design code CIRSOC 301, the provided design stress range is not adequate for high-cycle conditions with significant prying action. The objective is to evaluate the impact of the prying of the bolts under cyclic loads.

1. INTRODUCCIÓN

Como se menciona en [Trogia \(2018\)](#), la fatiga es el deterioro de la capacidad resistente de una sección de acero sometida a una variación cíclica de tensión, que puede convertirse en fractura después de un suficiente número de ciclos, produciéndose la falla bajo una tensión menor a la tensión de rotura, F_u . La resistencia a fatiga se puede definir como la máxima tensión que puede soportar el elemento sin fracturarse durante un determinado número de ciclos. En las uniones abulonadas de deslizamiento crítico, la pretensión de los bulones puede ser afectada por la repetición de ciclos de carga, disminuyendo sensiblemente la resistencia de la junta. El problema se incrementa en aquellos bulones sometidos a tracciones por las cargas exteriores y cuando existe acción de palanca. Si bien muchas estructuras de acero comúnmente utilizadas en la ingeniería civil no experimentan tensiones cíclicas ni un número de ciclos suficiente como para generar problemas de fatiga, este fenómeno no siempre puede ser ignorado o subestimado, especialmente en los elementos de unión. Esto ocurre en estructuras offshore, soportes de maquinaria industrial, aerogeneradores, entre otras. Las uniones abulonadas son ampliamente utilizadas por su facilidad de montaje y desmontaje. Sin embargo, cuando están sometidas a cargas cíclicas, tienden a aflojarse con el tiempo durante su vida útil en servicio. Dependiendo del tipo de sollicitación, las uniones abulonadas pueden estar sometidas a cargas axiales de tracción, corte, torsión o a momentos de palanca. La pérdida de sujeción incrementa los requerimientos de mantenimiento y puede derivar en fallas, en ocasiones con consecuencias graves. En el [CIRSOC \(2018\)](#) se dan criterios para cada detalle no pretensado tales como pernos y anclajes roscados. En el caso de bulones pretensados la deformación de las partes unidas cuando se aplica el pretensado introduce una acción de palanca, cuya intensidad no es totalmente predecible ([Kulak et al., 2001](#)). Los efectos de la acción de palanca no se limitan al cambio de la tracción promedio en el bulón e incluyen flexión en el área roscada bajo la tuerca. Por estas incertidumbres no se incluyen en el Reglamento criterios definitivos para calcular los efectos de la acción de palanca y para el Rango de Tensión de Diseño. Para limitar las incertidumbres relacionadas con los efectos de la acción de palanca sobre la fatiga de bulones pretensados en detalles en que ella ocurre, el Rango de Tensión de Diseño dado en la Tabla A-3-1 es apropiado para cargas de muchos ciclos solo si la acción de palanca producida por las cargas aplicadas es pequeña. El rango de tensión de diseño provisto por el reglamento argentino [CIRSOC \(2018\)](#) no resulta adecuado para situaciones con alta cantidad de ciclos y presencia significativa de acción de palanca, de acuerdo a lo aclarado en el mismo reglamento. Autores como [Benedetti et al. \(2013\)](#), señalan que, en el diseño para fatiga de uniones abulonadas, se busca minimizar deliberadamente la proporción de carga externa transmitida al perno, mediante el ajuste de la rigidez relativa de los elementos de la unión. Esta práctica reduce el rango de tensiones cíclicas en el perno y prolonga la vida a fatiga. Durante el ensamblaje de las uniones abulonadas que se prevé que estén sometidas a cargas de fatiga, se genera una precarga, que puede ser inferior a los valores determinados por el diseñador debido a incertidumbres en el proceso de apriete o errores de construcción. Además, las precargas de los pernos pueden disminuir con el tiempo (autoaflojamiento) debido a largos periodos de vibración o cargas cíclicas. Los déficits en la precarga de los pernos pueden, a su vez, resultar en mayores exigencias de fatiga ([Ajaei y Soyoz, 2020](#)). El comportamiento de uniones abulonadas sometidas a cargas repetidas ha sido estudiado en relación con fenómenos de autoaflojamiento por vibración ([Junker, 1969](#)) y con la influencia de la pretensión en la distribución de cargas ([Kulak et al., 2001](#)). En particular, el efecto de palanca (prying) ha sido identificado como un factor crítico, ya que incrementa la sollicitación real en el bulón y reduce su resistencia a fatiga. [Piraprez \(1993\)](#) recopiló evidencias

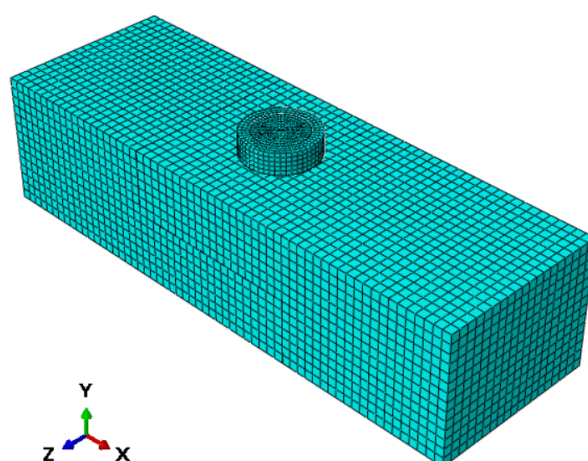


Figura 1: Geometría simplificada de la unión

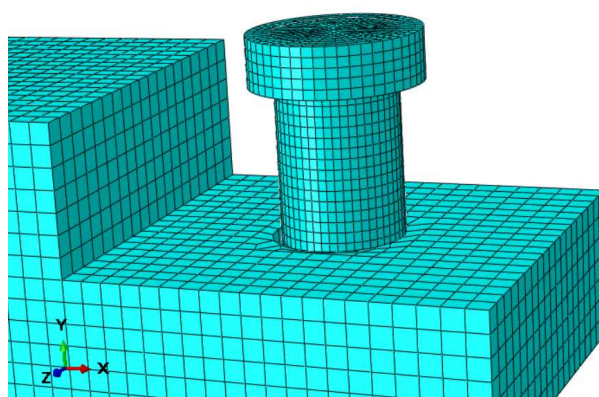


Figura 2: Alineación del bulón en los agujeros de las placas

experimentales que muestran cómo el prying disminuye significativamente la vida útil de bulones traccionados en uniones típicas, subrayando la necesidad de considerarlo explícitamente en el diseño. En este trabajo, como parte de una investigación básica previa al análisis de resistencia a la fatiga, se emplea un modelo de elementos finitos para estudiar el impacto del efecto de palanca en bulones pretensados sometidos a cargas cíclicas con excentricidad.

2. SIMULACIÓN DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Se plantea una geometría simplificada de la unión, que consiste en dos placas planas iguales, unidas mediante un bulón y una tuerca. Las placas tienen un ancho de 40 mm, una altura de 15 mm en la sección unida y una longitud de 82 mm. El bulón tiene un diámetro nominal de 12 mm. El agujero en las placas es de 13 mm, por lo que existe una holgura. La tuerca se modela como una parte separada del bulón, como se muestra en la Figura 1. Para mejorar la eficiencia computacional, se considera que el interior de la tuerca y el vástago del bulón no están roscados. Para modelar el contacto, en el ensamblaje los agujeros no quedan alineados, sino que el bulón tiene un punto de contacto con cada placa, tal como es descrito en la Figura 2. El material de las placas es acero F24 (CIRSOC, 2018), cuyo módulo de elasticidad es de 200.000 MPa, su coeficiente de Poisson es 0.3, densidad igual a 7850 kg/m³ y una tensión de fluencia de 235 MPa. Para el bulón, ISO 10.9, se consideró la tensión de fluencia igual a 830 MPa. En el caso de la tuerca, ASTM A563 (DH), la tensión de fluencia es de 635 MPa. La precarga del bulón se



Figura 3: Definición de la precarga en una sección interna del bulón

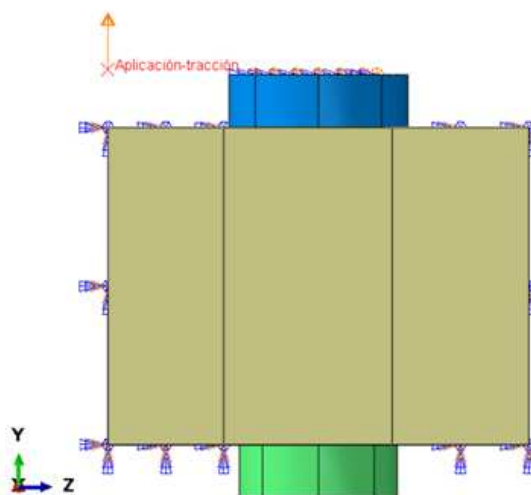


Figura 4: Aplicación de la tracción como un desplazamiento

simula definiendo una sección transversal interna, la dirección y amplitud de esa tracción, como puede observarse en la Figura 3. La carga axial se modela como un desplazamiento impuesto, aplicado en un punto de referencia acoplado a una superficie central de la placa empotrada en un extremo (Figura 4). El extremo opuesto de la otra placa está libre. Ese punto de referencia va variando de posición en relación al eje del bulón en los tres casos analizados. Además, se fija la cabeza del bulón: se impiden las traslaciones en X e Y, y el giro en Z, para representar la reacción de la herramienta de apriete (Figura 3). Las propiedades de contacto usadas son “Penalty” con un coeficiente de fricción de 0.35 para el comportamiento tangencial, y “Hard Contact” con “allow separation after contact”, para el comportamiento normal. La fijación inicial entre tuerca y bulón se produce por la presión normal generada por la precarga, que combinada con la fricción ($= 0.35$) genera una tensión tangencial umbral que impide el deslizamiento inicial hasta que se supera el límite de fricción. En cuanto al mallado, como se trata de sólidos, se utilizaron elementos HEX, tipo C3D8R. En cada placa se generaron 7826 elementos, mientras que en la tuerca, 720 y en el bulón, 9120 elementos, ya que se refinó la malla para un mejor análisis de las tensiones en puntos de contacto con las placas. Respecto al desplazamiento excéntrico que simula una carga de tracción, se consideraron tres casos en relación al punto de aplicación: el primero tiene una excentricidad de 20 mm respecto al eje del bulón en la dirección Z, el segundo, 10 mm en la misma dirección, y el tercero está aplicado en el eje del bulón. En todos los casos, la magnitud del desplazamiento varía de forma cíclica a lo largo de quince pasos, de acuerdo a lo detallado en la Tabla 1. El análisis tiene un total de diecisiete pasos. En el Step inicial se establecen las condiciones de contorno, que son el encastre en el extremo de una de

Step	Desplazamiento impuesto (mm)
1	0.5
2	0.1
3	0.5
4	0.2
5	0.4
6	0.5
7	0.4
8	0.1
9	0.5
10	0.2
11	0.3
12	0.5
13	0.4
14	0.2
15	0.5

Tabla 1: Secuencia de pasos de desplazamiento cíclico.

las placas y la restricción en la cabeza del bulón. Luego, en el Step Precarga, que tiene una duración de 0.2 segundos, se aplica una fuerza de tracción sobre una sección transversal interna del bulón. El valor de esa precarga se fija en 61 kN, que es la magnitud indicada en la Tabla J.3.1. del CIRSOC 301, donde se indican las fuerzas de tracción mínimas a las que los bulones deben ser apretados, de acuerdo a su diámetro nominal. Finalmente, se aplican los Steps de desplazamiento.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

En la Figura 5 se muestran los tres casos analizados, con precarga inicial de 61 kN y un desplazamiento cíclico de amplitud mínima 0.1 mm y máxima de 0,5 mm, aplicado una vez alcanzada la precarga. Durante los primeros 0.2 segundos se aplica la fuerza de tracción hasta llegar a 61 kN de precarga. Después se bloquea esa precarga y comienzan a aplicarse los pasos de desplazamiento. Se observa un comportamiento con descensos e incrementos en la magnitud de la fuerza axial que coinciden con los momentos donde ocurre la variación de la magnitud del desplazamiento. Cuando el desplazamiento impuesto es mayor que el del paso anterior, la fuerza axial en el bulón disminuye, y cuando el desplazamiento impuesto se reduce respecto al paso anterior, la fuerza axial total en el bulón crece. Al finalizar la serie de quince desplazamientos, la fuerza axial residual para cada uno de los casos se detalla en la Tabla 2. Si bien la fuerza axial

Modelo	Precarga (kN)	Excentricidad (mm)	F. axial residual (kN)	% residual
Caso 1	61,00	20	11,24	18,40
Caso 2	61,00	10	3,29	5,40
Caso 3	61,00	0	2,91	4,80

Tabla 2: Resultados de la fuerza axial residual para los tres casos analizados.

residual es mayor con excentricidad, esto se debe a que parte de la carga externa se transmite como flexión; por lo tanto, el bulón experimenta rangos tensionales más altos, lo que puede ser

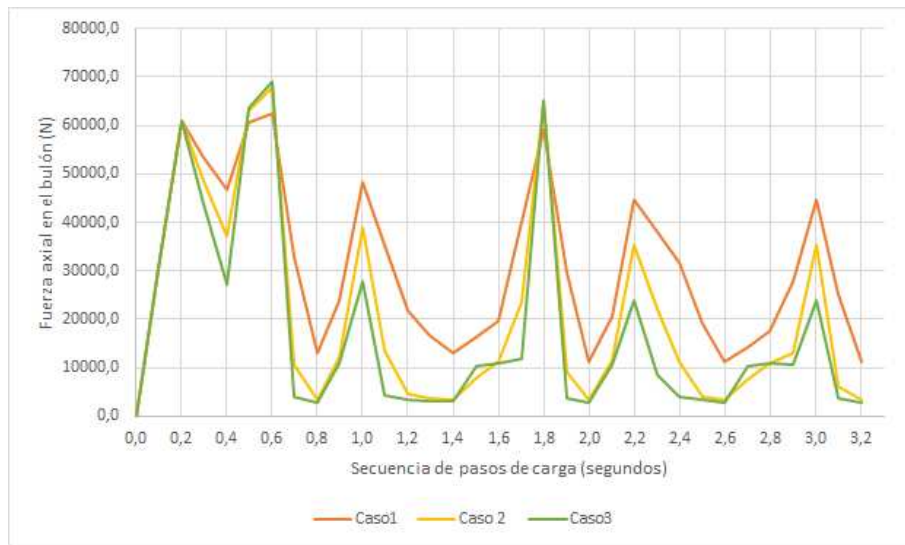


Figura 5: Evolución de la fuerza de pretensión en los tres casos de análisis

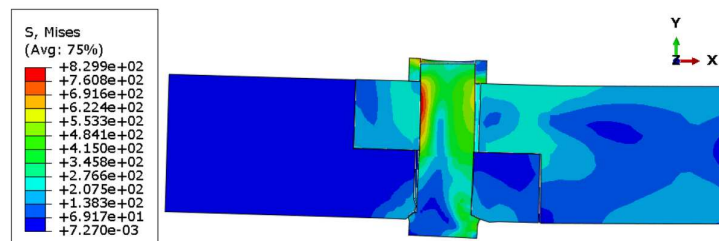


Figura 6: Deformada y tensión de Von Mises tras el último paso de carga - Caso 1

crítico para la fatiga. Las tensiones de Von Mises y la deformada al final de todos los pasos de carga aplicados se muestran para los tres casos estudiados, en la Figura 6, Figura 7 y Figura 8, para un corte longitudinal de la unión. En la Figura 9 se muestra la sección central de la unión, en el plano YZ, y los cuatro nudos elegidos para analizar la tensión S33 en el bulón y su variación en el contacto con las placas. El bulón entra en contacto con ambas placas cuando se aplica la precarga. La placa superior es la que recibe en forma directa la tracción y la transmite al bulón, que tiene una restricción de movimiento en su base. Además, existe holgura entre bulón y agujero, para permitir que aparezca la acción de palanca que amplifica la carga en el bulón debido a la deformación de las piezas conectadas. En el nudo 3209 (Figura 10) el contacto inicial va creciendo por la precarga, y luego la tensión comienza a oscilar de acuerdo a la magnitud del desplazamiento y la relación con la magnitud del paso anterior. La tensión normal es principalmente de compresión en los tres casos y en todos los pasos del análisis. En el Caso

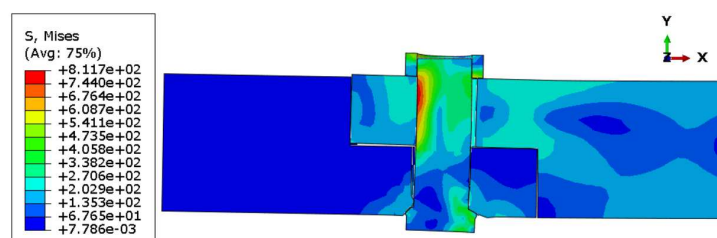


Figura 7: Deformada y tensión de Von Mises tras el último paso de carga - Caso 2

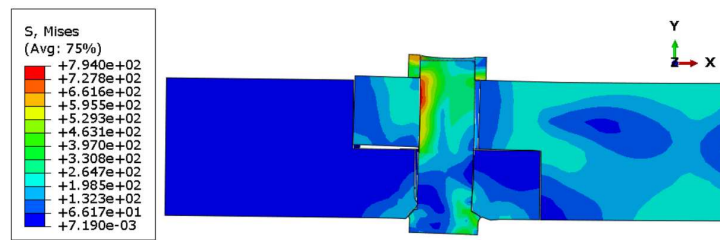


Figura 8: Deformada y tensión de Von Mises tras el último paso de carga - Caso 3

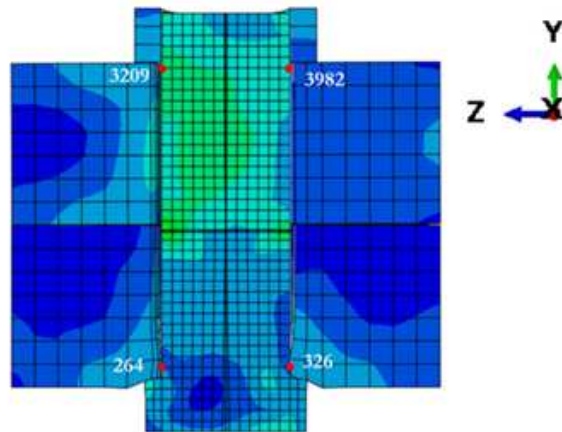


Figura 9: Puntos de referencia para el análisis de tensiones S33

2, la variación de la tensión S33 es más brusca (Tabla 3). En el punto 3982 (Figura 11), el bulón inicialmente aumenta su contacto con la placa superior debido a la aplicación de la precarga. En los tres casos analizados, la tensión es prácticamente siempre de compresión. El rango de tensión (Tabla 4) es alrededor de dos veces y media mayor para el caso sin excentricidad.

En el caso del punto 326 (Figura 12), el bulón entra en contacto con la placa inferior cuando se aplica la precarga. Luego, tras la aplicación del desplazamiento impuesto para modelar la tracción, la tensión oscila permanentemente entre valores de tracción y compresión (Tabla 5), y los rangos de tensión son mucho más amplios que para los dos puntos superiores analizados anteriormente, lo que implica una reducción esperable en la vida a fatiga. En el caso del nudo 264 (Figura 13), ocurre algo similar al punto 326. El rango de tensiones es alto y hay inversión

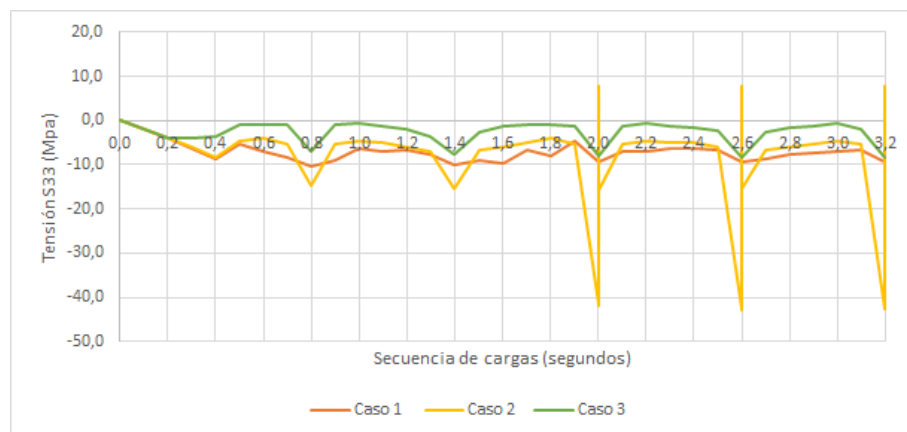


Figura 10: Tensión S33 en el punto de análisis 3209

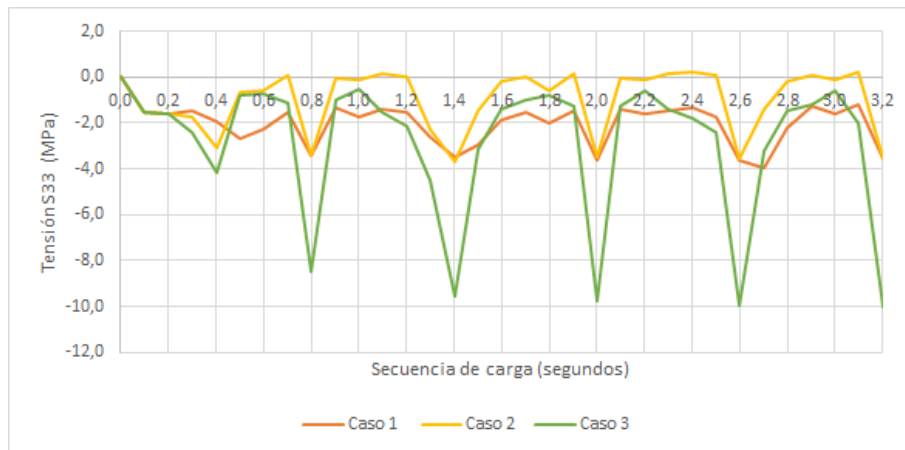


Figura 11: Tensión S33 en el punto de análisis 3982

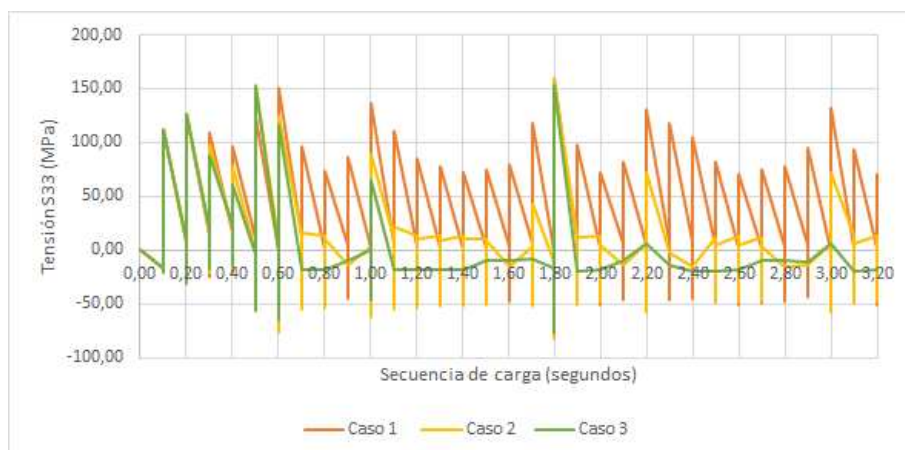


Figura 12: Tensión S33 en el punto de análisis 326

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Máxima tensión (MPa)	0,00	7,80	0,00
Mínima tensión (MPa)	-10,20	-42,80	-8,50
Rango (MPa)	10,20	50,60	8,5

Tabla 3: Valores de S33 en el nudo 3209 para los tres casos analizados.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Máxima tensión (MPa)	0,00	0,20	0,00
Mínima tensión (MPa)	-4,00	-3,70	-10,00
Rango (MPa)	4,00	3,90	10,00

Tabla 4: Valores de S33 en el nudo 3982 para los tres casos analizados.

de signo (Tabla 6). En todos los casos, los picos de tensión se corresponden con los cambios de magnitud en los pasos de desplazamiento aplicados, que representan la variación cíclica de carga. Los nodos en la zona inferior del bulón (326 y 264) mostraron rangos de tensión mucho mayores que los superiores, indicando que esa zona es crítica para la iniciación de fatiga. Los resultados obtenidos muestran que, aunque la pretensión residual parece conservarse mejor cuando existe excentricidad, el bulón sufre tensiones adicionales debidas a la acción de palanca (prying). Este efecto es reconocido en la literatura como un factor crítico en la resistencia a la fatiga de uniones abulonadas (Piraprez, 1993), donde se demostró que el prying incrementa la carga real transmitida al bulón y reduce significativamente su vida útil bajo cargas repetidas.

4. CONCLUSIONES

El modelo numérico permitió analizar el comportamiento tensional de un bulón pretensado sometido a cargas cíclicas de tracción con distintas excentricidades. Se verificó que, aunque la fuerza axial residual después de varios ciclos es mayor cuando existe excentricidad, el bulón sufre tensiones adicionales asociadas al efecto de palanca (prying). Los resultados muestran que la zona bajo la cabeza del bulón y en el primer contacto con las placas concentran los mayores rangos tensionales, incluyendo inversiones de signo, lo que confirma que son regiones críticas para la iniciación de la fatiga. La comparación entre casos con y sin excentricidad evidencia que evaluar únicamente la fuerza de pretensión residual no es suficiente; es necesario considerar las tensiones de flexión y contacto inducidas por el efecto de palanca, que aumentan el rango tensional efectivo en el bulón. Estos hallazgos coinciden con la evidencia experimental previa (Piraprez, 1993; Kulak et al., 2001), que indica que el prying disminuye la resistencia a fatiga de uniones abulonadas. El estudio es de carácter preliminar y constituye una etapa básica previa al análisis explícito de fatiga mediante curvas S-N y criterios normativos. Futuros trabajos considerarán la vida a fatiga y la influencia de parámetros como la fricción, la holgura y el proceso de apriete.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Máxima tensión (MPa)	158,80	158,60	153,90
Mínima tensión (MPa)	-56,30	-81,50	-75,20
Rango (MPa)	215,10	240,10	229,10

Tabla 5: Valores de S33 en el nudo 326 para los tres casos analizados.

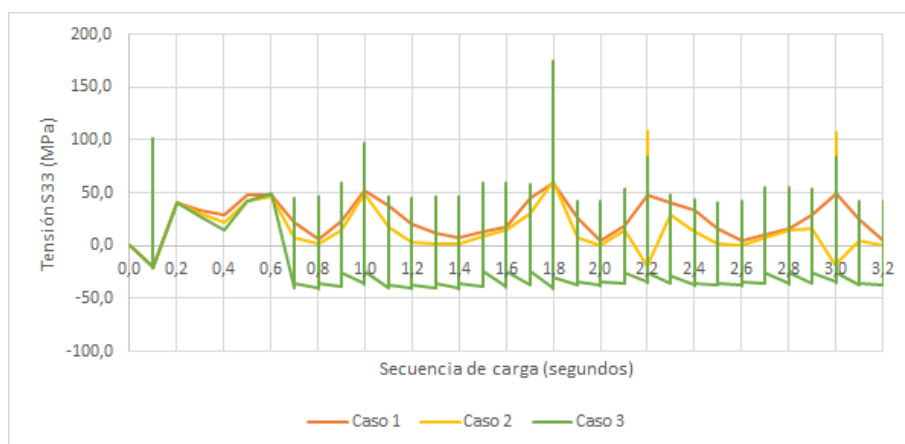


Figura 13: Tensión S33 en el punto de análisis 264

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Máxima tensión (MPa)	102,10	108,30	174,80
Mínima tensión (MPa)	-21,60	-21,60	-40,40
Rango (MPa)	123,70	129,80	215,20

Tabla 6: Valores de S33 en el nudo 264 para los tres casos analizados.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior de Brasil (CAPES), bajo el Código de Financiamiento 001.

REFERENCIAS

- Ajaei B.B. y Soyoz S. Effects of preload deficiency on fatigue demands of wind turbine tower bolts. *Journal of Constructional Steel Research*, 166:105933, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105933>.
- Benedetti M., Fontanari V., y Battisti L. Structural health monitoring of wind towers: residual fatigue life estimation. *Smart Materials and Structures*, 22(4):045017, 2013. <http://doi.org/10.1088/0964-1726/22/4/045017>.
- CIRSOC. *Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios (CIRSOC 301)*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2018. Edición 2018.
- Junker G.H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration. En *SAE Transactions*, páginas 314–335. 1969.
- Kulak G.L., Fisher J.W., y Struik J.H.A. *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. American Institute of Steel Construction, 2nd edición, 2001.
- Piraprez E. The effect of prying stress ranges on fatigue behaviour of bolted connections: The state-of-the-art. *Journal of Constructional Steel Research*, 27(1):55–68, 1993. [http://doi.org/10.1016/0143-974X\(93\)90006-E](http://doi.org/10.1016/0143-974X(93)90006-E).
- Trogia G.R. *Estructuras metálicas: proyecto por estados límites*. Asociación Cooperadora del Departamento Estructuras Córdoba, Córdoba, 2018.