

Empleo del método de los elementos finitos para modelar las fijaciones de carriles en vías férreas cubanas



Resumen

Los defectos en los elementos componentes de la superestructura de la vía férrea provocan una reducción en la velocidad de circulación, garantizando así la seguridad de movimiento de los trenes. En Cuba no se cuenta con herramientas que permitan establecer criterios con base científico – técnica sobre estas reducciones de velocidad.

En los ferrocarriles cubanos se empleaba la fijación RN y por fallas que surgían en la misma ha sido sustituida progresivamente por la J-2 P-50 Cuba, que en algunos tramos también ha mostrado problemas. El presente trabajo tiene como objetivo proponer modelos que posibiliten el análisis espacial por el método de los elementos finitos, haciendo uso de software ABAQUS 6.12, de ambas fijaciones. Los modelos fueron calibrados con estudios experimentales realizados por el grupo de investigación y brindan información sobre el comportamiento de estos elementos, pudiendo ser empleados en estudios posteriores que incluyan los defectos estructurales de la vía férrea.

Abstract

Today, in Cuba, the engineers don't have scientific criteria that permit them to establish the circulation velocity of the train when it passed over a railway track with defects. The principal railway track has RN fasteners. These fasteners have many defects and are substituted for the J-2 P-50 Cuba fasteners that have defects too. The objective was elaborated analytical models of the railway-fastening J-2 P-50 Cuba and RN using the software ABAQUS 6.12 that permits modeling by means of finite elements. The bases to model are explained. The models were calibrated with the results obtained from experiments carried out by the investigation group. These models give information of the behavior of these fasteners and can be used in the virtual simulation of the railway track with defects.

Introducción

Las sujeciones de carriles o fijaciones intermedias son el conjunto de elementos que unen los carriles a las traviesas y los mantienen en su posición. En esta definición se agrupa una gran variedad de soluciones que difieren desde su concepción hasta su forma o material. Sin embargo, independiente a estas diferencias, sus funciones son las mismas y han aumentado su importancia, en la medida que se ha incrementado la velocidad de circulación de los trenes y la carga por eje. Entre estas funciones se pueden citar: mantener el cartabón de la vía, sujeción del carril, aislamiento eléctrico, mantener el apriete sobre el carril y evitar el vuelco y deslizamientos del carril. [4].

El deterioro de las fijaciones es producido por la acción de las cargas transversales que le son transmitidas por el carril, ocasionando el desperfecto de las zonas de emplazamiento de las mismas y su aflojamiento; lo que unido a la acción del medio en el que se encuentran ubicadas origina su falla. También puede ocurrir el fenómeno de fatiga de las grapas, corrosión en grapas y pernos y el aplastamiento de placas de asiento y cojinetes de goma. Es común encontrar fijaciones flojas, que en muchos casos pierden su posición. Los elementos de goma son atacados por el ozono presente en la atmósfera, originando su enmohecimiento y deterioro con el

tiempo. Estos defectos en las fijaciones influyen en la pérdida del cartabón de la vía.

Hace algunos años existía un uso extendido de la fijación RN en la Línea Central de los ferrocarriles cubanos. Debido a los defectos que surgían en la misma ha sido sustituida progresivamente por la J-2 P-50 Cuba, aunque pueden encontrarse todavía en algunos tramos. Estas últimas también han presentado fallas debido a su explotación. De no corregir a tiempo el deterioro progresivo de las fijaciones puede influir en detrimento de las características de la vía. Es por ello que resulta necesario conocer los fallos de las fijaciones para determinar el comportamiento de la vía ante los mismos.

El método de los elementos finitos, constituye una herramienta muy útil en el campo de la ingeniería y ha sido empleada en el estudio de fijaciones para vías férreas. [2, 3, 6, 7] El presente trabajo tiene como objetivo realizar una simulación virtual del comportamiento de las fijaciones, eligiéndose para el estudio el software ABAQUS versión 6.12 que realiza la modelación en tres dimensiones por el método de los elementos finitos. Los modelos obtenidos, calibrados con resultados de ensayos realizados, permitirán analizar el mecanismo de deterioro de las fijaciones.

Fijaciones elásticas

El incremento de la velocidad y de la carga por eje de los trenes originó esfuerzos superiores en la superestructura de la vía férrea. El desarrollo alcanzado en la fabricación de traviesas de hormigón pretensado, las ventajas ecológicas y económicas que representa su utilización, el desarrollo alcanzado en la producción de materiales sintéticos y las ideas de enlace elástico desarrolladas por Robert Levy, Roger Somnville y otros, propiciaron el surgimiento de numerosas soluciones para fijaciones elásticas. Las mismas se clasifican en dos grupos atendiendo al elemento que ejerce la fuerza de sustentación sobre el patín de carril: Fijaciones elásticas de grapa o lámina y fijaciones de clip [4]. Dentro de las primeras se encuentran: RN, CIL, NABLA, KAWA-KASEL, Springlock CS, P-2, J-2. En todas ellas, la fuerza en el contacto grapa – carril oscila entre 11kN y 20kN [1].

Fijación RN

Las fijaciones RN surgen en Francia en 1945, conjuntamente con las traviesas de hormigón del tipo RS y constituyeron la primera solución de sujeción elástica, con trabajo eficiente, contribuyendo a la difusión de la traviesa de hormigón y del carril largo soldado [4]. En Cuba comenzó a explotarse este tipo de fijación en 1975.

Atendiendo a su forma y características estructurales, la fijación RN es clasificada como de grapa o lámina, doblemente elástica, aplicable a todo tipo de traviesas, aunque su empleo más extendido es sobre traviesas mixtas de acero y hormigón, tipo RS, en Europa, y en traviesas mono-bloque de hormigón pretensado en Cuba y México. La grapa elástica de esta fijación se fabrica con acero de muelle al cromo manganeso de altas características elásticas. Este elemento presiona el carril contra la traviesa absorbiendo las deformaciones de la placa de asiento de los carriles al paso de los trenes. Los esfuerzos horizontales que se producen como consecuencia de la circulación de los vehículos se transmiten del patín del carril a la traviesa a través de la pata inferior de la grapa y del cojinete de goma [4].

En Cuba se utilizó ampliamente durante muchos años la fijación RN, pero debido al largo período de explotación de las vías sin la realización de un mantenimiento con la periodicidad necesaria, estas fijaciones fueron deteriorándose y presentaron dificultad para mantener el ancho de la vía, poco aislamiento eléctrico, y fallo por fatiga en la sección del hueco. Estos mismos problemas habían sido reportados a nivel internacional y propiciaron el surgimiento de nuevos tipos de fijaciones como la P2 y luego la J2. Hace varios años la Unión de Ferrocarriles de Cuba propuso la sustitución de la fijación RN por la sujeción J-2 P-50 Cuba, que presenta poco volumen de material a sustituir y a la cual el fabricante le confiere amplias ventajas. No obstante coexisten ambas en las vías cubanas.

Fijación J-2 P-50 Cuba

La fijación J-2 es originaria de la firma española Mondragón. Actualmente se fabrica en Cuba y para el carril P-50, difiere de las empleadas para carril UIC 54 y carril RN 45 debido a que este presenta una inclinación en el patín distinta, la traviesa a utilizar es mono-bloque y tanto la pieza exterior como la interior serán la misma, por tanto, las dimensiones de sus elementos van a ser distintas.

La fijación está compuesta por un tornillo y una arandela de fijación, empleándose en Cuba el mismo perno de anclaje que en la fijación RN [1]; además una lámina elástica metálica de un espesor de 6mm y piezas aislantes. Se colocan a ambos lados del patín con una función de retención y están confeccionadas con poliamida 6.6 reforzada con un 35% de fibra de vidrio. También consta de una placa de asiento elástica bajo carril construida con caucho sintético u otro elastómero que proporciona elasticidad a la vía y amortigua las vibraciones.

Modelación de la fijación RN

Como punto de partida en la modelación se toman los estudios realizados en la Universidad de Camagüey [5]; en los mismos se determinó la carga estática en el perno y se realizaron experimentos para determinar la carga axial en el perno de anclaje que era necesaria para deformar la grapa hasta su posición de trabajo. El estudio brinda los distintos valores de rigidez de los elementos componentes de la fijación, así como las condiciones de apoyo de la grapa de la RN.

Se consideró el cojinete de goma y la platina amortiguadora con un módulo de elasticidad de 15 MPa y coeficiente de Poisson de 0.45, para el acero del carril y la presilla se utilizó 2.1×10^5 MPa para el módulo de elasticidad y 0.3 para el coeficiente de Poisson. La fricción entre arandela y la parte superior de la presilla tiene un coeficiente de 0.2.

Teniendo en cuenta los estudios precedentes, se utilizarán escalones de carga de 5 kN, 10 kN, 20 kN y 32.5 kN. Las deformaciones en el estudio se midieron en dos puntos de interés: el punto de aplicación de la carga (punto 1) y a 35.5 mm del extremo superior de la presilla (punto 2).

Análisis de la densidad de malla y tipo de elemento óptimo

Debido a las dimensiones de los elementos que componen la fijación y a la geometría de los mismos (sobre todo la parte correspondiente a los orificios), para elementos mayores de 6 mm se pierden las características geométricas; por lo tan-





to para mallar la platina, la presilla, el cojinete de goma y la arandela se usarán elementos de tamaño 5 mm o menores y para el caso del carril de 25 mm y elementos tipo cuña.

El análisis para determinar el tipo de elemento óptimo también se ve condicionado por la geometría y las dimensiones. En el caso de los componentes de la fijación se descarta el empleo de elementos tipo cuña y tetraédricos, dejando finalmente la malla hexaédrica como opción única para desarrollar el estudio, además que el programa recomienda su utilización preferencial sobre los tetraedros.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores se corrieron modelos con tamaños de 5 mm, 3 mm, 2 mm y 1 mm y elementos hexaédricos para determinar la densidad de malla óptima. Se obtuvo un tamaño ideal de 2 mm, ya que los resultados de este son los de menor diferencia con relación a los modelos teóricos.

Selección del modelo constitutivo

El acero de la presilla y el carril se modeló como material elástico, a los elementos de goma se le asignaron propiedades elásticas con valores de módulos de deformación obtenidos en un estudio previo [5]. Los apoyos bajo la platina y el carril se consideraron articulados. Para los contactos entre la goma y el carril, así como entre la punta de la presilla y el carril se consideró el tipo Tie, que posee el módulo interacción del

ABAQUS, considerando el tipo de contacto que se origina en estas regiones. La interacción Tie es una restricción de unión que permite fusionar dos regiones a pesar de que las mallas creadas en las superficies de las regiones puedan ser distintas.

Se emplearon los escalones de carga mencionados anteriormente, pero distribuyendo la misma en el área de la arandela, coincidente con la del dispositivo de aplicación utilizado. En este caso se compararán las deformaciones en los puntos 1 y 2 obtenidas experimentalmente [5], y las calculadas por el método de los parámetros de origen, con las obtenidas una vez corrido el programa. Para la zona del carril donde está ubicada la fijación que completa el par con la que se está ensayando, se considera esta en su posición de trabajo y para modelarla se sustituye por el valor de la reacción de apoyo sobre el patín del carril de 11 KN, [5], distribuida en la línea de apoyo de la presilla.

Utilizando los valores fijados, queda definir la elasticidad de la platina y el cojinete de goma, que a nivel internacional son valores variables dependiendo del país y la tecnología empleada en su fabricación y la velocidad de servicio de las vías. Teniendo en cuenta la gran variedad de valores se utiliza como elasticidad inicial la brindada en estudios precedentes [5] y se variará entre los rangos internacionales hasta obtener los resultados del modelo teórico y de los ensayos o bien valores que no difieran en más del 10% con los anteriores.

Resultados de los modelos. Comparación con estudios precedentes

Después de realizar la calibración física en base la variable anteriormente definida se obtuvo como valor de elasticidad del cojinete 8 MPa, para la platina de 150 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.45 en ambos casos. Se cuidó en todo momento que la diferencia de los resultados obtenidos con los de los estudios anteriores fueran menores del 10%.

Modelación de la fijación J-2 P-50 Cuba

La lámina elástica de la fijación J-2 P-50 Cuba trabaja a flexión en el plano XY. El emplazamiento de la lámina sobre la pieza aislante origina que se encuentre simplemente apoyada y el conjunto de anclaje (perno, arandela plana y tuerca) genera un simple apoyo en el centro de dicha lámina.

En el modelo teórico la lámina elástica de la fijación se modela como una viga de sección variable en la zona del orificio para el paso del perno, simplemente apoyada en sus extremos y el simple apoyo del centro de la lámina se sustituye por una carga uniforme distribuida linealmente con una longitud igual al diámetro de la arandela. [1] Con el esquema de análisis propuesto se calcularon los desplazamientos en el centro de la viga, incrementándose la carga de manera escalonada. Los resultados obtenidos se compararon con los que se obtuvieron en los ensayos para el estudio experimental del

comportamiento de la fijación J-2 P-50 Cuba bajo la acción de la carga axial provocada por el perno de anclaje para deformar la grapa hasta su posición de trabajo. [1]

Para ello, se utilizó un dispositivo que transmite la carga del plato superior de la prensa a la grapa en la zona de contacto arandela-lámina. El carácter de enlace entre carril y traviesa que posee la fijación y que intervengan todos los elementos deformables de la misma, se logra utilizando un extremo de traviesa sobre el que se coloca un cupón de carril y todos los elementos de la fijación a ambos lados de este. Es suficiente ensayar las fijaciones en una de la dos posiciones posibles, por lo que en el lugar que no se ensayan se colocan los elementos de anclaje, (perno, arandela y tuerca) fijando el cupón del carril sobre la placa de asiento a la traviesa. En la posición de ensayo se coloca el cojinete de goma y la grapa que se estudia, luego el dispositivo de medición de deformación en la grapa, y por último, el dispositivo transmisor de las cargas. [1]

Para establecer la relación existente entre los desplazamientos de las secciones que se estudian y la fuerza axial en el perno, se aplica la carga por escalones de 5kN, hasta llegar a la posición de trabajo. Al comparar los resultados se obtuvo una diferencia. La desigualdad entre los resultados del modelo teórico y los ensayos indica que se está produciendo un desplazamiento adicional. Se pudo comprobar que esto ocurre debido a un aplastamiento en el cojinete de goma bajo el carril producto de la acción de las cargas, aspecto este que





no era tenido en cuenta en el modelo teórico, fuera de este desplazamiento se corrobora la confiabilidad del modelo teórico. [1]

Hipótesis para la modelación

Los elementos de la superestructura de la vía férrea que fueron modelados para la realización del análisis son: el carril, la arandela, la lámina elástica metálica, la platina de goma, y la pieza aislante, en su forma real y su forma simplificada.

La traviesa, la tuerca y el perno no se modelaron, en el programa se simularon los efectos que ejercen sobre los demás elementos.

Las propiedades mecánicas elásticas asignadas pueden observarse en la Tabla 1

El resto del modelo fue trabajado según las condiciones explicadas en el ensayo. La Figura 8 muestra el modelo completo empleado.

Validación del modelo

El modelo real, por su geometría compleja, no pudo ser mallado en el programa con elementos tetraédricos ni cuña. La variante simplificada fue analizada por los tres tipos de elementos, escogiendo el elemento hexaédrico porque dio valores de deformación de la placa metálica semejantes a los del ensayo real. Además de tener menor costo computacional que para otros tipos de elementos, es el único con que se pueden comparar los resultados y evaluar su diferencia. Se hizo una valoración también comprobando diferentes tamaños de malla para el tipo de elemento hexaédrico. El tamaño de

Tabla 1: Propiedades mecánicas elásticas empleadas para los elementos de los modelos.

Tipo de material	Módulo de Young (MN/mm ²)	Coefficiente de Poisson
Acero	0.21	0.3
Goma	2.3 x 10 ⁻⁷	0.45
Plástico	0.002	0.3

elemento óptimo fue cuatro milímetros, ya que para tamaños mayores de este valor, el modelo comienza a perder su forma geométrica, especialmente en las superficies curvas que tienen los elementos; los tamaños menores generan un elevado costo computacional.

Se analizaron las diferencias entre los resultados obtenidos con el modelo real y el simplificado para el tipo de elemento y tamaño de malla definidos anteriormente, los cuales aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2: Comparación entre los resultados de deformación en la placa metálica para los modelos real y simplificado.

Carga (kN)	Modelo real (mm)	Modelo simplificado (mm)	Diferencia
5	0.876	0.867	1.03%
10	1.389	1.361	2.06%
15	1.917	1.854	3.28%
20	2.441	2.346	3.89%
25	2.973	2.839	4.51%
30	3.501	3.333	4.80%
35	4.029	3.826	5.00%





Puede concluirse que los resultados del modelo simplificado son aceptables porque tienen una diferencia menor que 5% con el modelo real, lo que demuestra que puede emplearse este modelo para analizar la fijación.

Las tensiones y los desplazamientos obtenidos se correspondían con los resultados experimentales.

Conclusiones

1. Para la modelación de la fijación RN el tipo de elemento a emplear es el hexaédrico con tamaño óptimo de 2 mm.
2. Para la modelación de la fijación J-2 P-50 en Cuba queda definido el elemento hexaédrico como el más conveniente a emplear en los modelos con un tamaño óptimo de los elementos de 4 mm. Se comprueba que es factible el estudio de la fijación sin considerar los huecos de la pieza aislante, ya que las diferencias de los resultados es menor del 5%.
3. En ambas fijaciones quedan comprobados los modelos de fijación analizados, sugiriendo la factibilidad de su sustitución por las acciones que provocan sobre el carril, lo que permite simplificar un modelo general de la vía férrea.
4. Los modelos obtenidos pueden ser empleados para estudiar el mecanismo de deterioro de estas fijaciones.

Bibliografía

- GALBÁN HERNÁNDEZ, R Y LÓPEZ CORDERÍ, Y. *Estudio Teórico experimental de la fijación J-2 P-50*. (Tesis presentada en opción al título de ingeniero civil) Facultad de Construcciones. Universidad de Camagüey, Cuba. 2002.
- LING, L. ET AL. *Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings*. Journal Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. Volume 52, 2014 - Issue 9.
- LIU, Y. ET AL. *Finite element analysis and experimental investigation of nonlinear features of rail fastening systems*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol 232, Issue 3, 2017. pp. 873-894.
- LÓPEZ PITA, A. *Infraestructuras ferroviarias*. (2da ed). Barcelona: Prentice Hall. 2006.
- MARTÍNEZ LÓPEZ DEL CASTILLO, W. *Estudio teórico-experimental para la determinación del deterioro permisible en los pernos de anclaje de las fijaciones de traviesa de hormigón*. / Wilfredo Martínez López del Castillo. (Tesis presentada en opción al grado de doctor en ciencias técnicas), Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. 1997.
- MORANT, S. *New calculation models aid rail fastening development*. International railway journal, 2017.
- QIUTONG, L., LUO, Y., LIU, Y. *Estimating clamping force of rail fastener system by experimental and numerical methods*. Transportation Research Procedia 25:443-450 · December 2017.