

Determinación de las cargas aplicadas al carril mediante bandas extensométricas

JAVIER MORENO ROBLES (*) y JOSÉ LUIS GARCÍA DE LA OLIVA (**)

RESUMEN En el presente artículo se describe inicialmente la forma de instalación de las bandas extensométricas para la determinación de las cargas aplicadas al carril que habitualmente realiza el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en las secciones que éste instrumenta. Posteriormente se analiza la formulación analítica que permite obtener el cortante en una sección en función de la deformación del alma del carril. Finalmente se realiza un modelo numérico tridimensional para analizar los errores provocados en la interpretación citada por el efecto de la proximidad de la carga al emplazamiento de las bandas extensométricas y se estudia la repercusión en las medidas de un error en la posición de las bandas.

DETERMINATION OF THE LOADS ON A RAIL USING STRAIN GAUGES

ABSTRACT *In this paper we discuss first how strain gauges are installed to measure the loads applied on a rail as normally done by the Geotechnical Laboratory of CEDEX on the sections that it instruments. We present next an analytical formulation to determine the shear in a cross section from the strains in the web of the rail. A 3D numerical model to assess the errors involved in the interpretation of the data due to the proximity of the strain gauges to the loads is finally presented studying the effect of the position of the gauges on the measurement errors.*

Palabras clave: Bandas Extensométricas, Cortante, Carril.

Keywords: Strain Gauges, Shear, Rail.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de las cargas que transmite cada rueda de un tren al carril es una medida necesaria en toda instrumentación que se realice en la vía, ya que cualquier efecto en el resto de los elementos de la superestructura e infraestructura de la vía estará en función de la sollicitación externa introducida.

En el presente artículo se describe inicialmente la forma de instalación que habitualmente realiza el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en las secciones que éste instrumenta. Posteriormente se analiza, mediante la teoría clásica de vigas, la formulación analítica que permite obtener el cortante en una sección en función de la deformación del alma del carril. Finalmente se realiza un modelo numérico tridimensional para analizar los errores provocados en la interpretación citada por el efecto de la proximidad de la carga al emplazamiento de las bandas extensométricas y se estudia la repercusión en las medidas de un error en la posición de las bandas.

2. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN DE LAS BANDAS EN EL CARRIL

La instalación o "pegado" de las bandas extensométricas es un procedimiento laborioso y delicado que debe ser realizado por personal técnico altamente cualificado. Las fases necesarias en su instalación, que finalmente se han considerado necesarias tras la instrumentación de numerosas secciones, son las siguientes:

- 1.- Replanteo de los puntos de colocación y marcado en el carril de la fibra neutra.
En el caso de que se pretenda obtener la carga por rueda Q entre traviesas se fijaran los puntos a 15 cm a cada lado del centro del vano entre traviesas. Cuando se requiere conocer la carga Q entre traviesas se sitúan los puntos a 15 cm de los extremos de la traviesa a estudiar. En la Figura 1 se puede ver la situación de las bandas en ambos casos.
- 2.- Lijado inicial con radial de zona que ocupa la banda en el carril.
- 3.- Lijado fino con pulidora para eliminar irregularidades del lijado anterior.
- 4.- Limpieza con disolvente del carril para eliminar impurezas del lijado.
- 5.- Pegado de bandas en cinta de Kapton para posicionamiento previo al montaje de bandas extensométricas.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. UPM.
E-mail: javier.moreno@cedex.es

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. UPM.
E-mail: Jose.G.Oliva@cedex.es



FIGURA 1. Situación donde se colocan las bandas para medir la carga sobre el carril y sobre la traviesa.

- 6.- Posicionamiento exacto de banda en carril.
- 7.- Pegado de la banda al carril.
- 8.- Se retira la cinta de Kapton.
- 9.- Soldadura de los cables de la banda a terminal para conexión con cable de prolongación hasta adquisidor de datos.
- 10.- Protección mediante láminas de aluminio con masilla de recubrimiento para protección de bandas extensométricas en montajes de intemperie.

3. DETERMINACIÓN DEL CORTANTE MEDIANTE LA TEORÍA DE LAS VIGAS

Las bandas extensométricas instaladas según el procedimiento anterior, permiten obtener la deformación lineal unitaria que tiene lugar en una dirección que forma 45° con la horizontal. La determinación del cortante de la sección asociado a esta deformación unitaria se realiza con la siguiente teoría obtenida de la resistencia de materiales elástica.

Si se considera una sección prismática simétrica respecto al eje de las "z" tal como se muestra en la Figura 3 y se aplican unas cargas externas en el plano medio, el esfuerzo cortante será el Q_{xz} .

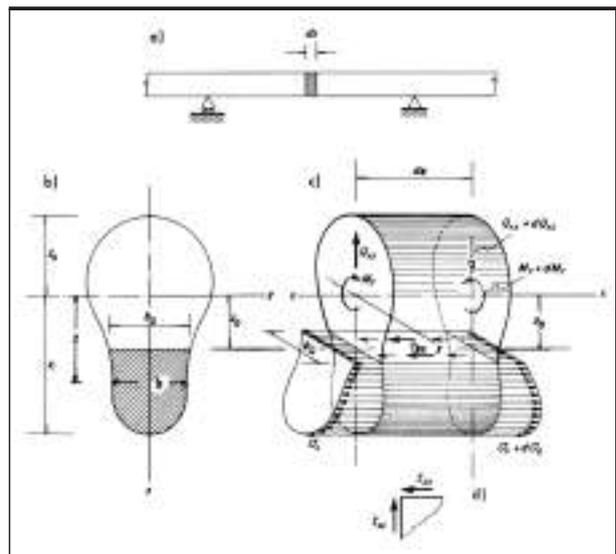


FIGURA 3. Croquis de la distribución de tensiones de una viga. Tomado de Estructuras Metálicas. Ramón Argüelles Álvarez. ETS de Ingenieros de Montes.



FIGURA 2. Vista del aspecto de una banda una vez pegada sin/con conexiones y previo a la protección final.

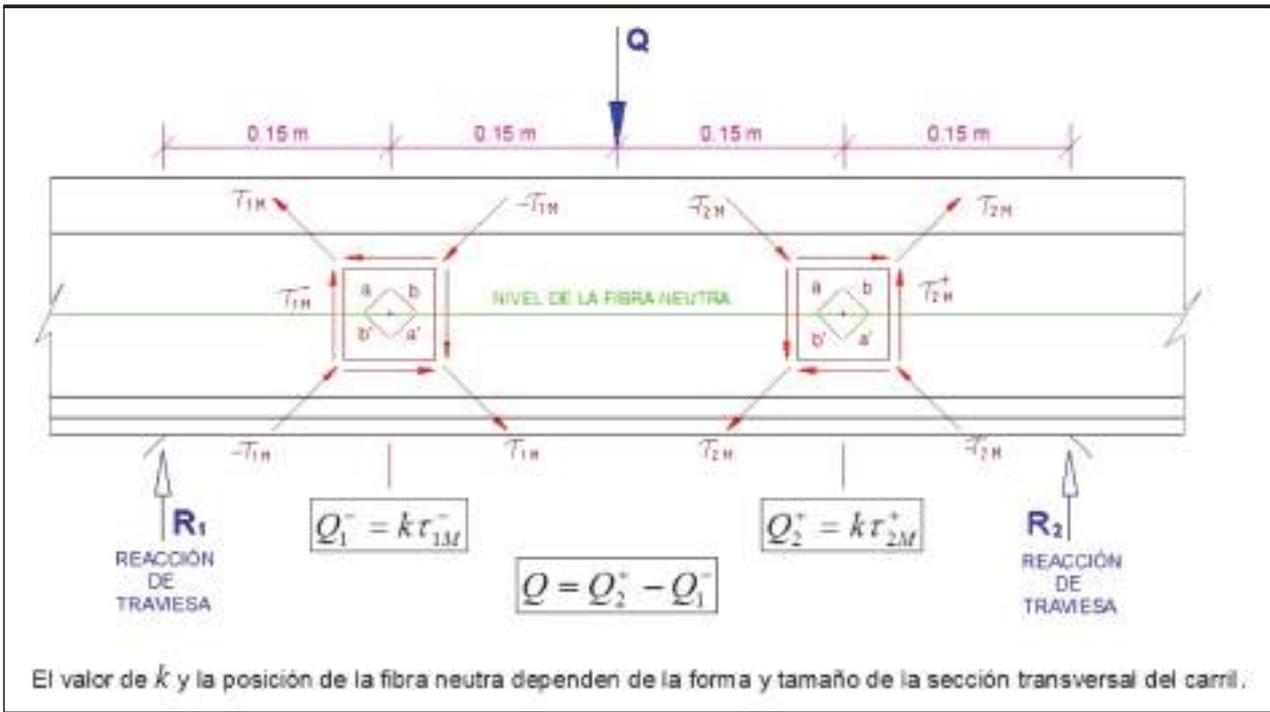


FIGURA 4. Croquis explicativo de la interpretación de las cargas entre traviesas.

Aislando un segmento diferencial "dx" de dicha pieza prismática, y seleccionando por un plano perpendicular al eje "z" distante z_0 del eje correspondiente la fibra neutra, "y", al considerar las tensiones y esfuerzos que intervienen, se tiene:

A la izquierda del trozo aislado "dx" existe un momento flector M_y que provoca tensiones normales $\sigma_x = M_y z / I$. A la derecha el momento flector será: $M_y + dM_y$, y por lo tanto las tensiones normales alcanzarán los valores $\sigma_x + d\sigma_x = (M_y + dM_y) z / I$. Si la sección es constante por ser prismática, el desequilibrio de los volúmenes de tensiones normales a la derecha y a la izquierda del trozo aislado únicamente puede compensarse con las tensiones tangenciales τ_{zx} que aparecen en el plano horizontal de corte sobre el rectángulo diferencial de área $b_0 \cdot dx$.

Suponiendo que estas tensiones tangenciales se distribuyen uniformemente en el ancho b_0 correspondiente a la sección, tendremos:

$$\tau_{zx} b_0 dx = \int_{z_1}^{z_2} (\sigma + d\sigma) b dz - \int_{z_1}^{z_2} \sigma b dz$$

Al ser $d\sigma = \frac{dM_y}{I_y} z$, y $Q = \frac{dM_y}{dx}$ siendo $\int_{z_1}^{z_2} b z dz = S_y$,

el momento estático de la sección, operando se obtiene finalmente:

$$\tau_{zx} = \frac{Q_y S_y}{b_0 I_y}$$

A partir de la expresión anterior, el valor del cortante en una sección se puede obtener si se conoce la deformación lineal longitudinal medida a 45° en una fibra, ϵ :

$$Q_y = \frac{2dG\epsilon_y b}{S_y}$$

siendo:

ϵ la deformación lineal longitudinal medida a 45° en una fibra

b la anchura de la sección en la fibra donde se mide la deformación

I_y el módulo de inercia de la sección

S_y el momento estático de la sección en la fibra donde se mide la deformación

En el caso del carril UIC60, la fórmula anterior se transforma en $Q_y = 0,34688 \epsilon$ expresando ϵ en microdeformaciones ($\mu\epsilon$) y Q_y en kN, cuando la fibra de medida es la fibra neutra que está situada a 80,9 mm de la cara inferior del patín.

4. INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS DE CAMPO

Empleando la formulación anterior y a partir de los registros tomados en la sección instrumentada se puede obtener la carga por rueda de las circulaciones ferroviarias mediante la siguiente metodología de interpretación.

Se parte de los registros de los cortantes proporcionados por dos conjuntos de bandas extensiométricas que estén situadas entre dos traviesas contiguas. La separación de dichas bandas influye en el contenido de frecuencias que tiene la señal registrada. Normalmente, según se ha indicado anteriormente, la separación que existe entre ellas es de 30 cm, ya que cada banda está situada a 15 cm del centro del vano.

Inicialmente se sigue un proceso de filtrado de la señal obtenida para eliminar frecuencias parásitas, empleándose habitualmente un filtro pasa baja con unas frecuencias de corte y atenuación del orden de 200-250Hz. Algu-

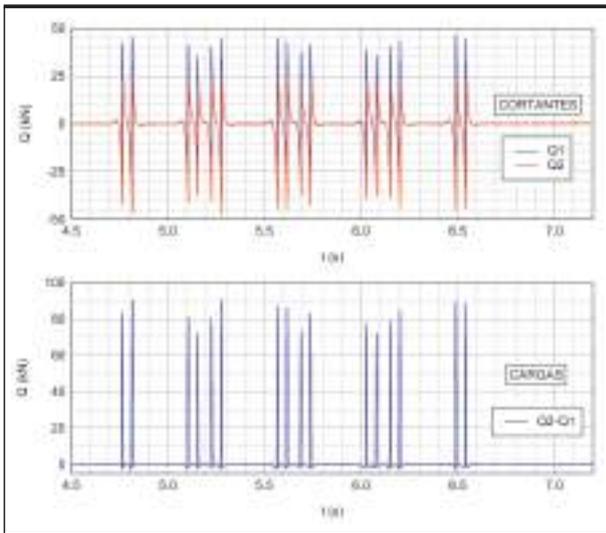


FIGURA 5. Cortantes filtrados y corregidos correspondientes a un mismo tren y cálculo de cargas mediante la diferencia positiva de ambos.

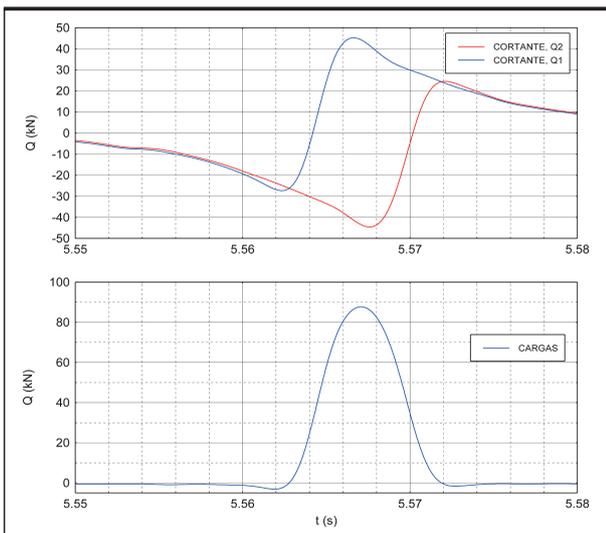


FIGURA 6. Detalle del paso de una de las ruedas.

nas señales pueden requerir un filtrado adicional debido a la aparición de un ruido contenido en esa banda de frecuencias, por ejemplo, la presencia de una señal eléctrica de 50Hz. Para eliminarlo se puede aplicar un filtro de rendija (Notch filter, NF), que elimina una franja de frecuencias del registro. Una vez que los registros están filtrados y corregidos (correcciones de base y deriva) se procederá a restar un registro del otro. Este último representará la historia de cargas producida sobre la vía al paso del tren donde los picos representan el paso de las ruedas y cuya amplitud determina la carga soportada por la vía (ver Figura 5 y 6).

5. MODELO NUMÉRICO REALIZADO

La metodología de cálculo anterior se basa en el registro de una determinada deformación en el alma del carril y la pos-

terior determinación del cortante correspondiente empleando la teoría de la resistencia de materiales.

Sin embargo, es bien conocido que las hipótesis habitualmente aceptadas de distribución de tensiones en una viga (Bernoulli-Navier) exigen que la distancia de la carga a la sección de cálculo sea suficiente para que el flujo tensional se regularice y no estén afectadas por el efecto local de la discontinuidad geométrica o de cargas.

En el caso de un carril situado sobre unas traviesas, estas regiones de discontinuidad (denominadas habitualmente regiones D) se presentan en las zonas donde se transfiere la carga a las traviesas y en el punto de aplicación de la carga de la rueda, que es lógicamente móvil.

Para poder comprobar la validez de la metodología anterior se ha realizado un modelo numérico tridimensional simulando con gran precisión la geometría del carril (ver Figura 7). El código numérico empleado es el Flac3D (Itasca, Minneapolis) que emplea la técnica de las diferencias finitas.

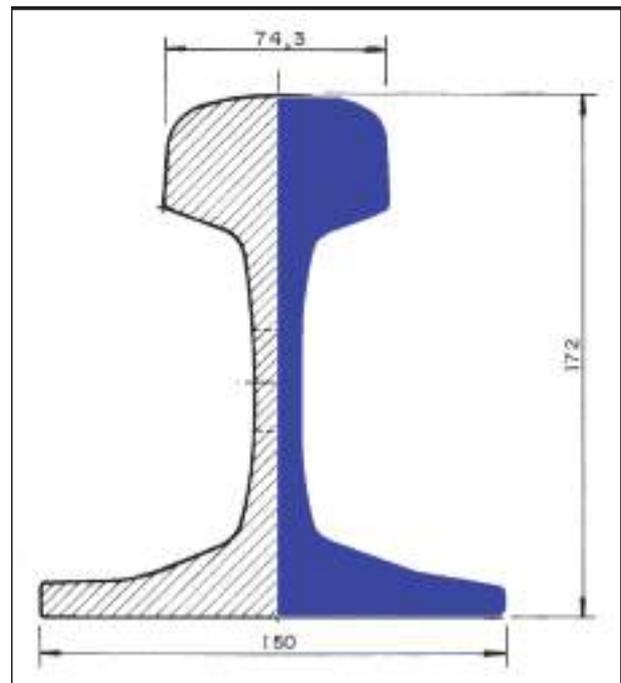


FIGURA 7. Comparativa de la sección empleada en el modelo numérico y la sección real del carril UIC60.

En longitud se ha considerado únicamente 20 cm de carril apoyado en el pad izquierdo, 40 cm entre apoyos y los 20 cm apoyados en el pad derecho. Lógicamente, la separación entre ejes de traviesas es de $20/2 + 40 + 20/2 = 60$ cm.

Para simular la medida que proporcionarían las bandas instaladas en el carril se ha monitorizado el movimiento de unos puntos de la malla del modelo en la misma posición que se situarían las bandas (ver Figura 8).

En función de los movimientos de estos puntos monitorizados, mediante las subrutinas matemáticas de cálculo adecuadas, se puede obtener la deformación longitudinal de cada una de las bandas simuladas. Al aplicar la formulación incluida en el apartado 3 del artículo a estos valores medidos se puede estimar el cortante en la sección donde se sitúa la banda.

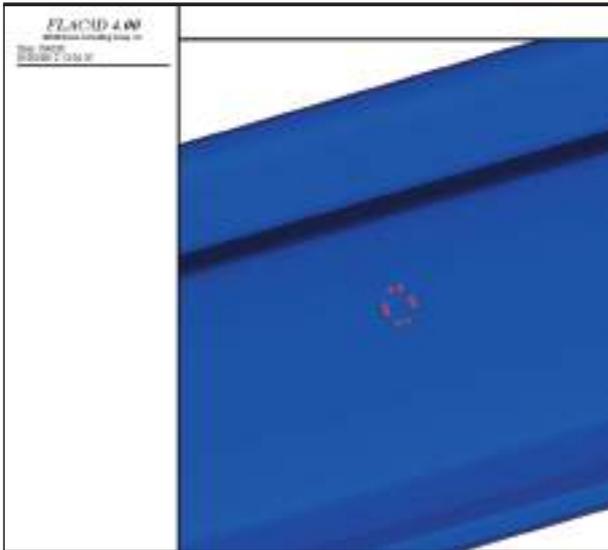


FIGURA 8. Vista de detalle de los puntos de la malla que simulan los puntos de pegado de las bandas en el carril.

Por otro lado, se puede considerar que el cortante que actúa en una sección como $Q = \sum \tau_i A_i$, siendo τ la tensión tangencial que existe en cada zona y A_i su área contributiva. Este valor de Q puede ser considerado el cortante real-

mente existente en cada sección ya que es la simple sumatoria de las fuerzas unitarias verticales en las caras verticales de las distintas zonas que conforman la sección monitorizada.

Se han realizado dos diferentes modelos, aplicando la carga tanto de forma centrada como descentrada. En ambos modelos, se ha simulado que la posición de las bandas extensométricas se han ido variando a lo largo del eje del carril, obteniéndose para cada posición estudiada de bandas tanto el cortante que se obtendría con la metodología expuesta en el apartado 3 (línea de color rojo en las Figuras 9 y 10) como el cortante obtenido como sumatorio de fuerzas unitarias (línea de color azul).

En las figuras anteriores se puede ver como hay una zona próxima a la carga donde el cortante que se obtendría aplicando la formulación $Q_{re} = 0.34688r$ (que lleva implícita la teoría de vigas) se diferencia notablemente del cortante real que sería el correspondiente al sumatorio de fuerzas elementales.

Sin embargo, en ambos casos, basta que las bandas estén separadas a unos 5 cm de la carga, para que los errores cometidos empleando las bandas sean muy reducidos, y a 10 cm despreciables.

En las figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos en el caso de que las bandas se hayan pegado por error en una fibra que no coincide con la fibra neutra. Según se puede ver en los resultados, los errores de medida empleando el método de las bandas son muy pequeños. Esto es debido a que la distribución de tensiones tangenciales, y por

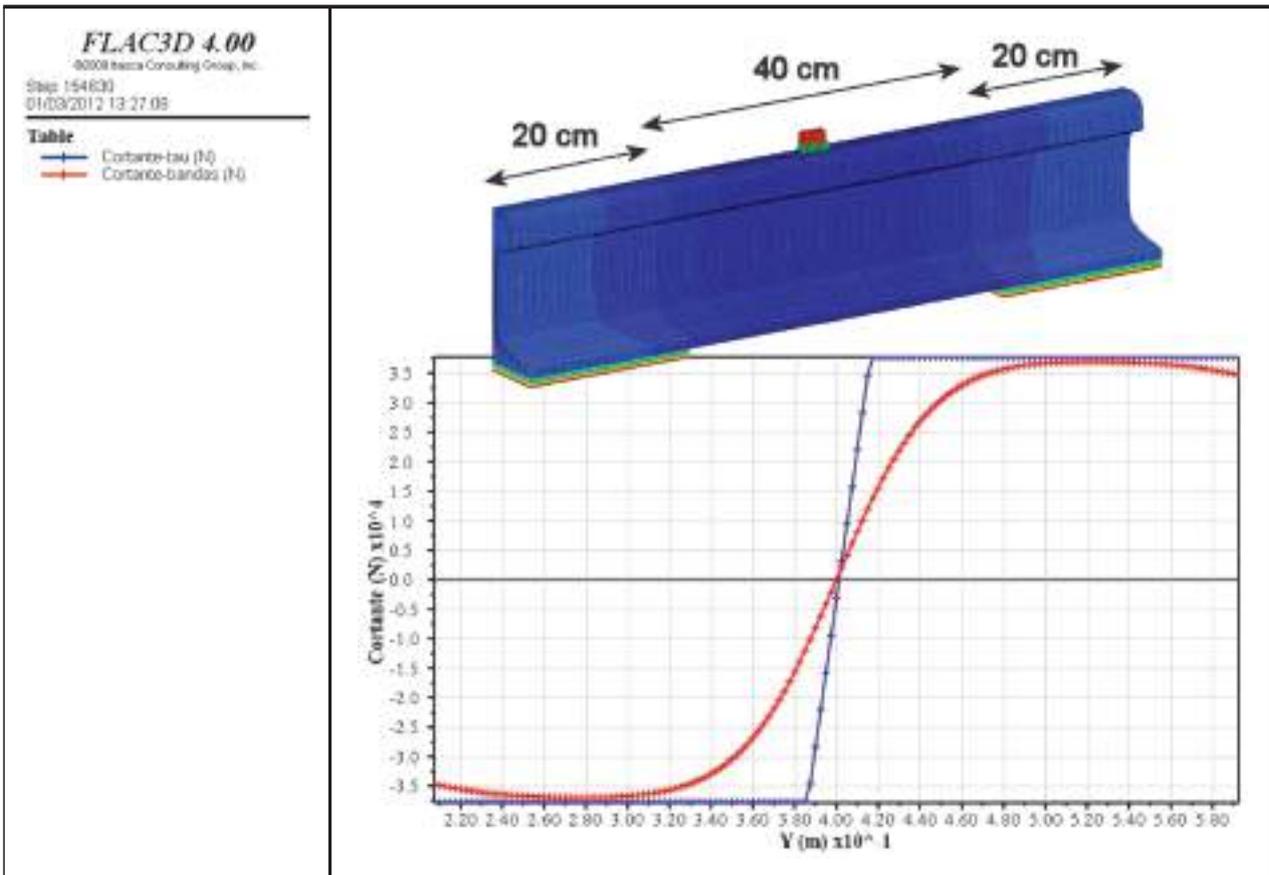


FIGURA 9. Distribución del cortante real y del cortante registrado por las bandas. Carga centrada.

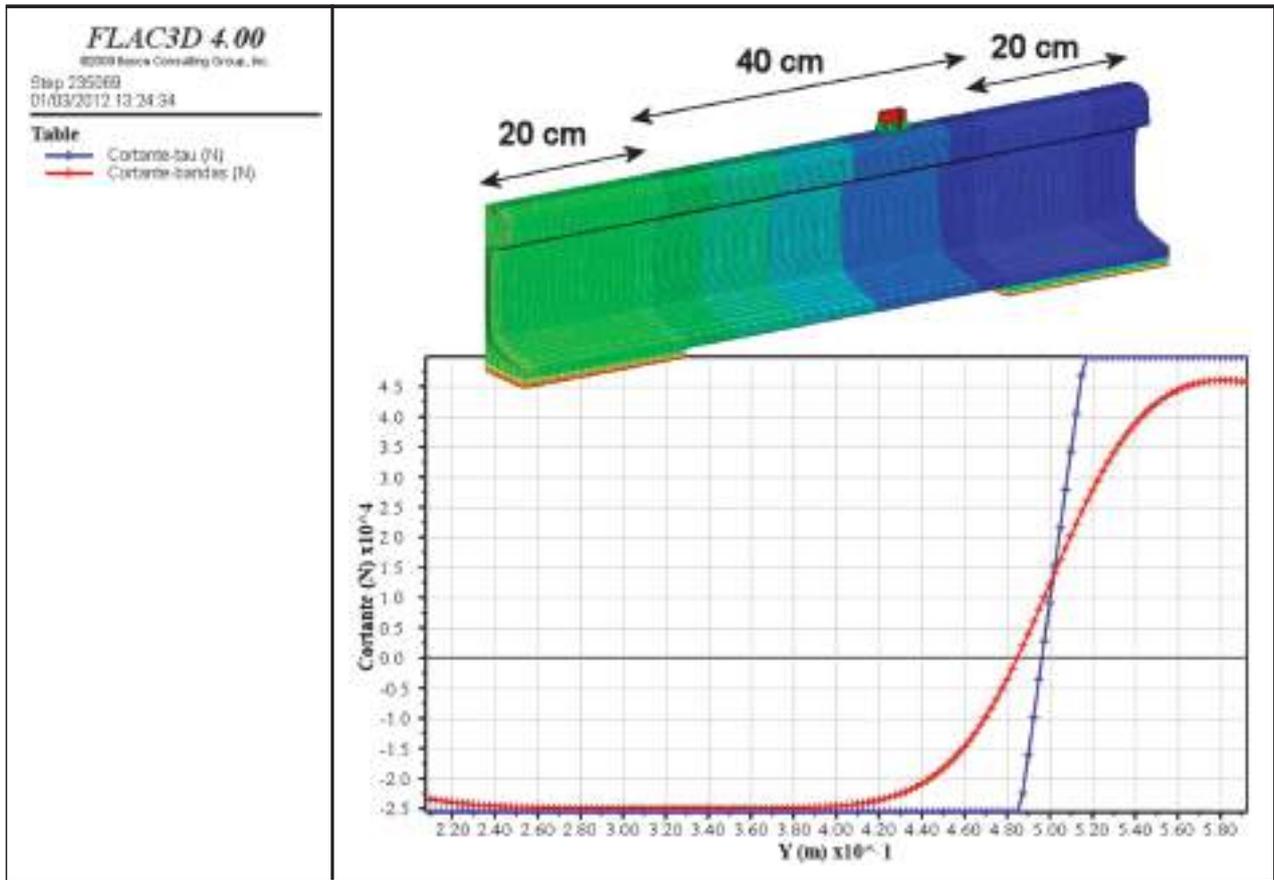


FIGURA 10. Distribución del cortante real y del cortante registrado por las bandas. Carga descentrada.

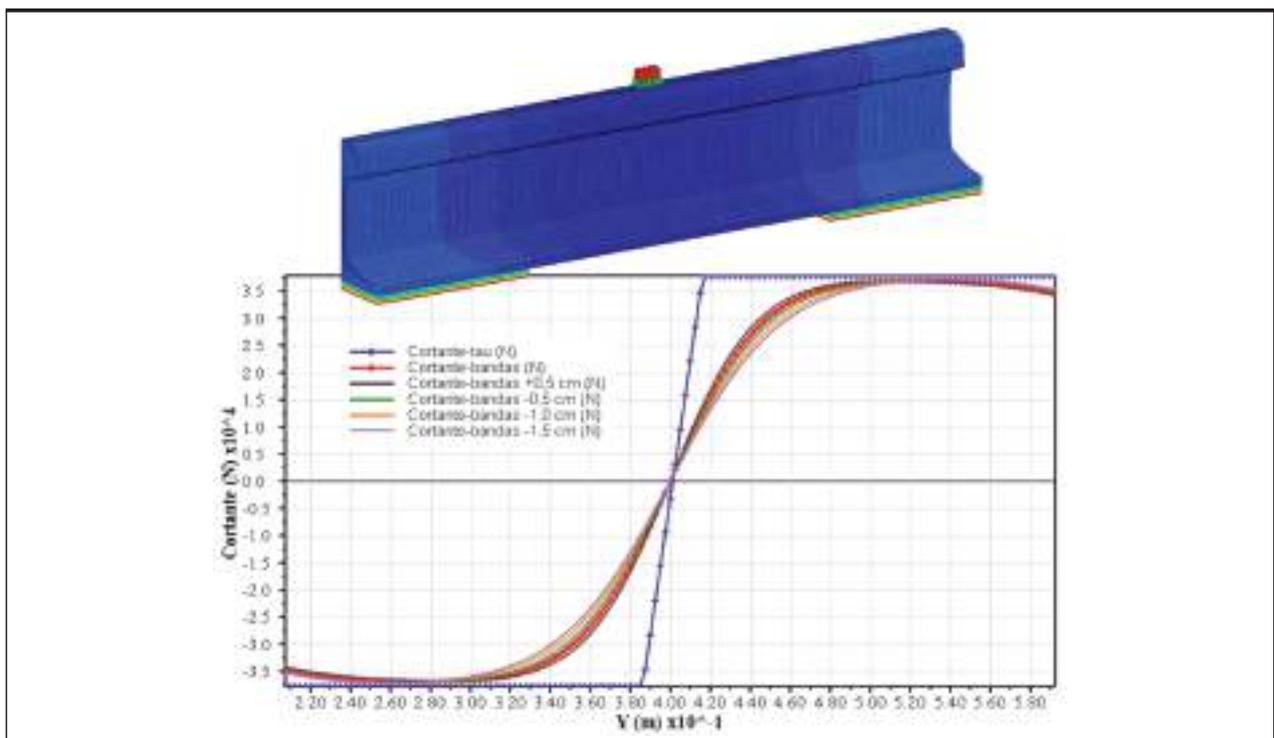


FIGURA 11. Efecto del error en la colocación de las bandas. Carga centrada.

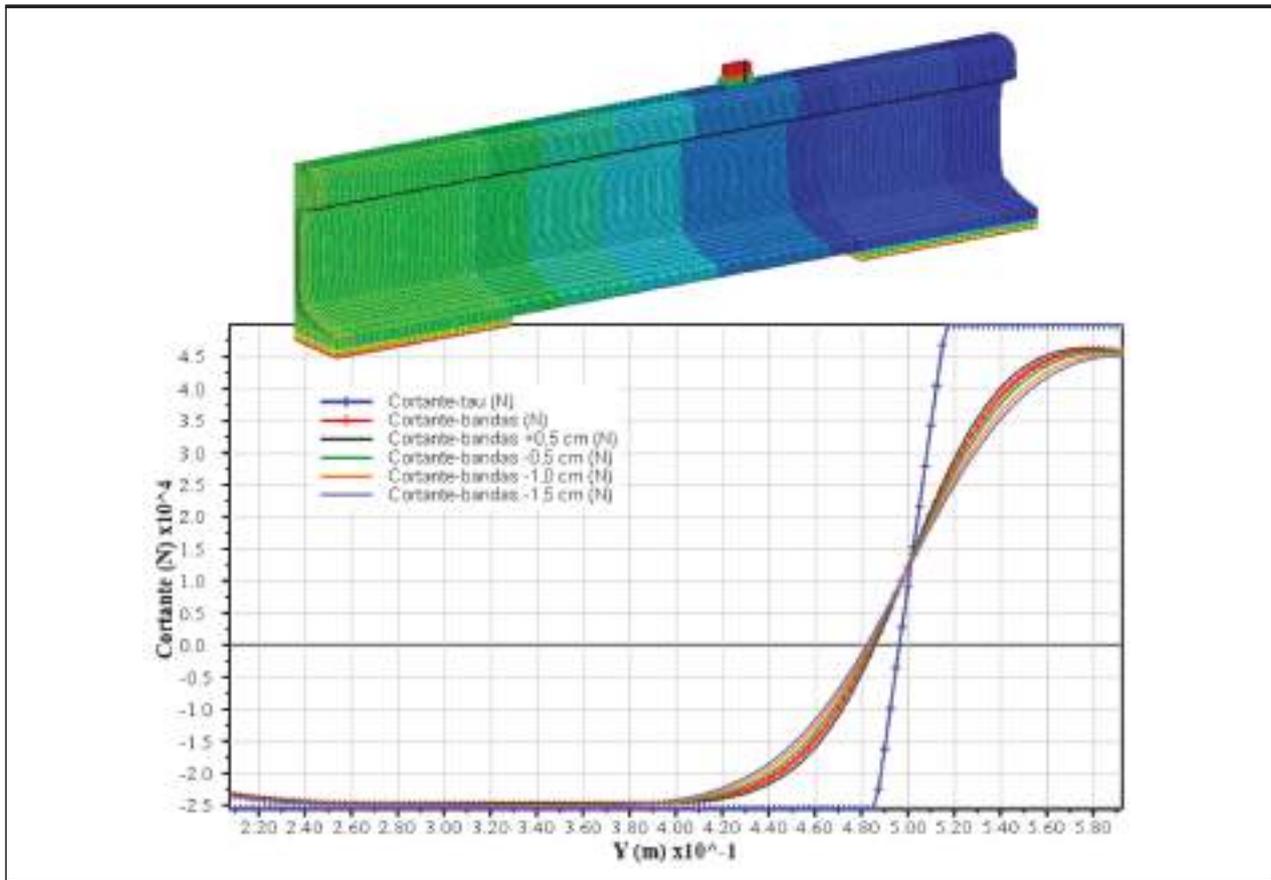


FIGURA 12. Efecto del error en la colocación de las bandas. Carga descentrada.

ende las deformaciones angulares asociadas, presenta una forma parabólica que en la zona de la fibra neutra tiene un valor con una reducida variación.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente artículo se expone la metodología que emplea el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en las medidas de la carga de las ruedas aplicadas en un carril. Se indican con precisión los pasos necesarios para la materialización del pegado en el carril, procedimiento éste que se ha ido optimizando en las muy numerosas secciones instrumentadas hasta la fecha.

Se indica también la metodología matemática que se emplea en el proceso seguido desde que se registran los datos

con las bandas instaladas hasta que se determina la carga que aplica cada rueda al carril.

También se comprueba mediante un modelo numérico que siempre que las bandas extensométricas estén separadas más de 5 cm de la carga aplicada, el valor registrado coincide sensiblemente con el valor real.

Por este motivo se puede concluir que, situando las bandas entre traviesas separadas 30 cm, el cortante máximo registrado que se obtiene en cada banda coincide con el valor real, por lo que la composición de los máximos de ambos registros permite obtener la carga de la rueda.

Por último también se analiza la influencia de la posición de las bandas respecto a la fibra neutra en los resultados obtenidos y se concluye que su influencia, siempre que se sitúe en un entorno de +0,5 y -1,5 cm, es reducida.