



Determinación de los parámetros definitorios de la BLS mediante mediciones indirectas

Apellidos, nombre	Salvador Zuriaga, Pablo (pabsalzu@cam.upv.es) Villalba Sanchis, Ignacio (igvilsan@cam.upv.es) Insa Franco, Ricardo (rinsa@tra.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

Actualmente, la gran mayoría de las vías férreas emplean carriles soldados de gran longitud, lo que permite mejorar la seguridad y el confort del tráfico al no existir juntas entre carriles. El sistema de vía caracterizado por tener los carriles soldados en una longitud ilimitada se conoce como Barra Larga Soldada (BLS) o Carril Continuo Soldado (CCS). No obstante, para conseguir un correcto funcionamiento de la BLS, resulta fundamental que el emparrillado de vía, constituido por los carriles, las traviesas y las sujeciones, tenga impedidos los movimientos en el plano horizontal. Esto se consigue, entre otros aspectos, mediante un correcto embebido de dicho emparrillado en el lecho de balasto.

En los sistemas de BLS, únicamente los extremos de las barras experimentan dilatación y contracción. Las ecuaciones que definen el problema, basadas en la mecánica clásica, se apoyan en parámetros como la resistencia longitudinal de la vía, la temperatura de tensiones libres y la posición de la punta de los carriles cuando la barra esta liberada de tensiones. Sin embargo, estos parámetros son de difícil medición directa, por lo que, habitualmente, se emplean valores teóricos o valores de proyecto. Ante este panorama:



¿Qué ocurre si, con el paso del tiempo, los valores de los parámetros anteriores han variado?

¿Existe algún método para medir estos parámetros de manera indirecta?

En los siguientes apartados se expone un método para solventar este problema.

2 Objetivos

Una vez que el alumno haya leído con detenimiento este documento, será capaz de:

- Entender el fenómeno físico que subyace en la BLS
- Conocer la importancia de los parámetros que definen el problema de la BLS
- Determinar el valor de dichos parámetros de manera indirecta, a partir de la medición de temperaturas y desplazamientos de la punta de la BLS

3 Introducción

La BLS puede modelarse como una viga sometida a esfuerzos térmicos (dilatación y contracción) que tiene los desplazamientos laterales y verticales totalmente coaccionados. En la dirección longitudinal, existe una zona central donde los esfuerzos en una rebanada de la viga son de igual magnitud y de sentido opuesto, por lo que se anulan, resultando igualmente nulos los desplazamientos. En los extremos de la barra, conocidos como zonas de respiración, el esfuerzo axial se transmite del carril a las traviesas a través de las sujeciones elásticas. A su vez, las traviesas transmiten este esfuerzo al balasto y al terreno a través de la fricción de las caras inferiores y de la movilización del empuje pasivo de las caras verticales. La Fig. 1 muestra el esquema de transmisión de esfuerzos en las zonas de respiración en un fragmento aislado de vía situado en dicha zona, mientras que la Fig. 2 muestra el esquema completo de la BLS.

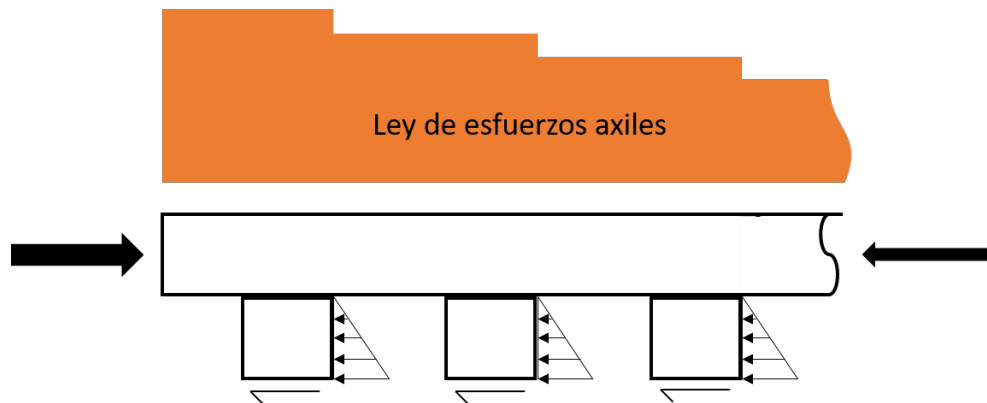


Fig. 1. Absorción de los esfuerzos axiles del carril por el balasto y variación de la ley de dichos esfuerzos a lo largo de la zona de respiración

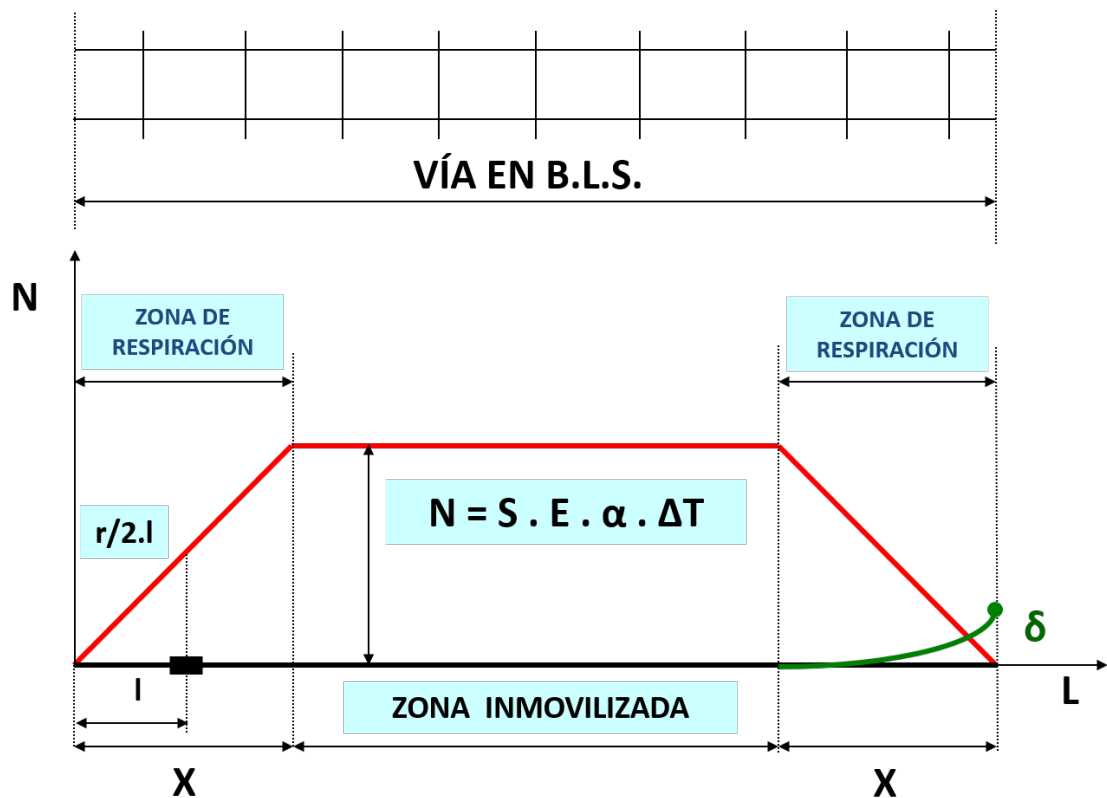


Fig. 2. Esquema de la Barra Larga Soldada. Zona inmovilizada y zonas de respiración

Tal y como aparece en la Fig. 2, el esfuerzo axial en la zona inmovilizada generado por una variación de temperatura viene determinado por la Ec. (1)

$$N = S \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T = S \cdot E \cdot \alpha \cdot (T - T_0)$$

(1)

Donde N es el esfuerzo axial, S es la sección del carril, E y α son el módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación térmica del acero, respectivamente, mientras que ΔT representa la variación de temperatura respecto de la temperatura

de anulaci3n de tensiones. Por su parte, la longitud de la zona de respiraci3n se obtiene a trav9s de la siguiente expresi3n:

$$X = \frac{N}{r} = \frac{N}{K} \quad (2)$$

Donde r es la resistencia longitudinal del emparillado de v3a por unidad de longitud y $K = r/2$ es la resistencia que tributa sobre uno de los dos carriles de la v3a.

En estas condiciones, la dilataci3n de la punta de la BLS, δ , se determina a partir de la integraci3n de las deformaciones unitarias que experimenta cada rebanada del carril situada en la zona de respiraci3n. Viene dada por la siguiente expresi3n:

$$\delta = \frac{K \cdot X^2}{2 \cdot S \cdot E} \quad (3)$$

En la Ec. (3), todos los par3metros han sido definidos previamente.

Con estas tres ecuaciones, el problema de la BLS queda completamente definido. No obstante, como se ha indicado en el primer apartado, el valor que toma el par3metro de resistencia longitudinal de la v3a, en la realidad, depende de muchos factores. Algunos de ellos son la compactaci3n y la forma de la banqueta de balasto, la forma de las piedras que la componen y el peso por unidad de longitud del emparillado de v3a. En la pr3ctica, el valor real resulta muy complicado de determinar, dado que ser3a necesario realizar ensayos dinamom9tricos sobre el propio emparillado de v3a. Esto, a su vez, implicar3a el corte (y posterior soldadura) de los carriles y el cierre temporal de la v3a, con la correspondiente afecci3n al servicio ferroviario.

Bajo estas premisas, a la hora de calcular una BLS, se obtiene en primer lugar la temperatura de neutralizaci3n, es decir, aquella a la que la v3a deber3a tener tensiones y esfuerzos nulos. A partir de ah3, y suponiendo un valor te3rico de resistencia longitudinal de la v3a, r , que habitualmente se encuentra alrededor de los 10 kN/m, se obtienen el resto de par3metros.

A ra3z de estas hip3tesis y procedimientos, surgen las siguientes preguntas:



¿C3mo se puede comprobar si la resistencia longitudinal de la v3a asumida en el proyecto es la que realmente se ha materializado?



¿C3mo se puede controlar que la temperatura de neutralizaci3n elegida en proyecto realmente corresponde con la temperatura de tensiones nulas de la v3a construida?

¿Existe alg3n m9todo para monitorizar la estabilidad de estos par3metros a lo largo del tiempo?

En el siguiente apartado, explicaremos un m9todo para calcular una aproximaci3n de estos valores de forma indirecta a partir de la medici3n en campo de las temperaturas en el carril y de las respectivas dilataciones de la punta de la BLS.

4 Desarrollo

4.1 Planteamiento teórico

Sustituyendo la expresión del axil de la Ec. (1) en la Ec. (2), e introduciendo la expresión resultante de X en la Ec. (3) se llega a la siguiente ecuación:

$$\delta_i - \delta_0 = \frac{\alpha^2 S E (T_i - T_N)^2}{2 K} \quad (4)$$

En la Ec. (4), también se ha sustituido el desplazamiento neto de la punta de la BLS, δ , por la diferencia de longitudes de la BLS medidas desde un punto arbitrario. De este modo, δ_i , se correspondería con la distancia de la punta de la BLS al punto de referencia cuando la BLS se encuentra a temperatura T_i . Análogamente, δ_0 , correspondería a la distancia de la punta de la BLS al punto de referencia cuando la BLS se encuentra a temperatura T_0 , es decir, libre de tensiones.

De la Ec. (4), los parámetros que resultan más fácilmente medibles son los pares de valores (T_i, δ_i) . Así, suponiendo desconocidos los parámetros T_0 , δ_0 , y K , mediante la lectura de 3 pares de puntos (T_i, δ_i) podría determinarse el valor de los mismos. En efecto, si sustituimos en la Ec. (4) los pares de temperatura y desplazamiento por tres pares de valores diferentes, obtendríamos tres ecuaciones con tres incógnitas, que constituye un sistema compatible determinado. Operando y resolviendo dicho sistema, se llegaría a la siguiente solución:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_0 = \frac{1(\delta_3 - \delta_2)(T_1^2 - T_3^2) - (\delta_3 - \delta_1)(T_3^2 - T_2^2)}{2(\delta_3 - \delta_1)(T_2 - T_3) - (\delta_3 - \delta_2)(T_1 - T_3)} \\ K = \frac{\alpha^2 S E}{2(\delta_3 - \delta_2)} (T_3^2 - T_2^2 + 2 T_0(T_2 - T_3)) \\ \delta_0 = \delta_i - \frac{\alpha^2 S E (T_i - T_0)^2}{2 K}, \text{ donde } i = 1, 2, 3 \end{array} \right. \quad (5)$$

De esta manera, obtendríamos el valor real de los parámetros que rigen el fenómeno de la BLS.

4.2 Planteamiento práctico

En la práctica, no se toman 3, sino varios pares de temperaturas y desplazamientos, por lo que se tiene un sistema de ecuaciones incompatible, en el que el número de ecuaciones es superior al de incógnitas. La solución pasa entonces por obtener una aproximación de los valores de los parámetros T_0 , δ_0 , y K que mejor se ajuste a al conjunto de n pares $\{(T_1, \delta_1), \dots, (T_n, \delta_n)\}$ de valores observados. Esto proporciona mayor robustez a los valores obtenidos. Dicha aproximación se puede obtener mediante un ajuste de mínimos cuadrados. La cantidad a minimizar sería la suma de errores cuadráticos entre las lecturas reales y teóricas de los desplazamientos para cada temperatura. Viene dada por la siguiente expresión:

$$error = \sum_{i=1}^n (\hat{\delta}_i - \delta_i)^2 \quad (6)$$

donde δ_i representa los desplazamientos teóricos, calculados mediante la Ec. (4), y $\hat{\delta}_i$ las lecturas reales realizadas en campo.

Ejemplo práctico de aplicación mediante Solver de Excel

Supongamos que tenemos una vía en BLS con los siguientes valores:

T_0	32 °C	S	7,67E-03 m ²
δ_0	0,1 m	E	2,00E+08 kPa
K	5 kN/m	α	1,15E-05 °C ⁻¹

Tabla 1. Valores de los parámetros que definen la BLS

En principio, partimos de que, en realidad, los valores de la parte izquierda de la Tabla 1 son desconocidos. De hecho, estos valores son, precisamente, los que deseamos conocer. Por este motivo, se realiza en campo una serie de mediciones en campo de temperaturas y desplazamientos a lo largo del día o durante varios días. Dichas mediciones son las que se muestran en las 2 primeras filas de la Tabla 2.

Tª (°C)	5,0	8,0	9,0	10,0	12,0	16,0	20,0	25,0	29,0	33,0	37,0	40,0	42,0
$\hat{\delta}_i$ (mm)	114,8	111,7	110,7	109,8	108,1	105,2	102,9	101,0	100,2	100,0	100,5	101,3	102,0
δ_i (mm)	94,1	90,9	89,9	89,0	87,3	84,4	82,3	80,6	80,0	80,2	81,1	82,3	83,2

Tabla 2. Valores de temperatura y desplazamiento de la punta de la BLS medidos en campo, y obtenidos a priori con los valores de los parámetros supuestos inicialmente

El cálculo se realiza mediante la herramienta Solver de Excel. Para ello, los parámetros a modificar para obtener el mínimo deben contar con un valor de partida. En este caso, podemos suponer que la temperatura de neutralización, es decir, la teórica a la que no deberían existir esfuerzos térmicos en el carril, se estimó en 30 °C. Por su parte, la resistencia K se estimó en 4,5 kN/m, mientras que se sabe aproximadamente que la punta de la BLS cuando ésta se encuentra libre de tensiones se encuentra a unos 8 cm del punto de referencia que hemos tomado para medir el resto de desplazamientos, en el mismo sentido.

Con estos valores ($T_0 = 30$ °C, $\delta_0 = 0,08$ m y $K = 4,5$ kN/m), se obtienen unos valores calculados de δ_i que son los que se muestran en la tercera fila de la Tabla 2. Así, el error inicial, obtenido mediante la Ec. (6), es de 5325,0 mm².

Ejecutamos Solver, empleando como método de optimización el "GRG Nonlinear", dado que se trata de una función continua no lineal. Tras ejecutar los cálculos, los resultados que aparecen son los que muestra la Tabla 3. En dicha tabla, en el primer bloque aparecen los valores reales de la BLS, a priori desconocidos. En el segundo bloque aparecen los valores inicialmente supuestos para el cálculo y, en el tercer bloque, los valores que devuelve Solver tras el cálculo.

Valores reales		Valores inicialmente supuestos		Valores calculados	
T_0	32 °C	T_0	30 °C	T_0	31,999 °C
δ_0	0,1 m	δ_0	0,08 m	δ_0	0,0999 m
K	5 kN/m	K	4,5 kN/m	K	4,9997 kN/m

Tabla 3. Valores de los parámetros de la BLS reales, inicialmente supuestos y calculados por Solver



Se observa cómo Solver ha conseguido igualar prácticamente los valores calculados a los reales, reduciéndose el error calculado según la Ec. (6) a $3,78 \cdot 10^{-7}$ mm². Esto prueba la eficacia del método expuesto.

5 Conclusiones

A lo largo de los apartados anteriores se ha explicado el fenómeno de la BLS, su descripción a través de las ecuaciones basadas en la mecánica clásica y la influencia que tienen determinados parámetros en los resultados. También se ha observado cómo existen una serie de parámetros, como la temperatura de tensiones nulas, la posición de equilibrio de la punta de la BLS o la resistencia longitudinal de la vía, que son clave para la descripción del fenómeno y, sin embargo, son de difícil estimación en la práctica mediante métodos directos.

Para paliar este problema, se ha explicado un método de medición indirecta de dichos parámetros. Éste se basa en la obtención de valores de otros parámetros cuya medición resulta más sencilla, como es el caso de las temperaturas en el carril y los desplazamientos de la punta de la BLS respecto de un punto arbitrario tomado como origen. El procedimiento describe, en primer lugar, la obtención teórica de estos tres parámetros a partir de tres pares de valores de temperatura y desplazamiento. El cálculo de estos parámetros es posible a través del sistema de ecuaciones (5).

No obstante, en la práctica, puede y debe medirse un conjunto mayor de pares de datos. En esta situación, lo que se plantea es un sistema de ecuaciones incompatible, que se resuelve aplicando el método de los mínimos cuadrados. En el presente trabajo se ha mostrado un método práctico de resolución basado en la herramienta Solver de Excel. La realización de un ejemplo práctico ha permitido comprobar la validez del método propuesto.

Así pues, este procedimiento puede emplearse en las vías existentes para comprobar la validez de los parámetros de diseño de las BLS constituidas y su permanencia en el tiempo. Igualmente, puede emplearse para detectar cualquier anomalía en el funcionamiento de la BLS, derivada de una dilatación anómala de sus puntas, que pueda indicar una pérdida de resistencia longitudinal del emparrillado o un aumento del riesgo de pandeo de la vía.

6 Bibliografía

6.1 Normativa:

España. NAV 3-0-1.0. Carriles.- Barras largas.

España. NAV 7-1-4.1_2M1. Montaje de vía.- Neutralización y homogeneización de tensiones en la vía sin junta. (2ª ed.+M1)