

TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR
ESTRUCTURAS FERROVIARIAS I

Nombre del TP:

COMPORTAMIENTO DE UNA VIA FRENTE A
SOLICITACIONES VERTICALES

Docente: Ing. Fabián Pérgola

JTP: Ing. Agustín Sirolli

Estudiantes y Curso: De Biase, Eduardo Oscar
Delgado, Santiago Gastón

2º9ª

INDICE DE REVISIONES

<i>FECHA</i>	<i>OBSERVACIONES</i>	<i>FIRMA</i>
15/07/2020	Primera Entrega. Introducción. Objetivos. Alcance.	
28/10/2020	Segunda Entrega. Desarrollo. Conclusiones.	
04/11/2020	Tercera Entrega. Replanteo.	
18/11/2020	Cuarta Entrega.	

1. Introducción

Cuando un vehículo ferroviario se desplaza sobre la vía, dispone de seis grados de libertad correspondientes al desplazamiento en los tres ejes espaciales y sus respectivos giros. Como consecuencia natural de este movimiento y de la carga del vehículo sobre la vía, se generan solicitaciones o esfuerzos sobre la misma cuyo análisis tiene gran aplicación práctica.

El estudio del comportamiento mecánico de una vía férrea es el punto de partida para el dimensionamiento de los elementos de superestructura e infraestructura de la misma. Su respuesta al paso del material rodante queda determinada por la flexión de los rieles y los durmientes, dentro de un medio compresible constituido por el sistema balasto-plataforma-subplataforma.

Dentro de los fenómenos de interacción que existen entre rieles y material rodante, se analizarán particularmente los esfuerzos verticales, en concordancia con cierta calidad geométrica y parámetros del material rodante que circulará por la vía, previamente definidos.

2. Objetivo

El objetivo del presente trabajo consiste en analizar los esfuerzos característicos a los que se encuentran sometidos ciertos componentes de vía, y su incidencia en el dimensionamiento de los mismos, como forma de integrar los conocimientos de la asignatura al campo ferroviario, con la aplicación directa de los temas vistos durante el ciclo lectivo.

3. Alcance

El trabajo contempla el estudio analítico y gráfico de los esfuerzos característicos verticales generados en los componentes de vía desde un corte transversal, a partir de la presencia de los vehículos en la vía y su desplazamiento a través de ella, y de la transmisión vertical de dichos esfuerzos (figura 1).

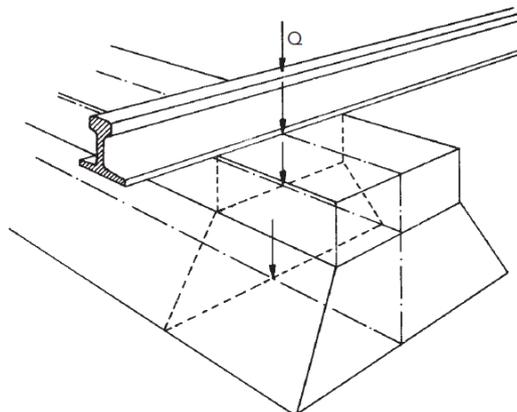


Figura 1: Transmisión vertical de esfuerzos en la vía.

Cabe señalar que, aunque la vía no solo es sometida a esfuerzos verticales sino también transversales, de cuyo análisis se determina la velocidad de circulación de las formaciones ferroviarias, y longitudinales, que pueden ocasionar pandeos perjudiciales, provocados por el proceso dinámico de arranque y frenado de trenes junto con las variaciones de temperatura dadas por fenómenos meteorológicos, tales sollicitaciones no serán tratadas en el presente trabajo.

4. Desarrollo

Tal como se aprecia en la figura 2, la vía férrea se encuentra constituida por dos estructuras principales:

- La infraestructura: compuesta por subplataforma y plataforma. En su parte superior se encuentra el Plano de Formación.
- La superestructura: formada por balasto, durmientes, rieles, y fijaciones.

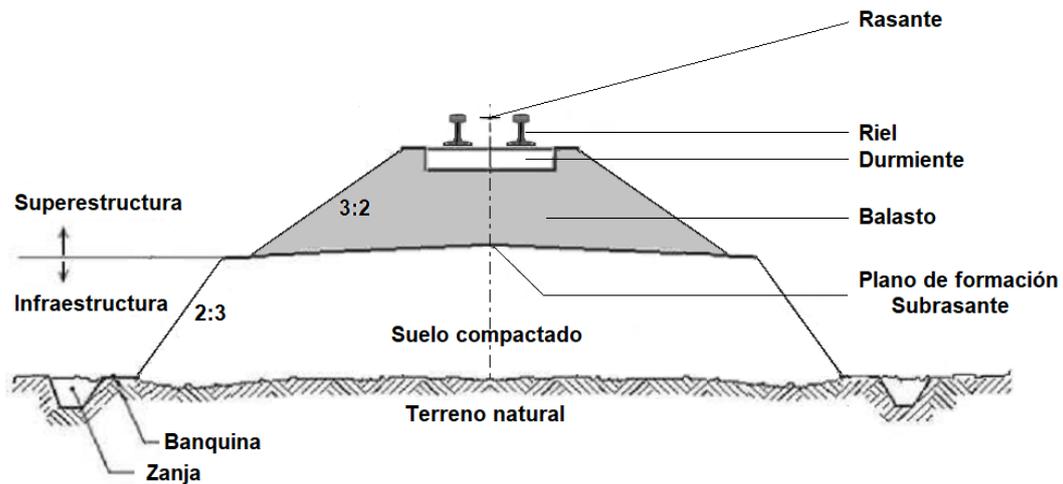


Figura 2: Perfil Transversal de Vía.
Medida de Trocha: 1,676 m (aplicable a FCGBM, FCGDFS, FCGSM, FCGR)

Este conjunto soporta desde un punto de vista mecánico, la acción de una serie de esfuerzos. Uno de los objetivos primordiales que se persigue con su análisis, es dimensionar los componentes de vía en función del material rodante a utilizar, las prestaciones máximas de velocidad y la configuración del trazado. Estas razones técnicas conllevan además motivos económicos que justifican el análisis, ya que los costos de implementación o de mantenimiento pueden llegar a ser considerables.

Clasificación de esfuerzos

1. Según su aplicación (figura 3):
 - 1.1. Verticales.
 - 1.2. Longitudinales.
 - 1.3. Transversales o laterales.

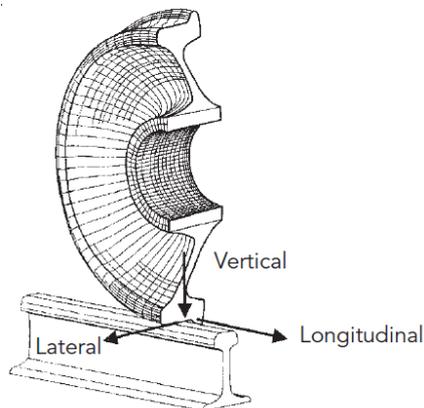


Figura 3: Tipos de esfuerzos generados en la vía, en el contacto rueda-riel.

2. Según la forma de aplicación de las cargas:
 - 2.1. Estáticos
 - 2.2. Cuasi-estáticos
 - 2.3. Dinámicos

Enfocaremos nuestra atención sobre los esfuerzos verticales, que se transmiten por las ruedas del material rodante a los rieles, y a través de ellos, a durmientes, balasto y plataforma. Para ello, realizamos las siguientes consideraciones:

- Los rieles se comportan como vigas continuas apoyadas sobre los durmientes.
- Si bien en todo trazado de vía existen tramos rectos y curvos, el análisis se enfocará exclusivamente en tramos rectos. Esto se debe a que las curvas poseen un peralte que depende del radio, por lo que debería estudiarse la descomposición de los esfuerzos, como se muestra en la figura 4, así como también la sobrecarga ejercida por la rueda exterior, para cada caso en específico. De lo contrario, el análisis presentado no denotaría la situación real.

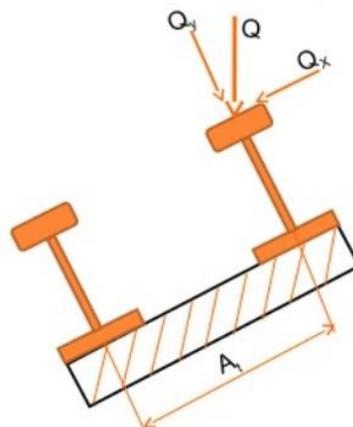


Figura 4. Diagrama de Descomposición de Carga Vertical en un Peralte.

- Se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:
 - a) Velocidad de circulación: 60 km/h de acuerdo con las condiciones operativas promedio del ramal.
 - b) Distancia entre durmientes: Para la Línea Sarmiento corresponde a 55 cm.
 - c) Peso por eje, que está dado por la distribución uniforme del peso total del coche –en formaciones de pasajeros– o vagones –para el caso de trenes de carga–. En cualquier caso, no deberá exceder el Peso Máximo por Eje, establecido en 22 Tn según norma de especificación FAT 4000 para nuestro país.
- Respecto al material rodante, consideraremos el que a la fecha de realización de este trabajo circula por las vías del Ferrocarril Sarmiento, provisto por *CSR Qingdao Sifang Co., Ltd.* con un Peso Máximo por Eje igual a: 17 Tn.
- De acuerdo con la Norma ALAF 5-022 para trocha ancha, aplicable a la línea férrea en estudio, la tolerancia de longitud de los durmientes oscila entre 2600 y 2800 mm, por lo cual consideraremos 2600 mm para durmientes de vía corrida, es decir excluyendo aparatos de vía en cuyo caso se observa un aumento progresivo de longitud, llegando a una dimensión de aproximadamente 4500 mm.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, analizaremos la descomposición del esfuerzo vertical global, recibido por el eje de la rueda -vale decir, la mitad del peso máximo por eje, al cual llamaremos A_{nom} , en los diferentes componentes de vía. De acuerdo con la siguiente figura, comenzaremos por la carga ejercida en el riel y finalizaremos con el momento flector producido en el durmiente.

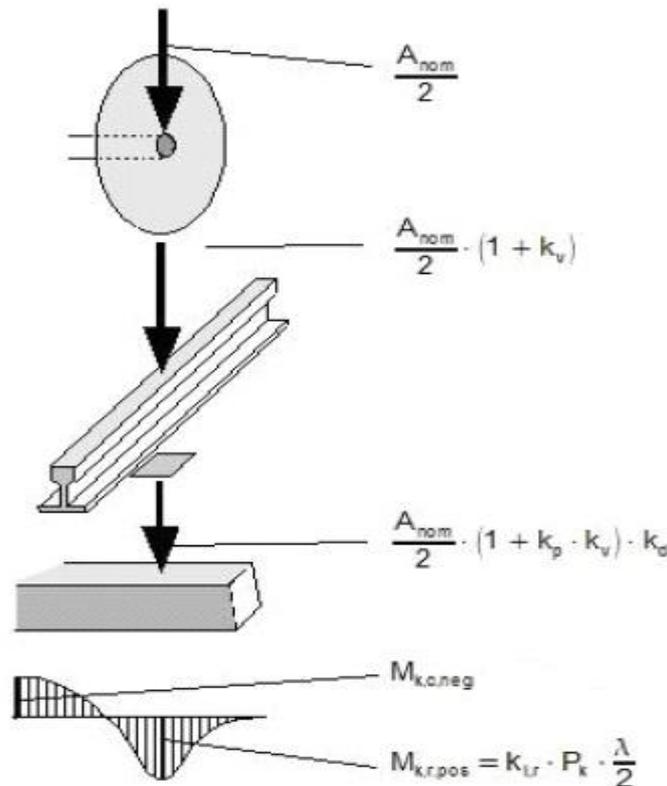


Figura 5. Descomposición del esfuerzo vertical global.

• Coefficiente dinámico de velocidad (k_v)

Para un trazado con defectos normales de alineación vertical, dicho valor se establece de acuerdo con el siguiente gráfico.

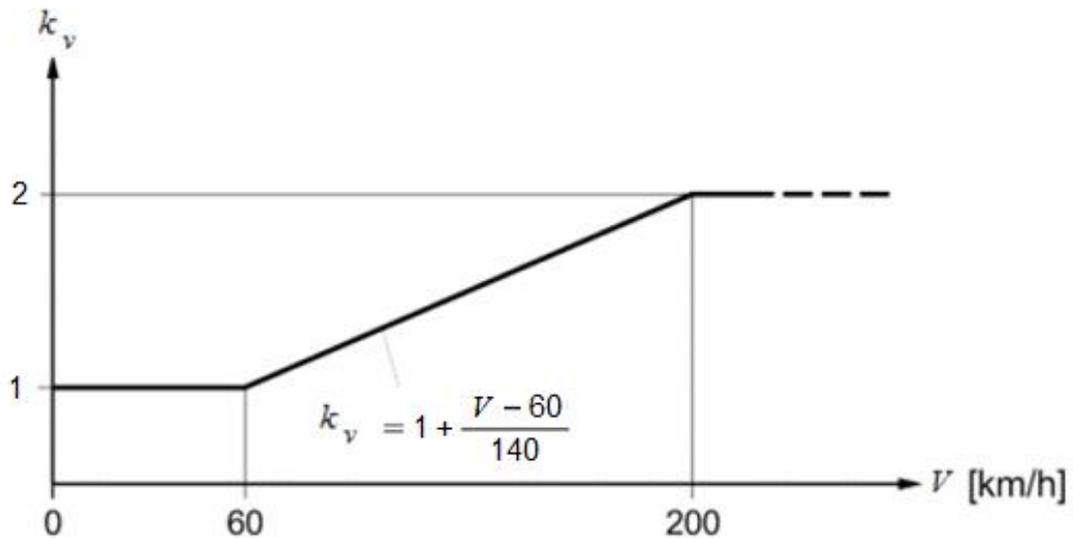


Figura 7. Factor k_v .

Cuanto mayor sea el nivel de mantenimiento que se le realiza a la vía, como ejemplo podemos citar líneas de alta velocidad, el valor de k_v tiende a bajar.

$$Q_{RIEL} = \frac{A_{nom}}{2} \cdot (1 + k_v)$$

$$Q_{RIEL} = \frac{167 \text{ kN}}{2} \cdot (1 + k_v)$$

$$Q_{RIEL} = 83,5 \text{ kN} \cdot \left[1 + 1 + \frac{V - 60}{140} \right]$$

Para una velocidad de circulación de 60 km/h, que es la establecida en el tramo Once-Moreno, la carga Q sobre el riel nos queda:

$$Q_{RIEL} = 83,5 \text{ kN} \cdot [1 + 1] = 167 \text{ kN}$$

Esfuerzo vertical recibido por el durmiente $\left(\frac{A_{nom}}{2} \cdot (1 + k_p \cdot k_v) \cdot k_d\right)$

• Factor de Atenuación (k_p)

Depende de los refuerzos que se hagan sobre la plataforma, por ejemplo agregado de celdas plásticas en conjunto con mallas geotextiles previo tendido del balasto, a efectos de aumentar la estabilidad del suelo y proporcionar mayor atenuación al paquete elástico de la vía.

Nivel de Atenuación	k_p
Baja: $\leq 15\%$	1,00
Media: 15% a 30%	0,89
Alta: $\geq 30\%$	0,78

Tabla I. Valores recomendables de k_p . Norma EN 13146-3.

Para nuestro análisis, dado que la Línea Sarmiento circula sobre balasto tendido en suelo natural, consideraremos una atenuación media.

$$k_p = 0,89$$

• Factor de Distribución de Cargas (k_d)

El factor de distribución de carga longitudinal depende de la separación entre dos durmientes consecutivos. Para una misma separación entre durmientes se obtienen dos factores de distribución de cargas a fin de determinar la envolvente de solicitaciones a las cuales se somete el durmiente en caso de que el suelo soporte sea rígido (coeficiente de balasto igual a 150.000 kN/m³) o blando (coeficiente de balasto igual a 50.000 kN/m³).

Tipo de Suelo	Expresión	Observaciones
Rígido (Vía en Placa)	$0,63 \cdot S + 0,133$	Se aplica en la determinación del momento bajo el asiento del riel y los esfuerzos de corte
Blando (Vía sobre Balasto en Suelo Natural)	$0,68 \cdot S + 0,054$	Se aplica en la determinación del momento en el centro del durmiente

Tabla II. Determinación analítica de k_d .

Siendo S, la distancia entre dos durmientes consecutivos. En el caso del Ferrocarril Sarmiento, utilizaremos la expresión correspondiente al tipo de suelo blando, para una distancia S establecida en 55 cm por la operadora ferroviaria SOFSE.

$$k_d = 0,68 \cdot 0,55 + 0,054$$

$$k_d = 0,428$$

El factor de distribución de cargas también puede determinarse mediante la siguiente figura:

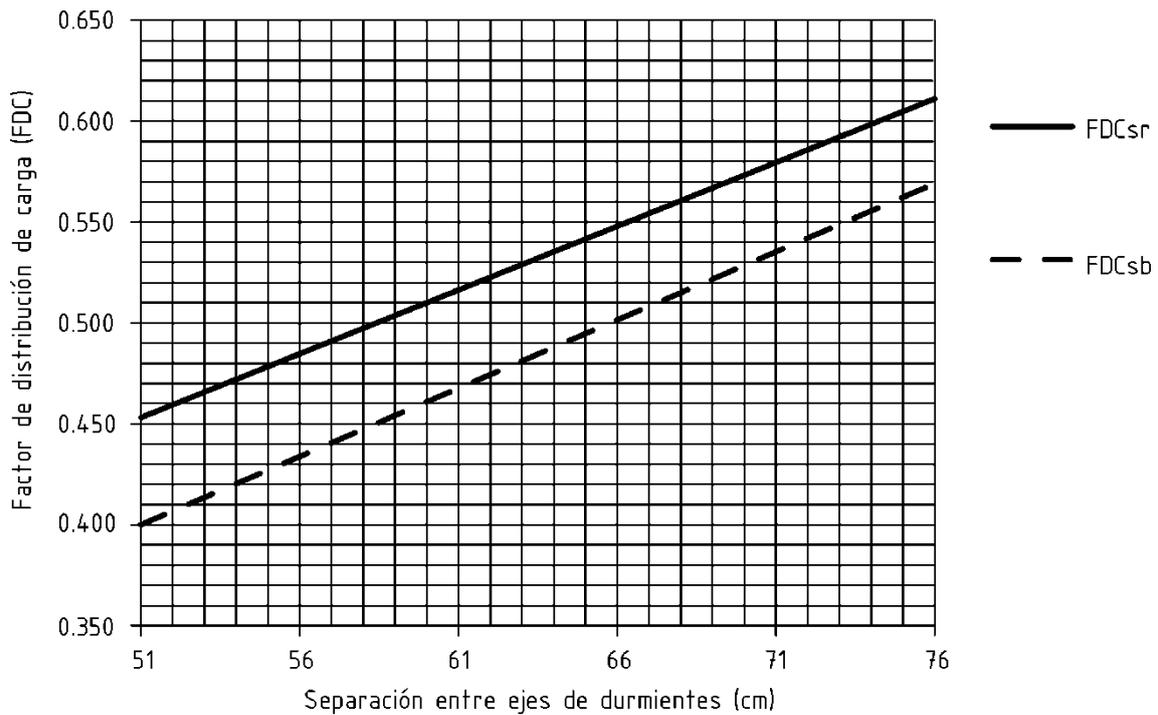


Figura 8. Gráfico de Factor de Distribución de Carga.

Con todos los coeficientes establecidos, podremos determinar la carga sobre el durmiente:

$$Q_{DURMIENTE} = Q_{RIEL} \cdot (1 + k_p \cdot k_v) \cdot k_d$$

$$Q_{DURMIENTE} = 167 \text{ kN} \cdot (1 + 0,89 \cdot 0,25) \cdot 0,428$$

$$Q_{DURMIENTE} = 87,379 \text{ kN}$$

Esfuerzo vertical transmitido hacia el balasto

- Factor de Influencia de Apoyos Deficientes (k_r)

Dado a que, en la práctica, la reacción de vínculo del balasto entre dos durmientes consecutivos no es uniforme, se introduce un incremento por apoyo deficiente incrementando la carga Q nominal sobre el durmiente hasta en un 35%.

$$k_r = 1,35$$

Con este coeficiente, y previo a iniciar el cálculo de momentos producidos, hallaremos la carga total P_k originada en el durmiente y que se transmite hacia el balasto de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_k = Q_{DURMIENTE} \cdot k_r$$

$$P_k = 87,379 \text{ kN} \cdot 1,35$$

$$P_k = 117,962 \text{ kN}$$

Momentos producidos en el durmiente (M_a, M_c)

Presentamos a continuación un modelo del durmiente con sus respectivas medidas.

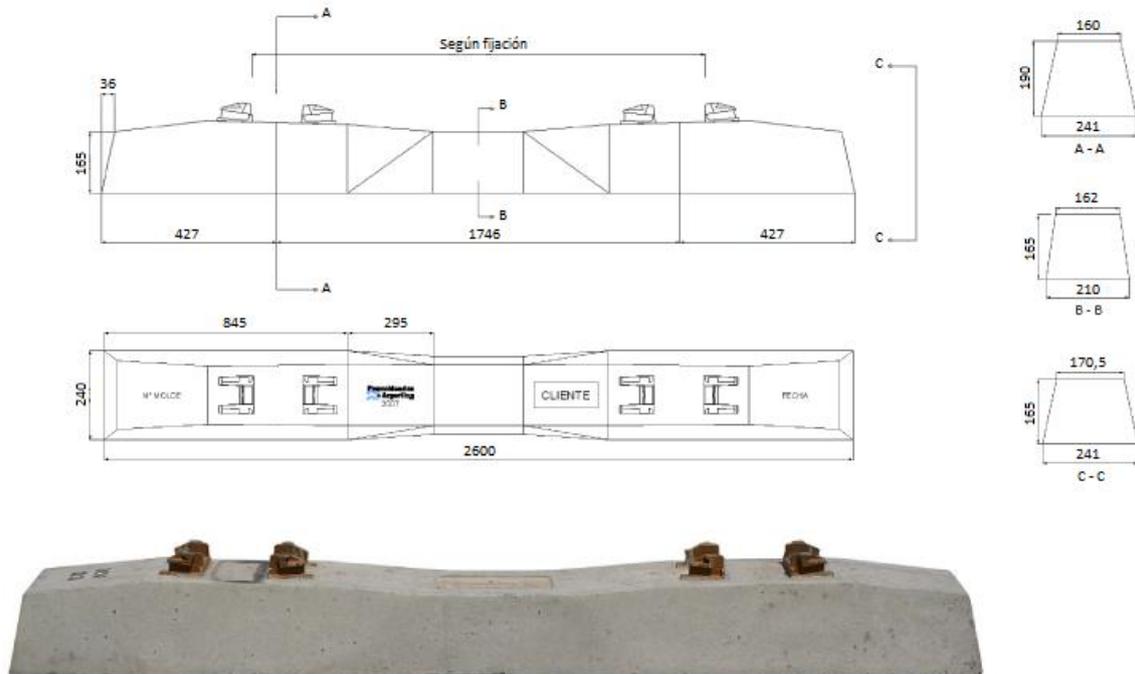


Figura 9. Durmiente Monoblock Hormigón Pretensado. Trocha Ancha (1676 mm).

Como veremos más adelante, se producirán momentos flectores máximos en dos partes del durmiente. Uno bajo el asiento del riel y otro en su sección central. La convención de signos adoptada para el cálculo se muestra a continuación:

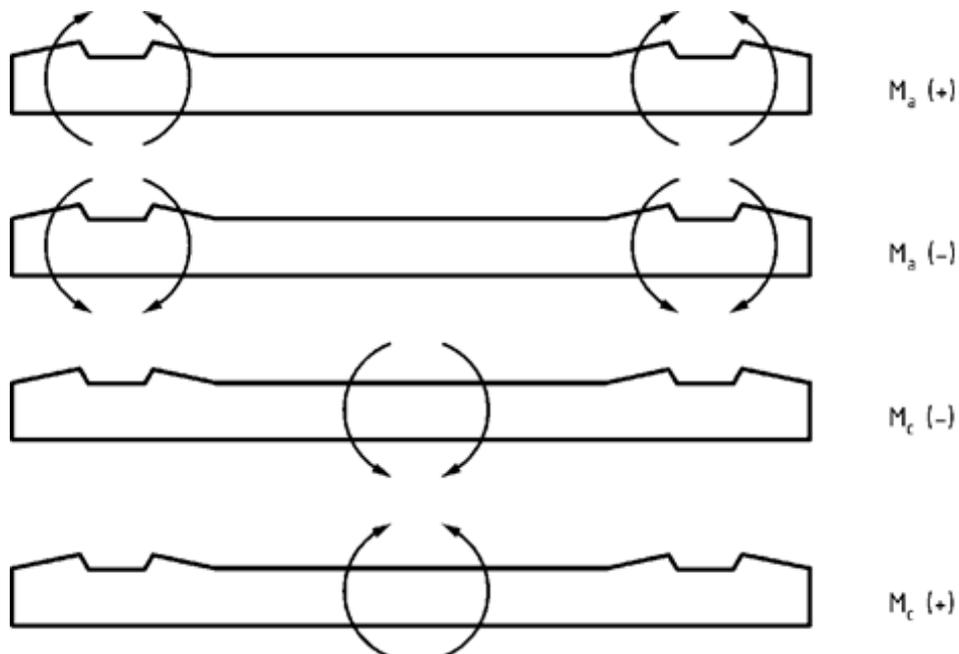


Figura 10. Convención de signos.

- a) **Momento flector bajo el asiento del Riel (Ma):** Utilizaremos el siguiente diagrama simplificado.

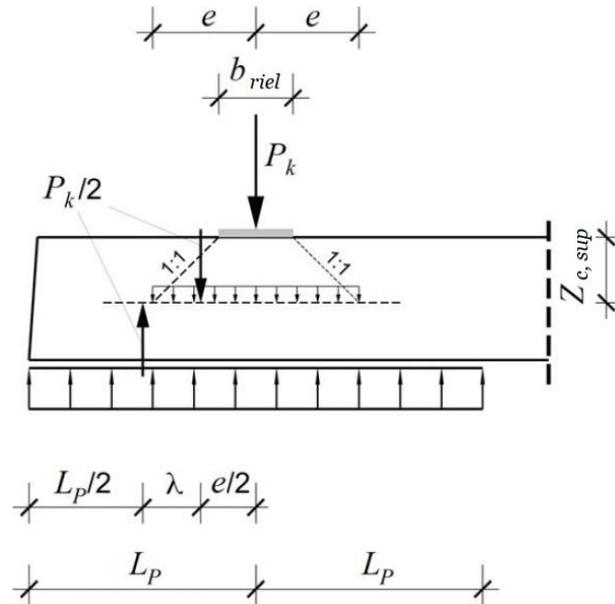


Figura 11. Diagrama Simplificado.

Y su correspondiente expresión:

$$M_{k,r,pos} = M_{a^+} = \left(\frac{P_k}{2} \cdot \lambda \right) \cdot k_{ir}$$

La distancia por donde se distribuye la carga en el hormigón debajo del patín del riel es:

$$2e = b_{riel} + 2 \cdot z_{c,sup}$$

Donde:

b_{riel} : ancho del patín del riel, igual a 140 mm (UIC 54E1)

$z_{c,sup}$: distancia desde el eje longitudinal baricéntrico del durmiente a su cara superior.



$$z_{c,sup} = \frac{2 \cdot \left[h \cdot \frac{(b-a)}{2} \cdot \frac{1}{2} \right] \cdot \frac{1}{3} \cdot h + a \cdot h \cdot \frac{h}{2}}{2 \cdot \left[h \cdot \frac{(b-a)}{2} \cdot \frac{1}{2} \right] + a \cdot h}$$

$$z_{c,sup} = 88,60 \text{ mm}$$

Reemplazando:

$$2e = b_{riel} + 2 \cdot z_{c,sup}$$

$$2e = 140 \text{ mm} + 2 \cdot 88,60 \text{ mm}$$

$$2e = 317,21 \text{ mm}$$

La distancia entre el borde exterior del durmiente y el riel es:

$$L_p = \frac{L - c}{2}$$

Donde:

L: longitud del durmiente

c: distancia entre centros de patín de riel (para trocha ancha igual a 1746 mm)

Para nuestro caso en estudio:

$$L_p = \frac{2600 \text{ mm} - 1746 \text{ mm}}{2} = 427 \text{ mm}$$

Se considera un valor aceptable de L_p a todo aquel que se encuentre comprendido en el intervalo $[350 \text{ mm}; 550 \text{ mm}]$ lo que permite establecer un coeficiente variación de la distribución de carga longitudinal entre durmientes debido a apoyos deficientes predeterminado $k_{ir} = 1,6$.

Debemos considerar también un coeficiente λ que representa las fuerzas internas y la reacción de vínculo del balasto actuando sobre el durmiente en la sección del apoyo del riel debido a P_k :

$$\lambda = \frac{L_p - e}{2}$$

$$\lambda = \frac{427 \text{ mm} - 158,60 \text{ mm}}{2}$$

$$\lambda = 134,20 \text{ mm}$$

Reemplazando valores el máximo momento flector *positivo* en el apoyo del riel es:

$$M_{k,r,pos} = M_{a^+} = \left(\frac{P_k}{2} \cdot \lambda \right) \cdot k_{ir}$$

$$M_{k,r,pos} = M_{a^+} = \left(\frac{117,962 \text{ kN}}{2} \cdot 0,1342 \text{ m} \right) \cdot 1,6 = 12,664 \text{ kNm}$$

Ahora, el máximo momento flector *negativo* en la sección del patín del riel, para un largo de durmiente entre 2500 y 2600 mm se asume en un 50 % del momento anterior calculado. Para durmientes más cortos se considera un 70%. Para nuestro caso:

$$M_{a^-} = -0,5 \cdot 12,664 \text{ kNm} = -6,332 \text{ kNm}$$

Finalmente, el momento flector máximo neto en la sección del patín del riel resulta positivo:

$$M_a = M_{a^+} + M_{a^-} = 12,664 \text{ kNm} - 6,332 \text{ kNm}$$

$$M_a = 6,332 \text{ kNm}$$

b) Momento flector sobre la Sección Central del Durmiente (Mc):

1) **Momento Flector Negativo.** Producirá tracción o disminuirá la compresión en la parte superior del durmiente.

Para hallar el momento flector negativo en el centro del durmiente se utiliza la siguiente expresión para durmiente angostado en el centro:

$$M_{k,c,neg} = M_{c^-} = Q_{d_2} \cdot \left[\frac{e}{2} - \frac{L}{2} + \frac{A_2 \cdot \frac{L^2}{8} + A_2 \cdot \left(h^2 + g \cdot h + \frac{g^2}{3} \right)}{A_1 \cdot \frac{L}{2} + A_2 \cdot (2h + g)} \right]$$

$$Q_{d_2} = k_d \cdot \Phi \cdot \frac{P_k}{2}$$

Referencias:

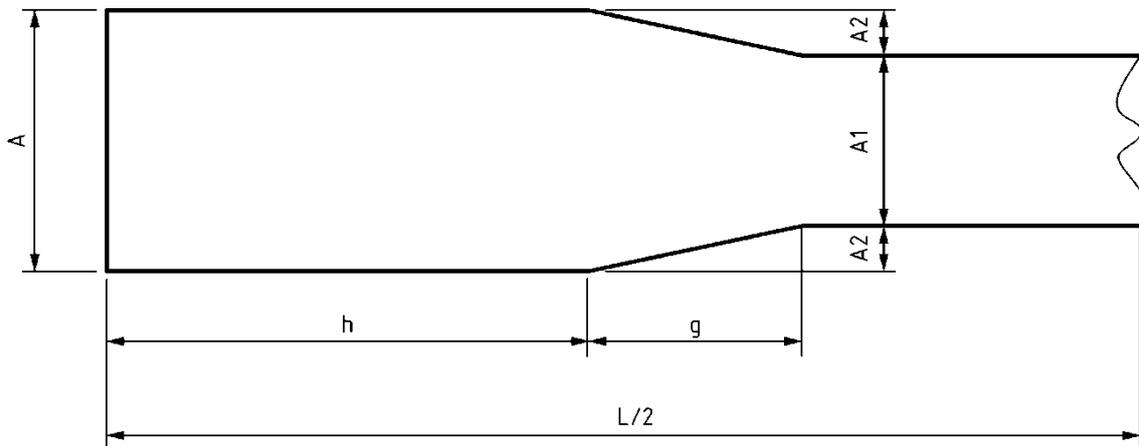


Figura 12. Vista en Planta de un Durmiente Angostado en el centro.

Donde:

- Q_{d_2} : Carga dinámica transmitida por la rueda al durmiente.
- $Q_{DURMIENTE}$: Carga soportada por el durmiente. (87,379 kN)
- k_d : factor de distribución de cargas en suelo blando. (0,428)
- e : distancia entre centros de patín de riel. (1746 mm)
- L : longitud de la base de apoyo del durmiente (2600 mm)
- A : ancho de la base de apoyo ensanchada del durmiente en balasto. (170,5 mm)
- A_1 : ancho de la base de apoyo angostada del durmiente en balasto. (162 mm)
- A_2 : ancho adicional de la base de apoyo del durmiente en la sección de apoyo del riel. (4,25 mm)
- h : longitud de la zona ensanchada en el extremo del durmiente. (845 mm).
- g : longitud de la zona de ancho variable. (295 mm).
- Φ : Coeficiente de Impacto, el cual se determina mediante la siguiente expresión.

$$\Phi = 1,165 + 3 \cdot n \cdot k_v$$
- k_v : coeficiente dinámico de velocidad, igual a 1.

- n : coeficiente de estado de infraestructura, el cual se determina de la siguiente manera.

n	Estado	TCI
0,1	Bueno a Muy Bueno	< 35
0,2	Regular	35 < TCI < 45
0,3	Malo a Muy Malo	> 45

Tabla III: Valor de coeficiente de estado de infraestructura.

- TCI: Track Condition Index, o valor de condición de trazado, se obtiene como la suma de los PCI -Parameter Condition Index, o valor de condición de parámetro de vía- de nivelación vertical, alabeo, trocha, y alineación horizontal. Tales valores de PCI se obtienen estadísticamente tomando tres veces el desvío estándar de todos los valores extremos relevados en campo para el parámetro en un tramo de vía de 500 metros de longitud.

Cuando no se disponen de los datos estadísticos que permitan determinar el TCI, en consecuencia, el valor de n y finalmente el coeficiente de impacto su valor queda homologado de acuerdo con la siguiente tabla.

Velocidad (km/h)	Estado de la infraestructura		
	Muy bueno	Regular	Malo
120	1,59	2,02	No Aplicable
80	1,51	1,85	2,19
60	1,47	1,77	2,07
40	1,47	1,77	2,07

Tabla IV: Valor homologado de coeficiente de Impacto (Φ)

Para el presente trabajo consideraremos un valor para coeficiente de impacto de acuerdo con una velocidad de circulación de 60 km/h y un estado de infraestructura regular, lo que homologa su valor en 1,77.

Reemplazando valores:

$$Q_{d_2} = k_d \cdot \Phi \cdot \frac{P_k}{2}$$

$$Q_{d_2} = 0,428 \cdot 1,77 \cdot \frac{117,962 \text{ kN}}{2} = 44,682 \text{ kN}$$

$$M_{c^-} = Q_{d_2} \cdot \left[\frac{1,746m}{2} - \frac{2,6m}{2} + \frac{0,00425m \cdot \frac{6,76m^2}{8} + 0,00425m \cdot \left(0,714m^2 + 0,249m^2 + \frac{0,087m^2}{3}\right)}{0,162m \cdot \frac{2,6m}{2} + 0,00425m \cdot (1,69m + 0,295m)} \right]$$

$$M_{c^-} = -18.842 \text{ kNm}$$

- 2) **Momento Flector Positivo.** Producirá tracción o disminuirá la compresión en la parte inferior del durmiente.

Para longitud de durmiente entre 2200 mm y 2600 mm, a partir del M_{c-} se tiene:

$$M_{c+} = -0,7 \cdot M_{c-} = -0,7 \cdot (-18,842 \text{ kNm}) = 13,189 \text{ kNm}$$

Finalmente, el momento flector máximo neto en la sección central del durmiente resulta negativo:

$$M_c = M_{c-} + M_{c+} = -18,842 \text{ kNm} + 13,189 \text{ kNm}$$

$$M_c = -5,653 \text{ kNm}$$

Gráficamente se obtiene:

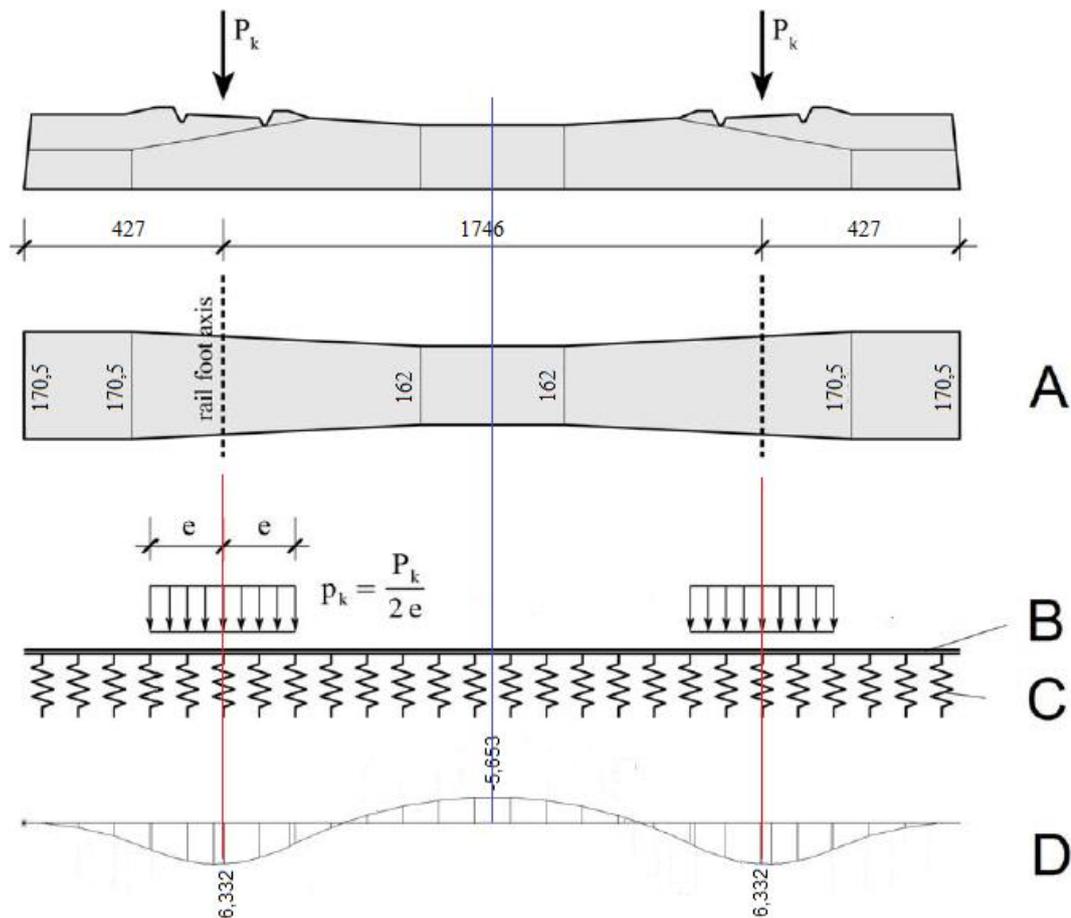


Figura 13. Representación Gráfica.

Referencias:

- A) Durmiente Monoblock. Vista Frontal y en Planta.
- B) Asiento Elástico del Riel
- C) Balasto
- D) Patrón de Momentos Flectores transmitidos

5. Conclusiones

El gráfico de momentos flectores determinado por los esfuerzos verticales debido a la circulación de la formación permite la confección de un modelo de distribución de presiones por debajo del durmiente hacia la plataforma.

En condiciones ideales dicho modelo de distribución de presiones debería mantenerse relativamente sin cambios durante todo el trazado. Sin embargo, en la práctica cobra especial importancia la identificación de aquellos puntos donde pueda variar significativamente dicho modelo de distribución de presiones. Justamente en dichos puntos, esas variaciones estarán dadas por un cambio de rigidez del paquete elástico de la vía.

¿Dónde se producen esos cambios de rigidez? En puntos fácilmente identificables.

a) Zonas de balasto de piedra colmatado.

Como consecuencia de deficiencias de mantenimiento, las deformaciones excesivas de la vía permiten el ingreso de agua que aumenta el efecto de bombeo. El mismo conlleva al ascenso de finos de la plataforma, lo que desemboca en el colmatado del balasto. Sus entresijos se llenan de agua lo que provoca grandes pérdidas de elasticidad.



Figura 14. Ascenso de finos de la plataforma a causa del efecto de bombeo.



Figura 15. Balasto colmatado por ascenso de finos.



Figura 16. Efecto de bombeo incrementado por ingreso de agua debido a deformaciones excesivas de la vía.

b) Pasos a nivel

Obsérvese en la siguiente figura, indicado con flecha el cambio de plataforma en el ingreso y egreso al paso a nivel sobre la Avenida Nazca.

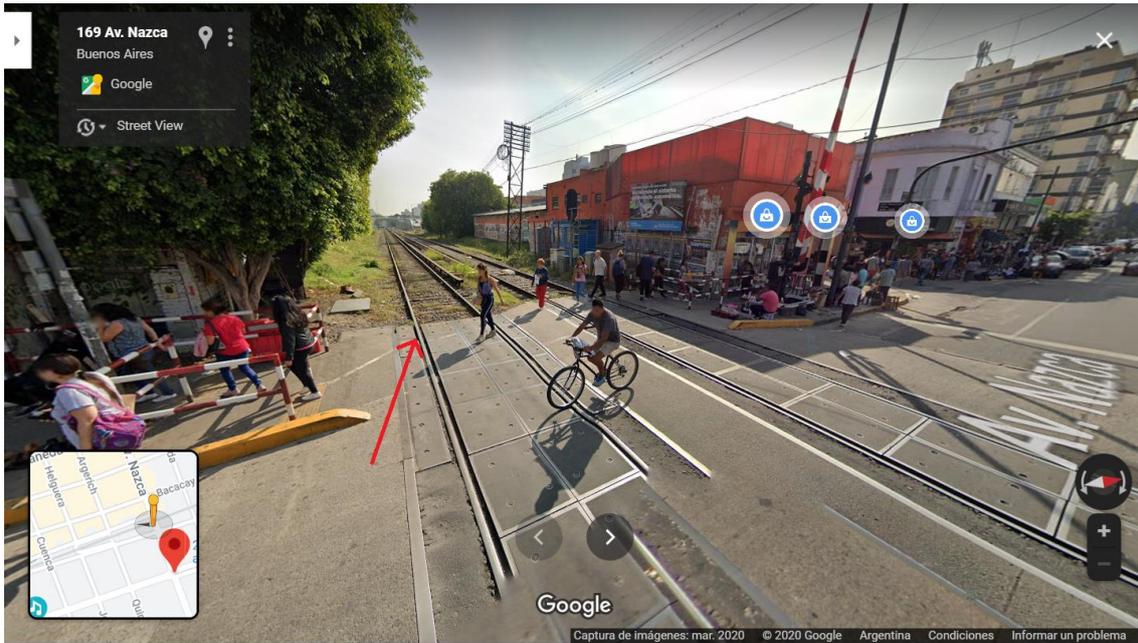


Figura 17. SOFSE. Línea Sarmiento. PAN Nazca. (Cortesía: Google Maps).

c) Ingreso y salida de obras de arte

Se denominan obras de arte a todo tipo de construcción complementaria a la infraestructura de vía que posibilita el franqueo de un obstáculo. Ejemplos de obras de arte son: puentes, túneles, cobertizos, etc. El ingreso y salida de las mismas constituyen zonas de cambio de elasticidad.

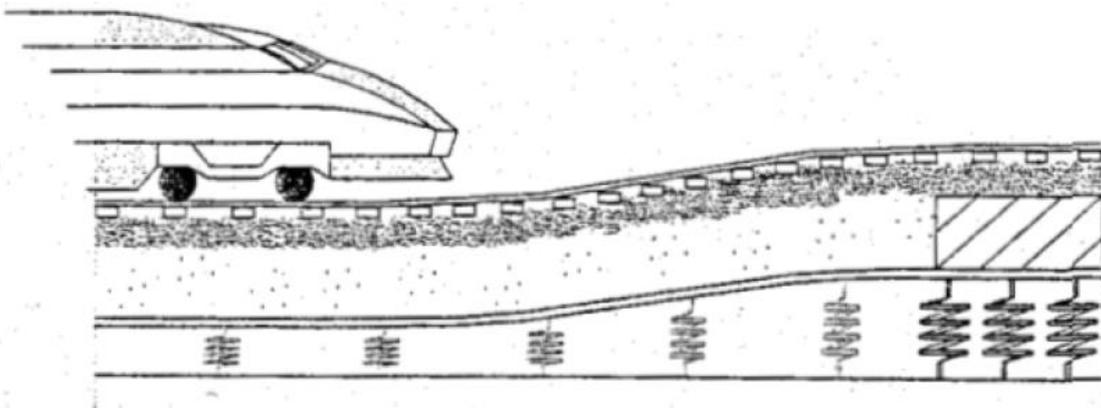


Figura 18. Paquete elástico en ingreso y salida de puentes y obras de arte.

d) Cambios en la tecnología constructiva

Por modificaciones en la configuración del terreno sobre el que apoya la vía.

En consecuencia, en pos de conseguir rodadura y guiado del material rodante en condiciones de seguridad y confort, cobra fundamental relevancia el estudio pormenorizado de los esfuerzos verticales a los que se encontrará sometida la estructura de vía, en función de las especificaciones de los materiales que la componen, la configuración del trazado, el material rodante que circulará por ella y las condiciones operativas reglamentarias, para así establecer un adecuado programa de inspección y mantenimiento de vía que mantenga compensada la rigidez en los puntos de variación previamente citados.

Para el caso de un nuevo trazado, los momentos flectores y su consecuente modelo de distribución de presiones posibilitará determinar si el suelo que sustentará la plataforma posee una tensión apta para soportar el trazado en condiciones operativas, también en lo que respecta al dimensionamiento de elementos tales como, por ejemplo: altura de la plataforma de balasto, tipo de durmiente y medidas, fijaciones. En el caso de que el suelo no sea apto debería considerarse, si no se deseara modificar el trazado, la utilización de otra tecnología constructiva como ser viaducto en placa.

6. Bibliografía

Manuales/Textos

- LÓPEZ PITA, Andrés. 2006. Infraestructuras ferroviarias. Ediciones UPC
- LICHTBERGER, Bernhard. 2007. Manual de vía. Hamburgo: Eurail Press.
- LÓPEZ, William. Ferrocarriles. Cálculo del Riel. Parte 1.

Normas

- ALAF 5-022.
- FA 7030. Norma para durmientes de hormigón pretensado tipo monobloque.
- IRAM. 1609-1. Norma para durmientes de hormigón pretensado tipo monobloque.
- Reglamento CIRSOC 201.
- UNE-EN 13230.

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Haedo

- Apuntes de la Cátedra de Introducción al Ferrocarril. Ing. Mariano Fernández Soler.

Páginas de Internet

- Wikipedia (Términos varios)
<http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>
- República Argentina. Decreto 9/2013. Ratificación Contrato Ministerio de Transporte y CSR Qingdao Sifang Co., Ltd.
<http://www.saij.gob.ar/>
- Premoldeados de Argentina S.A.
<http://premoldeados.com.ar/>