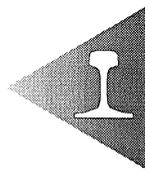


CÁLCULO DE PLATAFORMAS FERROVIARIAS MEDIANTE EL EMPLEO DE MODELOS MATEMÁTICOS AVANZADOS.



Manuel Cuadrado Sanguino; Pedro González Requejo y
Eduardo Romo Urroz

PROINTEC, S.A.

Avda. de Burgos, 12. 28036 - Madrid

Tfno: 91.302.57.66; Fax: 91.302.89.12

RESUMEN

El dimensionamiento de las capas de asiento de la plataforma ferroviaria tiene una importancia primordial tanto en el coste del proyecto como en el futuro comportamiento de la infraestructura frente a las cargas de tráfico que soportará durante su vida útil, lo que condiciona las necesidades de conservación, y en consecuencia, los costes de mantenimiento.

La acertada elección de la tipología estructural de las capas de asiento y de un eventual refuerzo, reviste especial interés en el caso de la adecuación de líneas existentes a nuevas exigencias de tráfico, con el aumento de las velocidades de circulación o la variación del número y naturaleza de las circulaciones ferroviarias.

En efecto, en estos casos, la naturaleza de la plataforma existente, y de eventuales capas superiores de la misma, son elementos que es necesario caracterizar y que el proyecto debe incorporar como datos de partida, no siendo posible escoger calidades específicas de los materiales que componen la plataforma, ni, en ocasiones, contar con una uniformidad a lo largo del trazado de la infraestructura.

Un método racional de dimensionamiento de las capas de asiento debe contemplar todos los aspectos de este complejo problema,

con las simplificaciones necesarias para permitir su aplicación práctica.

Esta ponencia presenta cómo la aplicación de una modelización avanzada de la infraestructura ferroviaria ha permitido establecer una metodología racional de diseño de las capas de asiento, aplicable en particular al mencionado problema del acondicionamiento de líneas existentes, pero también su aplicación al análisis de otros problemas vinculados al comportamiento mecánico de la misma.

1. ANTECEDENTES.

La aplicación de modelos matemáticos y métodos numéricos avanzados y, en particular el Método de los Elementos Finitos MEF, al análisis del comportamiento mecánico de infraestructuras ferroviarias sometidas a cargas de tráfico se generaliza a partir de inicios de los años 80, gracias a una notable expansión de la aplicación del MEF y al aumento de potencia de cálculo de los ordenadores.

Son de especial relevancia los trabajos desarrollados por la ORE de la UIC, y que se publicaron en 1983 en los diferentes informes de la "QUESTION D117: ADAPTATION OPTIMALE DE LA VOIE CLASSIQUE AU TRAFIC DE L'AVENIR" (ref. [1], [2], [3], [4], [5]). Dichos informes dan cuenta de los resultados obtenidos mediante la modelización MEF 3D del sistema completo de vía (carriles, traviesas, capas de forma y plataforma) y su aplicación al establecimiento de unos ábacos y unas tablas para el dimensionamiento de las capas de asiento.

A partir de 1994, y bajo la dirección de la DGITF, PROINTEC retoma y desarrolla esta metodología, empleando un programa de cálculo basado en el MEF con una modelización 3D y leyes de comportamiento elastoplástico, estableciendo contacto con organismos y técnicos que participaron en el desarrollo de los trabajos de la ORE, y completando la documentación existente al respecto (ref [6], [7], [8]).

Esta metodología ha sido desarrollada y empleada para el dimensionamiento de las capas de forma y, en particular para la determinación de la necesidad y del espesor de las capas de refuerzo necesarias (de subbalasto) en varios proyectos de acondicionamiento de líneas existentes. Sin embargo, la aplicación del MEF de la infraestructura ferroviaria permite, además de esta importante aplicación, obtener resultados y estudiar otros problemas de diseño que se desarrollan más adelante.



2. APLICACIÓN DEL MEF. RESUMEN DE LA METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO DE LAS CAPAS DE ASIENTO.



La metodología de dimensionamiento puede sintetizarse en las siguientes pasos fundamentales:

- a) la modelización matemática del comportamiento mecánico de la infraestructura frente a la acción de las cargas de tráfico (método MEF) y la consideración de la degradación de la plataforma que produce un número elevado de cargas (ley de Dormon)
- b) la caracterización de las cargas ferroviarias, (con evaluación de las cargas dinámicas)
- c) la caracterización de la necesidad de conservación de la infraestructura (coeficiente de conservación) y su relación con el nivel de sollicitación de la plataforma por las cargas de tráfico (segunda Ley de Dormon).
- d) el dimensionamiento de las capas de asiento, estableciendo un valor máximo aceptable del coeficiente de conservación de la línea compatible con las cargas de tráfico que la línea debe soportar a lo largo de su vida útil.

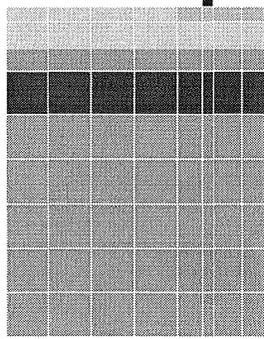
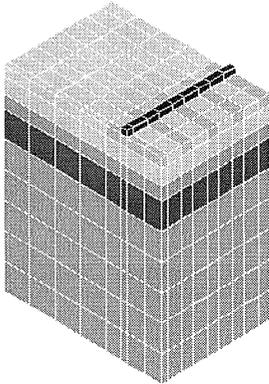
2.1. MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA INFRAESTRUCTURA.

La modelización del MEF, permite establecer el estado tensional y las deformaciones de los diferentes componentes y capas de material. Para los materiales de las capas de asiento y plataforma se aplican leyes de comportamiento elastoplástico y el criterio de plastificación de Drucker-Prager, con consideración de la cohesión y el ángulo de rozamiento de estos materiales.

La **figura 2.1.a** muestra la geometría del modelo de una plataforma y resume las principales características del mismo.

Como ya se estableció en los trabajos de la ORE, una modelización en tres dimensiones es necesaria para poder reproducir el problema de aplicación de una carga puntual sobre el carril y su transmisión hasta la obtención de la tensión sobre plataforma, a través del armamento de la vía y de las capas de asiento. Por otro lado, el cálculo con leyes elastoplásticas es imprescindible para tener en cuenta el comportamiento real y no elástico de los materiales de las capas de asiento y plataforma y para poder tomar en consideración en el modelo las características geomecánicas de estos materiales.

Modelo de un cuarto de vía, que comprende la traviesa cargada y 4 traviesas adyacentes a cada lado, reducido aprovechando la simetría con respecto a los planos (Y,Z) y (X,Y)



CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MODELO:

Elementos: SOLID 95: octaedro de 20 nodos con 3 gdl por nodo.
COMBIN 39: muelle no lineal (conexión entre carril y traviesa).

Comportamiento de los materiales:

- Hormigón y acero: elástico lineal.
- Balasto, capa de forma y terreno: elasto - plástico perfecto:

Superficie de rotura: criterio de Drucker-Prager:

$$F(\sigma) = \sigma_y = \alpha \cdot J_1 + \sqrt{J_2}$$

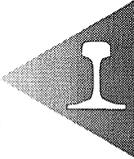
$$\alpha = \frac{2 \cdot \text{sen } \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \text{sen } \phi)} ; \quad \sigma_y = \frac{6 \cdot c}{\sqrt{3} \cdot (3 - \text{sen } \phi)}$$

Ley de flujo: modelo asociado: $\left\{ \partial \varepsilon^p \right\} = \lambda \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}$

Fig.2.1.a. Geometría del modelo y características principales



La modelización permite obtener una estimación de la rigidez global del carril, necesaria para el cálculo de los valores dinámicos de las cargas de los ejes, así como la tensión vertical máxima en la plataforma bajo diferentes hipótesis de carga.



La ley de Dormon (que responde a los resultados obtenidos partir de ensayos de la AASHO y cuya aplicación a plataformas ferroviarias ha dado resultados satisfactorios) establece que el paso de N_1 ejes que provocan la aparición de una tensión vertical máxima σ_1 en plataforma ocasiona la misma degradación que el paso de N_2 ejes asociados a una tensión σ_2 si se verifica:

$$N_1 \cdot \sigma_1^r = N_2 \cdot \sigma_2^r, \text{ adoptándose un valor de } r=5. \tag{1}$$

La **figura 2.1b** muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de la modelización de una tipología de plataforma ferroviaria. Las zonas plastificadas aparecen en dicha figura y se incluye unas gráficas de las tensiones y deformaciones en el eje vertical de aplicación de la carga.

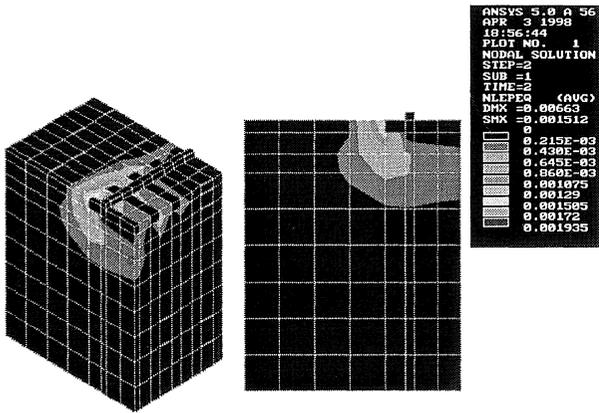


Fig. 2.1.b. Ejemplo de resultados del modelo

La aplicación de esta metodología al dimensionamiento de las capas de asiento de líneas existentes requiere la modelización de la infraestructura en su estado original y en el estado futuro resultado de los trabajos de mejora y acondicionamiento. Para ello es necesario caracterizar los diferentes componentes del sistema, y en particular de las diferentes capas de asiento y de la plataforma.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS TRÁFICOS FERROVIARIOS.

El tráfico ferroviario, partiendo de las diferentes composiciones y del número de circulaciones, puede asimilarse a un conjunto de tipos de ejes, cada tipo asociado a un número de pasos del eje, a una carga estática, a una velocidad de circulación y a un tipo de material.

Teniendo en cuenta la rigidez global de la vía, obtenida de la modelización de la infraestructura, y aplicando las expresiones de Prud'homme (ref [9]), es posible obtener la carga dinámica asociada a cada tipo de eje.

Para poder homogeneizar las diferentes cargas dinámicas, se adopta un valor de carga de referencia P_{ref} , o eje de referencia, y se establece, para cada tipo de eje de carga dinámica P , el número de ejes equivalentes que le corresponde, que es el número de ejes P_{ref} que produciría la misma degradación que un único eje P , y que resulta ser, por la aplicación de la ley de Dormon:

$$N_e = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ref}} \right)^r \quad (2)$$

siendo σ y σ_{ref} las tensiones máximas en la plataforma producidas por las cargas P y P_{ref} respectivamente.

De esta forma el tráfico total soportado por la línea, en el periodo de tiempo considerado, puede asimilarse a un número de ejes equivalentes, asociados a una carga por eje de referencia, y que viene a caracterizar la degradación que el tráfico produce en la plataforma.

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL NIVEL DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA.

El coeficiente de conservación de asiento k , al que hace referencia el anejo 1 de la ficha UIC 719 (ref. [10]) se expresa como el ratio entre el número de intervenciones de nivelación necesarias para mantener la vía y un número de intervenciones considerado como técnica y económicamente admisible o, sencillamente como valor medio de referencia.

Para definir la influencia de la degradación de la plataforma producida por los tráficos y sobre el valor k , se establece una relación entre el número de intervenciones y la solici-
tación de la plataforma evaluada por el número de ejes y la tensión en plata-
forma:



$$k = \frac{I}{I_0} = \frac{(N \cdot \sigma')}{(N_0 \cdot \sigma'_0)}, \text{ con } r=5, \text{ y donde:} \quad (3)$$

- σ es la tensión vertical en la parte superior de la plataforma provocada por la carga del eje de referencia
- I es el número de intervenciones de conservación
- N es el número de ejes equivalentes al eje de referencia

2.4. DIMENSIONAMIENTO DE LAS CAPAS DE ASIENTO

El espesor de las capas de asiento y, en particular, el espesor de la capa de refuerzo, en general de sub-balasto, se determina al imponer el cumplimiento de la segunda ley de Dormon:

- al determinar el nivel de conservación que se considera como admisible, en valor medio, para la vida útil de la vía renovada (I)
- al establecer la previsión de los tráficos que va a soportar la infraestructura durante su vida útil (N)
- al deducir el espesor de la capa de asiento que garantice una tensión en plataforma o acorde con la limitación impuesta por la citada ley, es decir, tal que

$$\sigma < \sigma_0 \cdot r \sqrt{\frac{I \cdot N_0}{I_0 \cdot N}} \quad (4)$$

3. APLICACIÓN DE LA MODELIZACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS.

Se resumen a continuación algunas aplicaciones prácticas de la modelización de plataformas ferroviarias. Aunque el modelo se ha desarrollado esencialmente para su utilización en el dimensionamiento de las capas de asiento, también se expondrán algunos ejemplos de aplicación a casos interesantes de estudio del comportamiento de la infraestructura ferroviaria.

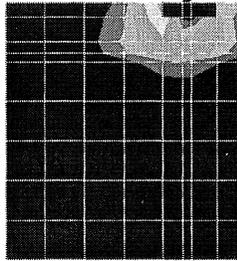
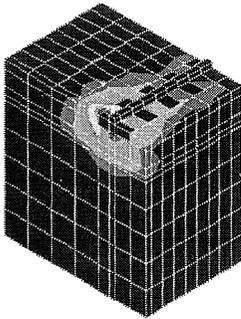
3.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA CAPA DE SUBBALASTO EN PROYECTOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LÍNEAS

PROINTEC ha aplicado la metodología expuesta en el punto 3 en varios proyectos de acondicionamiento de líneas, comprobando su utilidad práctica en el diseño de las capas de asiento y, en concreto, en el espesor de la capa de subbalasto que hay que disponer sobre la plataforma existente.

Las **figuras 3.1.a y b** incluidas a continuación muestran la aplicación de la metodología a uno de los proyectos de acondicionamiento de una línea. La figura **3.1.b** recoge una gráfica resumen de las tensiones en la plataforma obtenidas para las diferentes tipologías en la que puede apreciarse con claridad el efecto de reducción de las tensiones debido a la mejora del armamento en la nueva superestructura prevista en el acondicionamiento de esta línea.

Fig. 3.1. APLICACIÓN A UN PROYECTO DE ACONDICIONAMIENTO

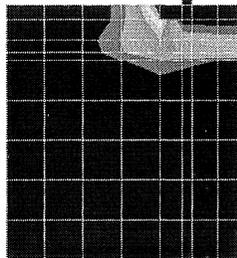
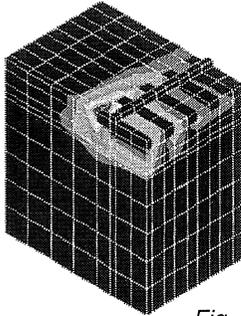
Deformaciones plásticas en la situación de referencia



ANSYS 5.0 A 56
NOV 20 1997
22:44:31
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP = 2
SUB = 1
TIME = 2
NLEPQ (AVG)
DMX = 0.0064
SMX = 0.002099

0
0.215E-03
0.430E-03
0.860E-03
0.001075
0.00129
0.001505
0.00172
0.001935

Deformaciones plásticas con el refuerzo previsto



ANSYS 5.0 A 56
NOV 20 1997
22:44:31
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP = 2
SUB = 1
TIME = 2
NLEPQ (AVG)
DMX = 0.006282
SMX = 0.002073

0
0.215E-03
0.430E-03
0.860E-03
0.001075
0.00129
0.001505
0.00172
0.001935

Fig. 3.1.a. Deformaciones plásticas en situación de referencia y situación futura



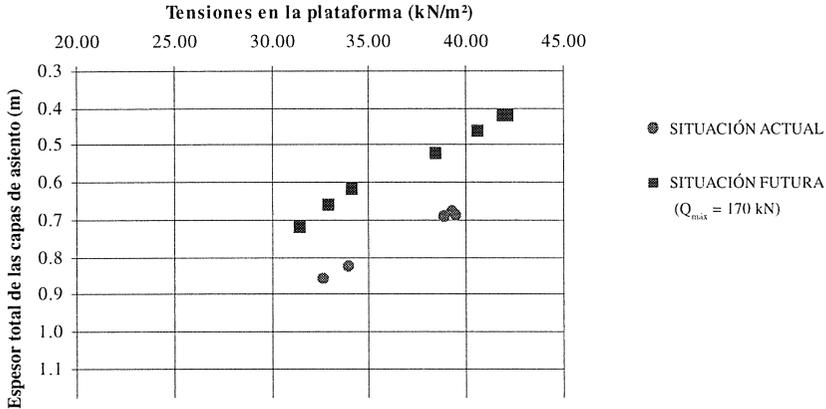


Fig. 3.1.b. Tensiones en la plataforma

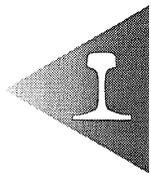
3.2. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE ELEMENTOS RÍGIDOS EN PLATAFORMA. APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA EJECUCIÓN DE UNA OBRA DE DRENAJE TRANSVERSAL EN EL VOLUMEN DE LA PLATAFORMA.

Las obras de fábrica (puentes, marcos) imponen la disposición de cuñas de transición, por la brusca modificación de la rigidez global que supone el paso de la plataforma de material granular a un tablero o losa de mucha mayor rigidez.

Cuando se trata de obras de fábrica de menos entidad, como es el caso de obras de drenaje transversal, la influencia de la obra de fábrica depende de su naturaleza y de la posición relativa respecto de las capas de asiento: en estos casos la necesidad de disponer cuñas u otros elementos de transición no está clara.

Con el fin de evaluar los efectos de la aparición de este tipo de obras de fábrica, se han modelizado varios casos, con diferentes posiciones verticales de una obra de drenaje transversal tipo, obteniéndose de esta forma la variación de la rigidez global de la vía en función de la posición relativa de la obra de fábrica.

Debido a la aparición de una obra de fábrica de tamaño no despreciable frente al tamaño de la célula modelizada, ha sido necesaria aumentar el tamaño de dicha célula, yendo a un modelo con una mayor número de elementos, como vemos en la **figura 3.2**.



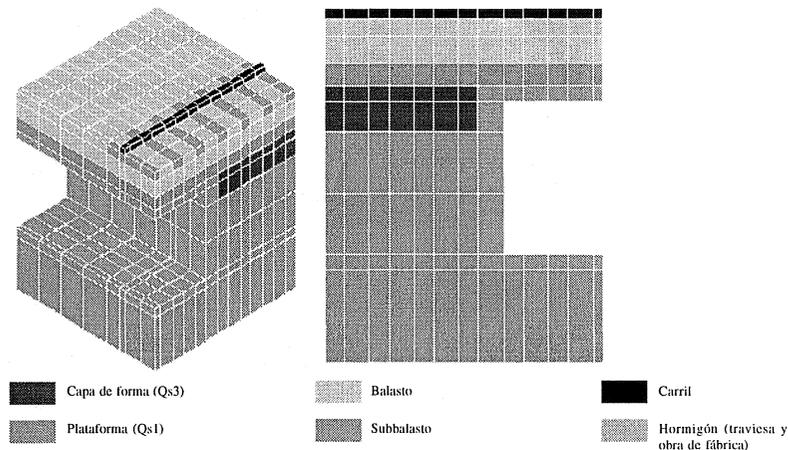


Fig.3.2. Modelo ampliado con obra de fábrica

4. CONCLUSIÓN

La aplicación de una modelización mediante el MEF del comportamiento mecánico de las infraestructuras ferroviaria permite abordar numerosos problemas de indudable interés.

El modelo MEF que ha desarrollado PROINTEC en su Departamento de Ferrocarriles, ha permitido aplicar una metodología de dimensionamiento de capas de asiento y constituye una herramienta compleja y potente para abordar el análisis de no pocos aspectos y problemas vinculados al comportamiento mecánico del sistema rail-traviesa-capas de asiento-plataforma.

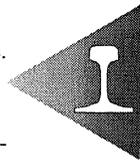
Actualmente se persigue mejorar este modelo, especialmente en el tratamiento de los fenómenos de fatiga, o daño/degradación de la plataforma bajo cargas cíclicas.

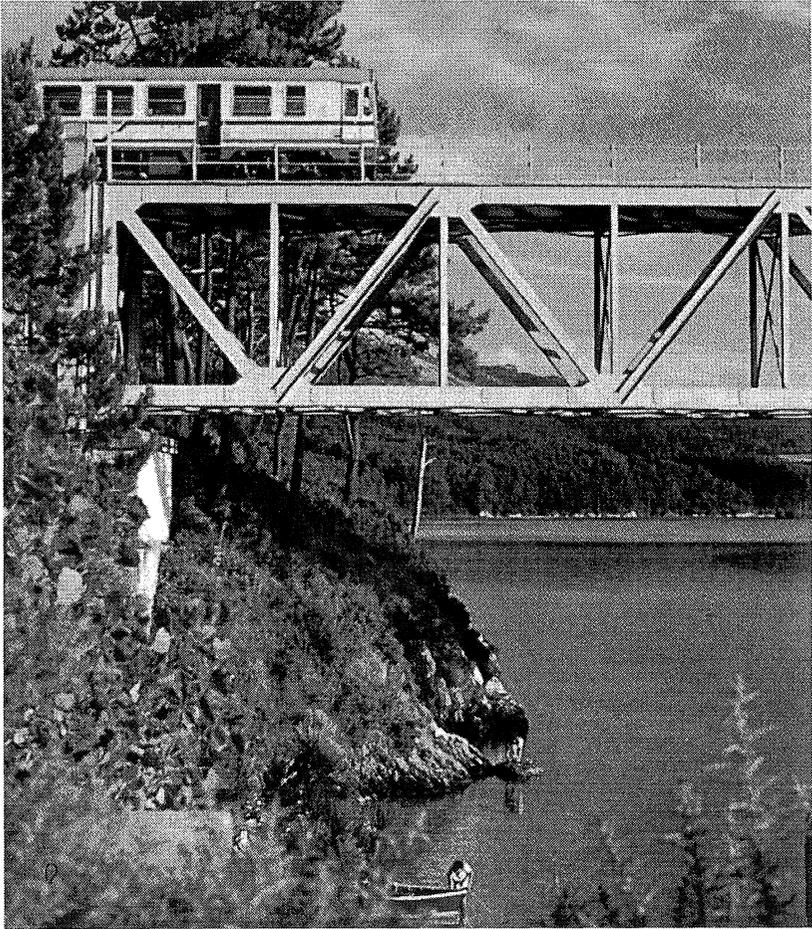
Los autores de esta ponencia quieren resaltar la labor del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jorge Nasarre y de Goicoechea como impulsor y coordinador de estos estudios, y confían en que el modelo y las metodologías presentadas puedan perfeccionarse y aplicarse con mayor éxito si cabe en la resolución de futuros problemas de diseño de infraestructuras ferroviarias.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] "Question D117. Rapport n° 1. Expose des Méthodes de recherche. Définitions." ORE (1983)
- [2] "Question D117. Rapport n° 18. 1^{ère} phase. Essais de Vienne-Arsenal." ORE (1.983)
- [3] "Question D117. Rapport n° 25. 2^{ème} phase. Essais de Vienne-Arsenal et Derby." ORE (1.983)
- [4] "Question D117. Rapport n° 27. Comparaison des résultats d'essais avec les prévisions théoriques". ORE (1.983)
- [5] "Question D117. Rapport n° 28. Abaques de comportement du système voie-fondation". ORE (1.983)
- [6] Profillidis, V. "La Voie ferrée et sa fondation. Modelisation mathématique". Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1.983)
- [7] "Etude en elastoplasticité par la MEF du comportement de la voie ferrée et sa fondation". Bulletin liaison du LCPC, n° 141 (1986)
- [8] Extrait de la notice du logiciel MEF "Rosalie". LCPC.
- [9] Prud'Homme, M.A. "La Voie"
- [10] "Fiche 714. Classification des voies des lignes du point de vue de la maintenance de la voie". UIC. 1986





Benito Figueroa - Vía Libre

