



Estructuras Ferroviarias I
Trabajo Práctico Integrador
“Puente Ferroviario”

Integrantes del grupo:

-Fernandez Miño Leandro

-Ruggiero Revello Andrés

Profesor: Ing. Pégola Fabián

Jefe de Trabajos Prácticos: Agustín Sirolli

Año Lectivo: 2022

Introducción

Un puente es una construcción que permite salvar un accidente geográfico como un río, un cañón, un valle o un cuerpo de agua, o cualquier otro obstáculo físico, como una carretera, un camino, o una vía férrea. El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y de la naturaleza del terreno sobre el que se construye.

Su proyecto y su cálculo pertenecen a la ingeniería estructural, siendo muchos los tipos de diseños que se han aplicado a lo largo de la historia, influidos por los materiales disponibles, las técnicas desarrolladas y las consideraciones económicas, entre otros factores. Al momento de analizar el diseño de un puente, la calidad del suelo o roca donde habrá de apoyarse y el régimen del río por encima del que cruza son de suma importancia para garantizar la vida del mismo.

Alcance de Trabajo Práctico

En este caso de estudio, evaluaremos un **punto de viga**. Utilizaremos como base al **Puente Pacífico** (fig. 1), ubicado en la Ciudad de Buenos Aires, el cual se desarrolla sobre 37 metros de estructura. Dicho puente, realmente, es similar a un puente de Arco, pero por simplicidad matemática, asumiremos una versión del puente de viga.



Fig.1: Puente Pacífico (1930). emplazado en la intersección de las avenidas Santa Fe y Juan B. Justo, dentro del barrio de Palermo. Por sus vías, actualmente, cruza el Ferrocarril General San Martín.

Puente Viga

Una viga constituye una pieza lineal apoyada que resiste fundamentalmente a flexión. Estas estructuras presentan un canto e inercia crecientes con luz, puesto que la flexión es directamente proporcional al cuadrado de la luz. Los puentes viga, por tanto, se basan en secciones de máxima inercia y de mínimo peso (secciones en doble T, cajones, etc.). Como dato interesante, destacamos que el puente de viga se apoya sobre 2 vínculos: uno fijo y otro móvil.

Aunque morfológicamente el puente viga puede parecer el sistema más simple y directo de atravesar un río, su mecanismo resistente, la flexión, es más complejo y difícil de intuir que el esfuerzo axial, ya sea de tracción o compresión, predominante en otras tipologías estructurales, como los arcos.

Para la realización de este trabajo práctico, utilizaremos como modelo una formación compuesta por vagones granero cuadrados (fig.2), tirados por una locomotora GM GT22 (fig.3)

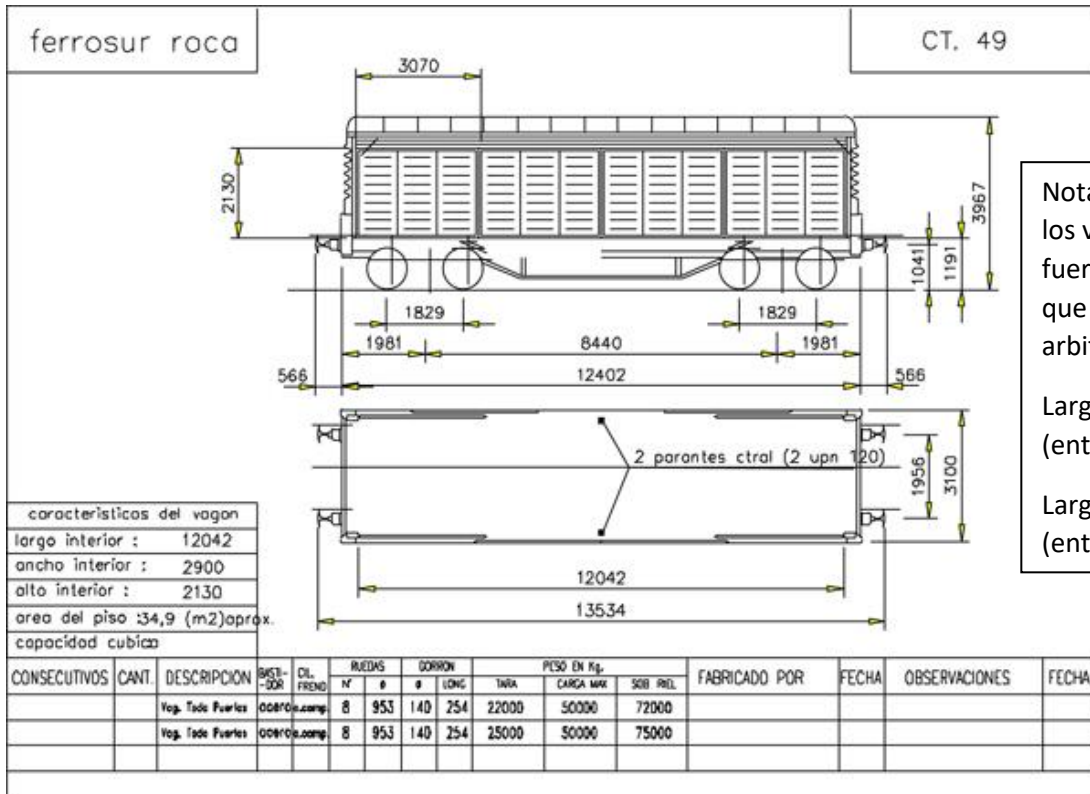


Fig.2

Nota: las dimensiones reales de los vagones y la locomotora no fueron tomados en cuenta, sino que se eligieron valores arbitrariamente.

Largo total Vagón: 16m
(entre ejes 2m)

Largo total Locomotora: 18m
(entre ejes 2m)

Fig.3



Marco Teórico

Supongamos un conjunto de Puntos Materiales, vinculados entre sí por su condición de rigidez. Si el conjunto de puntos materiales se encuentra en el espacio configura un cuerpo sólido. Si el conjunto está en el plano configura uno "Chapa". Ocurre que las estructuras no se las consigue libres, sino que deben estar fuertemente vinculadas a la tierra, ya sea en forma directa o por medio de otras estructuras. Esa vinculación se realiza por medio de los denominados "vínculos" a los que podemos definir como todo mecanismo destinado a restringir o limitar los grados de libertad que posee una chapa.

Objetivos del Trabajo Práctico:

En este informe analizaremos una estructura utilizando Diagramas Característicos y de Momentos Flectores, conceptos brevemente enunciados a continuación.

Análisis Cinemático: En el caso del puente de viga, se tienen 2 vínculos en sus extremos: uno es un apoyo fijo, mientras que el otro es un apoyo móvil. Dichos vínculos restringen 2 y 1 grados de libertad respectivamente, del total de 3 que se desarrollan en un plano. (Fig 5)

Diagramas Característicos: Son simplemente la representación gráfica de las distribuciones correspondientes, dibujadas en los sistemas de los ejes coordenados Z e Y, y suelen colocarse debajo del diagrama de cargas. Los máximos y mínimos del diagrama de momentos corresponden siempre a secciones de fuerza constante nula y pueden obtenerse a partir de igualar a cero la derivada de la solución analítica la cual siempre la distribución de la fuerza cortante.

Momento Flector: Se denomina momento flector (o también "flexor"), o momento de flexión, a un momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de un prisma mecánico flexionado o una placa que es perpendicular al eje longitudinal a lo largo del que se produce la flexión.

Es una sollicitación típica en vigas y pilares y también en losas ya que todos estos elementos suelen deformarse predominantemente por flexión. El momento flector puede aparecer cuando se someten estos elementos a la acción de un momento (torque) o también de fuerzas puntuales o distribuidas.

Los signos (fig.4) que determinan los momentos flectores en vigas como positivos o negativos dependen del efecto que dicho momento produce, cuando el efecto del momento produce tensiones en las fibras inferiores de la viga se habla de un momento positivo (tracción. Fig.5c), mientras que si el momento produce tensiones en las fibras superiores de la viga se hablara que se produjo un momento negativo (compresión. Fig.5c). Al provocarse estos momentos, se efectúan **esfuerzos** en la viga.

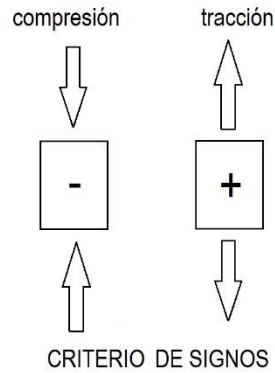


Fig. 4

Esfuerzo: es una representación de la compresión o tracción que está sucediendo en una pieza bajo algún tipo de carga. Existen dos tipos de esfuerzos para saber si un material en especial puede soportar la carga que recibirá en su vida útil. El **esfuerzo normal** es el esfuerzo que soporta una estructura bajo carga axial, es decir, cuando la carga se encuentra a lo largo de su eje principal, y el **esfuerzo cortante** es el esfuerzo que soporta una estructura en el sentido perpendicular a su eje principal. Se le denomina cortante porque está relacionado con la fuerza que puede llegar a trozar la pieza de manera transversal.

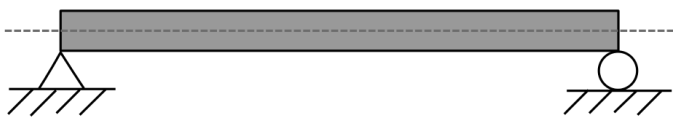


Fig. 5a: Viga simplemente apoyada, sin ser afectada por ninguna fuerza externa (sin considerar peso de la viga o reacciones de los vínculos)

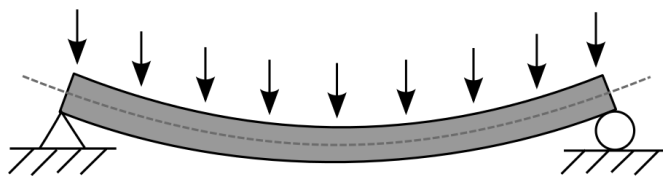


Fig. 5b: Viga simplemente apoyada, solicitada a flexión por una carga uniformemente distribuida.

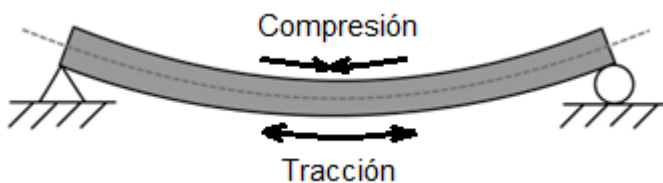


Fig. 5c: Viga simplemente apoyada, solicitada a flexión por una carga uniformemente distribuida.

Esquemas de referencia

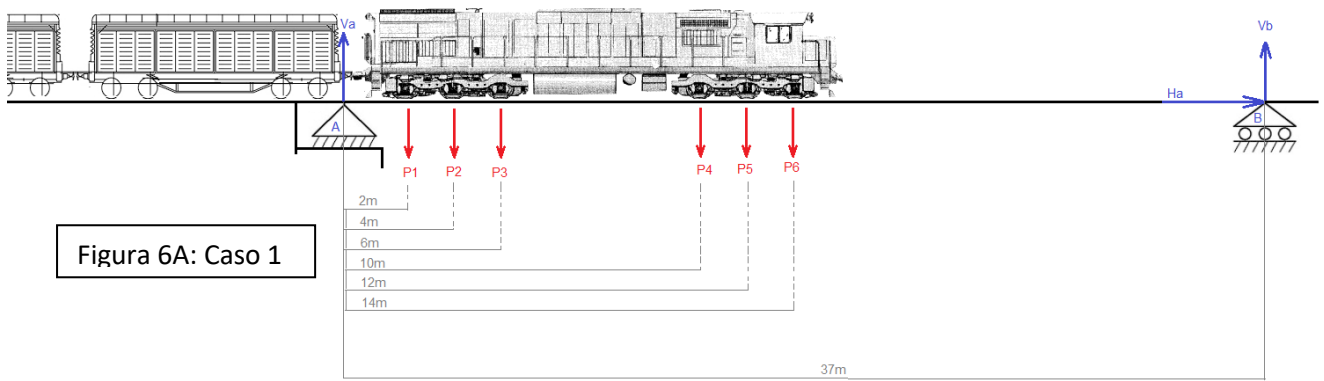


Figura 6A: Caso 1

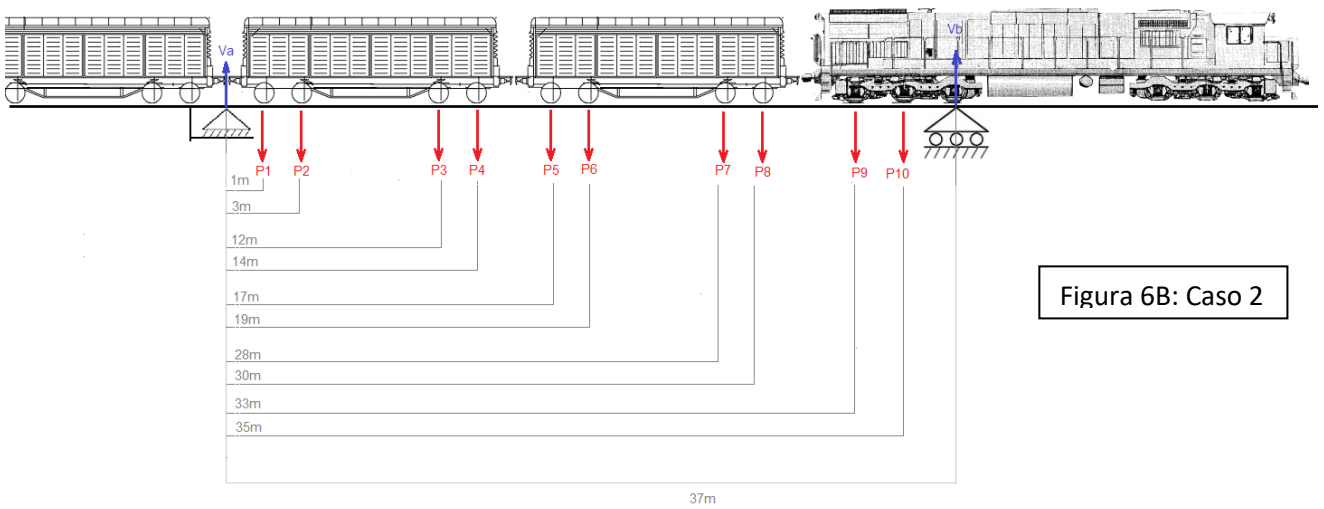


Figura 6B: Caso 2

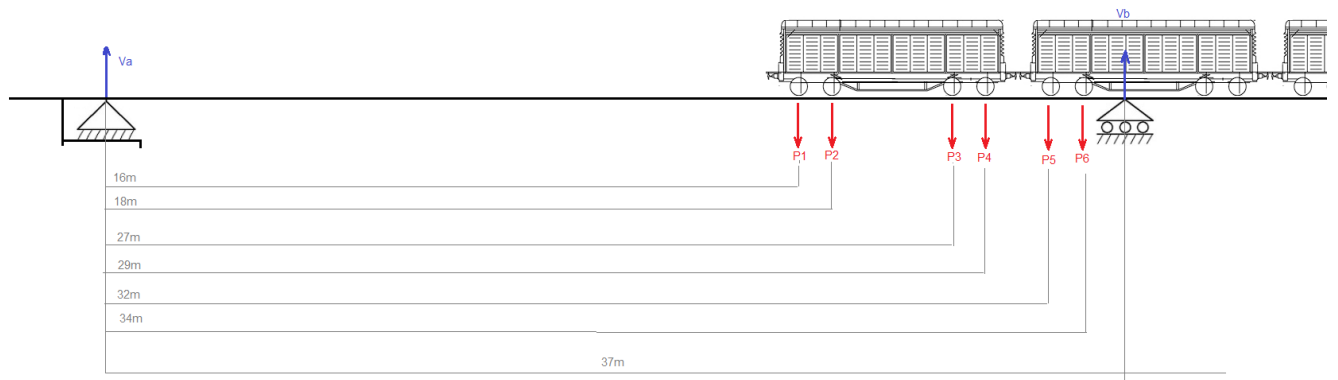


Figura 6C: Caso 3

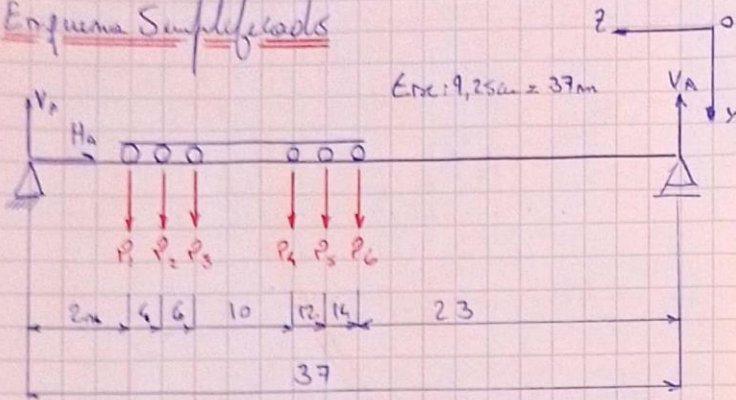


Figura 6D: Caso 4

Cálculos de esfuerzos característicos y momentos flectores

* Caso 1

Esquema Simplificado



Caso 1 (fig.6A)

Locomotora "GT-22 CU"
 Pers por eje: 17 toneladas = P_L
 Vagones (Carga Máxima)
 Pers por eje: 12,5 toneladas = P_V
 Pers total Locomotora = 102 ton
 " " Vagones = 50 ton

Reacciones de Vértices

$\sum P_{\text{proy } z} \Rightarrow -H_A = 0 \rightarrow H_A = 0$

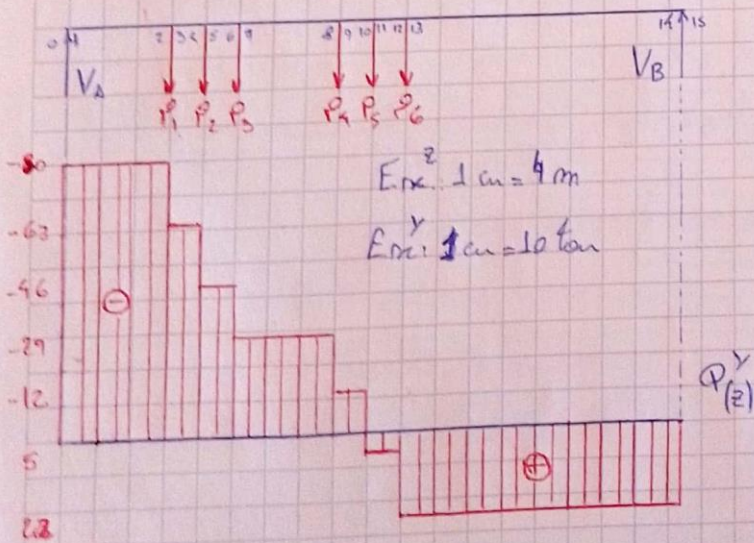
$\sum \text{Mom}^A = 0 \rightarrow P_1 \cdot d_1 + P_2 \cdot d_2 + P_3 \cdot d_3 + P_4 \cdot d_4 + P_5 \cdot d_5 + P_6 \cdot d_6 - V_B \cdot d_B = 0$

$816 = 37 \cdot V_B \rightarrow V_B = 22,05 \text{ ton} \approx 22 \text{ ton}$

$\sum P_{\text{proy } y} = 0 \rightarrow -V_A - V_B + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 0$

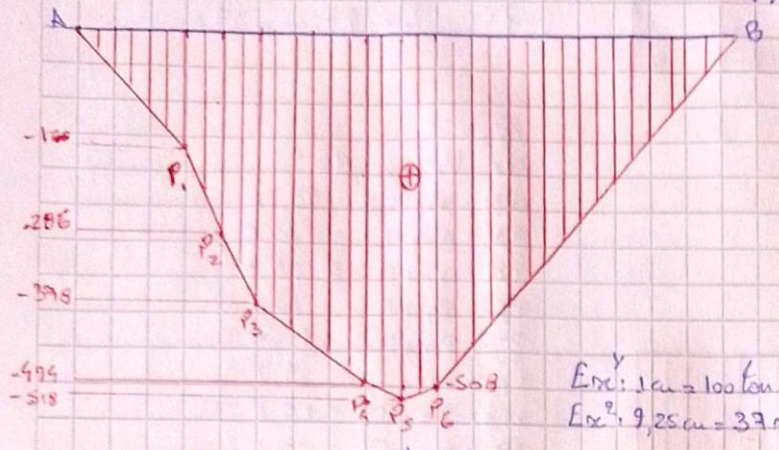
$V_A + V_B = 102 \text{ ton}$
 $V_A = 80 \text{ ton}$

Diagrama de Esfuerzos característicos - Diagrama de Cuerpo Libre



$Q_A = 0$
 $Q_1 = -80 \text{ ton}$
 $Q_3 = Q_1 + 17 \text{ ton} = -63 \text{ ton}$
 $Q_5 = Q_3 + 17 \text{ ton} = -46 \text{ ton}$
 $Q_7 = Q_5 + 17 \text{ ton} = -29 \text{ ton}$
 $Q_9 = Q_7 + 17 \text{ ton} = -12 \text{ ton}$
 $Q_{11} = Q_9 + 17 \text{ ton} = 5 \text{ ton}$
 $Q_{13} = Q_{11} + 17 \text{ ton} = 22 \text{ ton}$

Momentos Flectores (región A)



$M_{01} = 0$
 $M_{23} = -80 \cdot 2 = -160 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $M_{45} = -80(2+2) + 17 \cdot 2 = -286 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $M_{67} = -80(6) + 17(2+4) = -378 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $M_{89} = -80(10) + 17(4+6+8) = -494 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $M_{1011} = -80(12) + 17(10+8+6+2) = -518 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $M_{1213} = -80(15) + 17(12+10+8+5+2) = -508 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $M_B = -80(37) + 17(35+33+31+27+25+23) = 0$

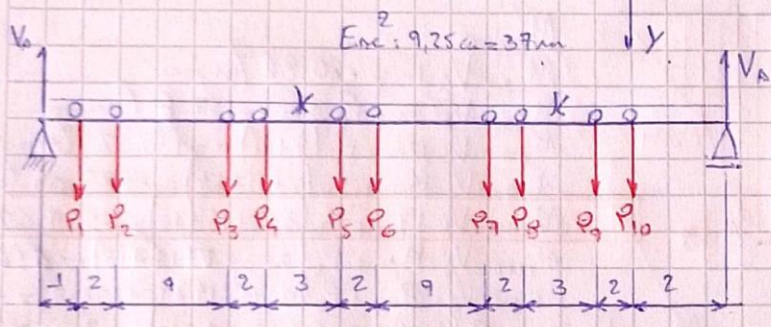
$E_{x^y}: 1 \text{ cm} = 100 \text{ ton}\cdot\text{m}$
 $E_{x^z}: 9,25 \text{ cm} = 37 \text{ m}$

El momento flector máximo se da en P5 → $M_{1011} = 518 \text{ ton}\cdot\text{m}$

Caso 2:

Engrasa Simplificada

Caso 2 (fig.6B)



Peso Vagon (carga max) = 50 ton
 Peso por eje: 12,5 ton = P_V
 Peso locomotora "GT-22 CV": 102 ton
 Peso por eje: 17 ton = P_L

Reacciones de Vinculo

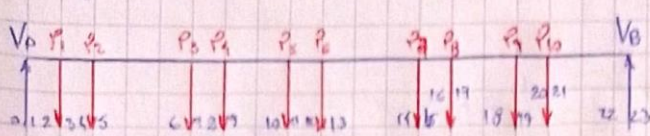
$\sum \text{Proy}_z = 0 \rightarrow H_A = 0$ $\sum \text{Proy}_y = 0 \rightarrow -V_A - V_B + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} = 0$
 (I) $V_A + V_B = 134 \text{ ton}$

$\sum M_{\text{en } 0} = 0 \rightarrow P_V(d_1 + d_2 + d_3 + d_8) - V_B d_B = 0$
 $+ P_L(d_9 + d_{10})$
 $12,5 \text{ ton}(1+3+12+15+17+19+28+30) + 17 \cdot (33+35) = V_B \cdot 37$
 $37 \cdot V_B = 2706 \text{ ton}\cdot\text{m}$

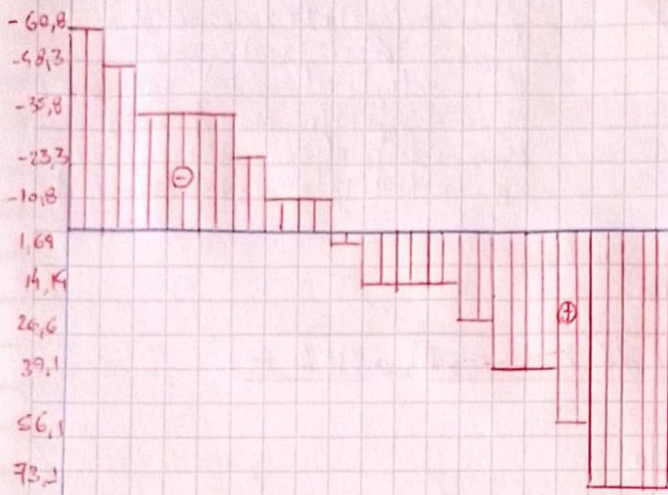
(II) $V_B = 73,13 \text{ ton} *$

(II) en (I) → $V_A = 60,86 \text{ ton} *$

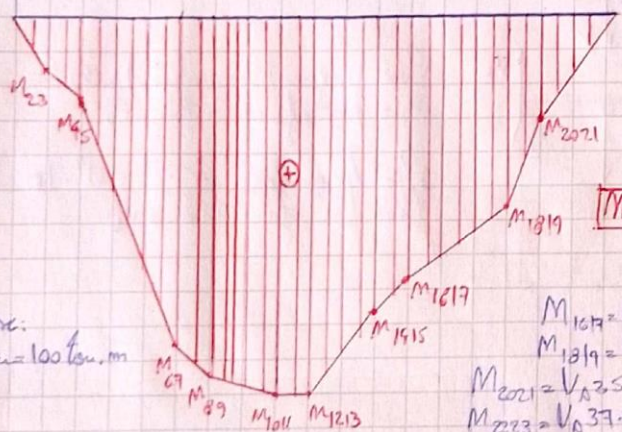
Diagramas de Esfuerzos Característicos - DCL - Momentos Flexión



Enc: 9,25 m = 37 m



$$\begin{aligned}
 Q_0 &= 0 \\
 Q_1 &= V_A = -60,86 \text{ ton} \\
 Q_3 &= Q_1 + 12,5 = -48,36 \text{ ton} \\
 Q_5 &= Q_3 + 12,5 = -35,8 \text{ ton} \\
 Q_7 &= Q_5 + 12,5 = -23,3 \text{ ton} \\
 Q_9 &= Q_7 + 12,5 = -10,8 \text{ ton} \\
 Q_{11} &= Q_9 + 12,5 = 1,69 \text{ ton} \\
 Q_{13} &= Q_{11} + 12,5 = 14,4 \text{ ton} \\
 Q_{15} &= Q_{13} + 12,2 = 26,6 \text{ ton} \\
 Q_{17} &= Q_{15} + 12,5 = 39,1 \text{ ton} \\
 Q_{19} &= Q_{17} + 17 = 56,1 \text{ ton} \\
 Q_{21} &= Q_{19} + 17 = 73,13 \text{ ton} \\
 Q_{23} &= Q_{21} - V_B = 0
 \end{aligned}$$



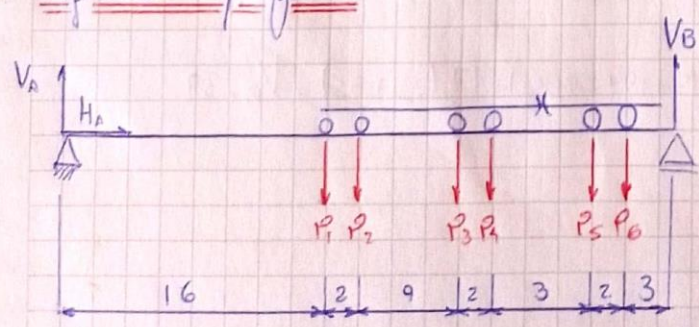
$$\begin{aligned}
 M_{01} &= 0 \\
 M_{23} &= V_A \cdot 1m = -60,86 \text{ tonm} \\
 M_{45} &= V_A \cdot 3m + P_1 \cdot 2m = -187,6 \text{ tonm} \\
 M_{67} &= V_A \cdot 12m + P_V(7+11) = -480,52 \text{ tonm} \\
 M_{89} &= V_A \cdot 15m + P_V(2+11+13) = -527,04 \text{ tonm} \\
 \text{Max } M_{1011} &= V_A \cdot 17m + P_V(3+5+14+16) = -559,62 \text{ tonm} \\
 M_{1213} &= V_A \cdot 19m + P_V(2+5+7+16+18) = -556,34 \text{ tonm} \\
 M_{1415} &= V_A \cdot 28m + P_V(9+11+14+16+25+27) = -529,08 \text{ tonm} \\
 M_{1617} &= V_A \cdot 30m + P_V(2+11+13+16+18+27+29) = -375,8 \text{ tonm} \\
 M_{1819} &= V_A \cdot 33m + P_V(3+5+14+16+19+21+30+32) = -259,38 \text{ tonm} \\
 M_{2021} &= V_A \cdot 35 + P_V(5+7+16+18+21+23+32+35) + P_2 \cdot 2 = -146,1 \text{ tonm} \\
 M_{223} &= V_A \cdot 37 + P_V(30+34+25+23+20+18+9+7) + P_V(2+5) = 0
 \end{aligned}$$

Enc: $I_{ax} = 100 \text{ ton}\cdot\text{m}$

Caso 3

Caso 3 (fig.6C)

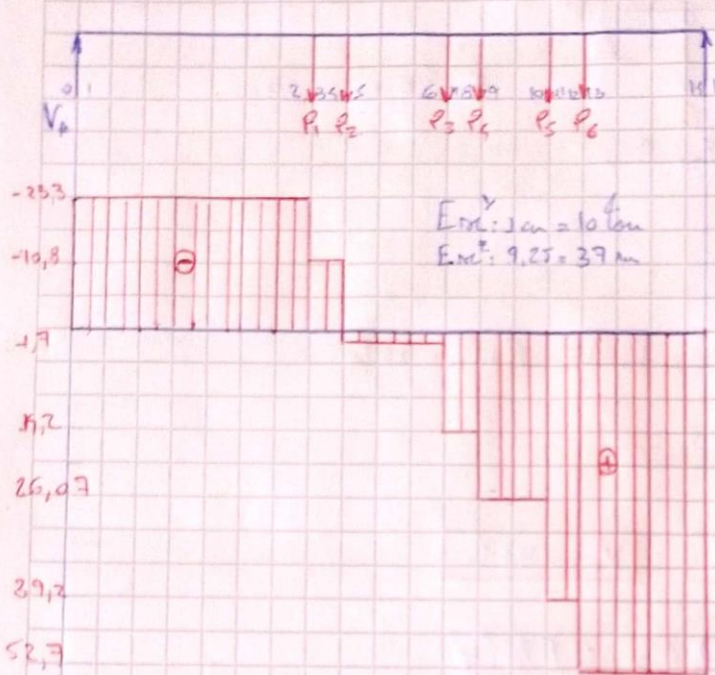
Esfuerzos Característicos



$$\begin{aligned}
 \sum P_{\text{proy } y} &= -V_A - V_B + P_V \cdot 6 = 0 \\
 V_A + V_B &= 12,5 \cdot 6 = 75 \text{ ton} \\
 \sum P_{\text{proy } z} &= 0 \rightarrow H_A = 0 \\
 \sum P_{\text{mom } A} &= V_B \cdot d_B + P_V(16+18+27+27+32+34) = 0 \\
 + V_B \cdot 37 &= 12,6 \cdot 156 = 1950 \\
 \text{Max } V_B &= 52,7 \text{ ton} \\
 V_A + V_B &= 75 \rightarrow V_A = 22,3 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

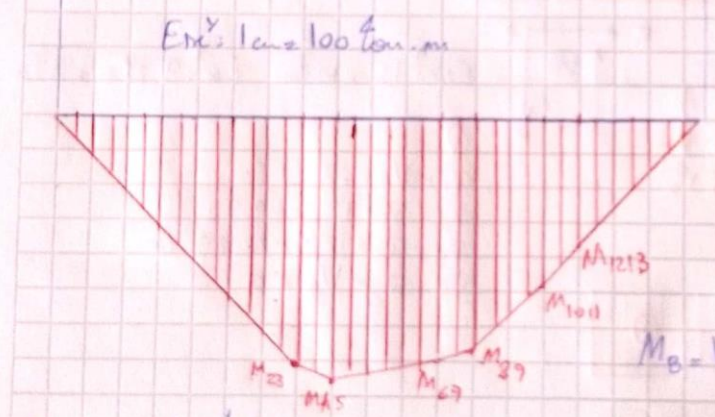
Enc: 9,25 m = 37 m

DCL - D.E. fuerzas características - D. Momentos Flectores



Ent: $1 \text{ cm} = 10 \text{ ton}$
Ent: $9,25 = 37 \text{ mm}$

- $Q_0 = 0$
- $Q_1 = -V_A = -23,3 \text{ ton}$
- $Q_2 = Q_1 + 12,5 = -10,8 \text{ ton}$
- $Q_3 = Q_2 = -1,7 \text{ ton}$
- $Q_4 = Q_3 = 15,2 \text{ ton}$
- $Q_5 = Q_4 = 26,07 \text{ ton}$
- $Q_6 = Q_5 = 39,2 \text{ ton}$
- $Q_7 = Q_6 = 52,7 \text{ ton}$
- $Q_8 = Q_7 - V_B = 0$



Ent: $1 \text{ cm} = 100 \text{ ton.m}$

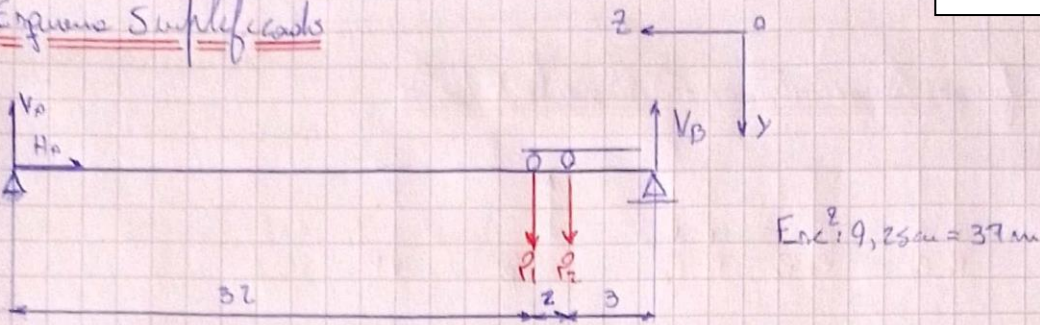
- $M_0 = 0$
- $M_2 = V_A \cdot 16 = -356,8 \text{ ton.m}$
- $M_4 = V_A \cdot 18 + P_V \cdot 2 = -376,4 \text{ ton.m}$
- $M_6 = V_A \cdot 27 + P_V(9+11) = -352,1 \text{ ton.m}$
- $M_8 = V_A \cdot 29 + P_V(2+11+13) = -321,7 \text{ ton.m}$
- $M_{10} = V_A \cdot 32 + P_V(3+5+15+16) = -238,6$
- $M_{12} = V_A \cdot 35 + P_V(2+5+7+16+18) = -158,2$
- $M_B = V_A \cdot 37 + P_V(3+5+8+10+19+21) = 0$

El momento flector máximo está dado en $P_2 \rightarrow M_{45} = 376,4 \text{ ton.m}$

Caso 4

Caso 4 (Fig. 6D)

Esquema Simplificado



Reacciones de Vuelto

$$\sum F_{Proy y} = 0 \rightarrow -V_A - V_B + P_1 + P_2 = 0 \rightarrow V_A + V_B = P_1 + P_2 = 25 \text{ ton}$$

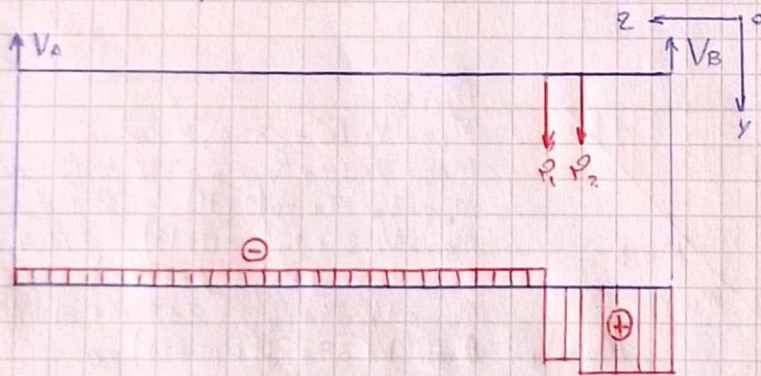
$$\sum M_{om} = 0 \rightarrow -V_B \cdot d_B + P_1 \cdot d_1 + P_2 \cdot d_2 = 0$$

$$V_B \cdot 37 = 825$$

$$V_B = 22,29 \text{ ton}$$

$$V_A = 2,71 \text{ ton}$$

DCL - D. Fuerzas Características - D. Momento Flector



$$E_{DCL}^y: 1 \text{ cm} = 10 \text{ ton} \quad E_{DCL}^z: 9,25 \text{ cm} = 37 \text{ m}$$

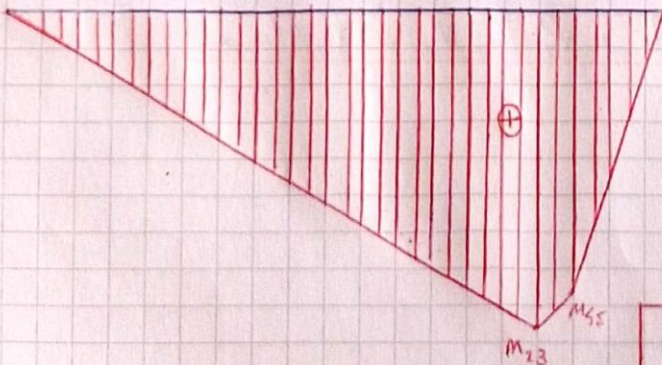
$$Q_0 = 0$$

$$Q_1 = -V_A = -2,71 \text{ ton}$$

$$Q_3 = Q_1 + 12,5 = 9,79 \text{ ton}$$

$$Q_5 = Q_3 + 12,5 = 22,29 \text{ ton}$$

$$Q_7 = Q_5 - V_B = 0$$



$$E_{DCL}^y: 1 \text{ cm} = 20 \text{ ton}$$

$$M_{01} = -V_A \cdot 0 = 0$$

$$M_{23} = -V_A \cdot 12 = -86,2 \text{ ton.m}$$

$$M_{45} = -V_A \cdot 34 + P_1 \cdot 12 = -75,29 \text{ ton.m}$$

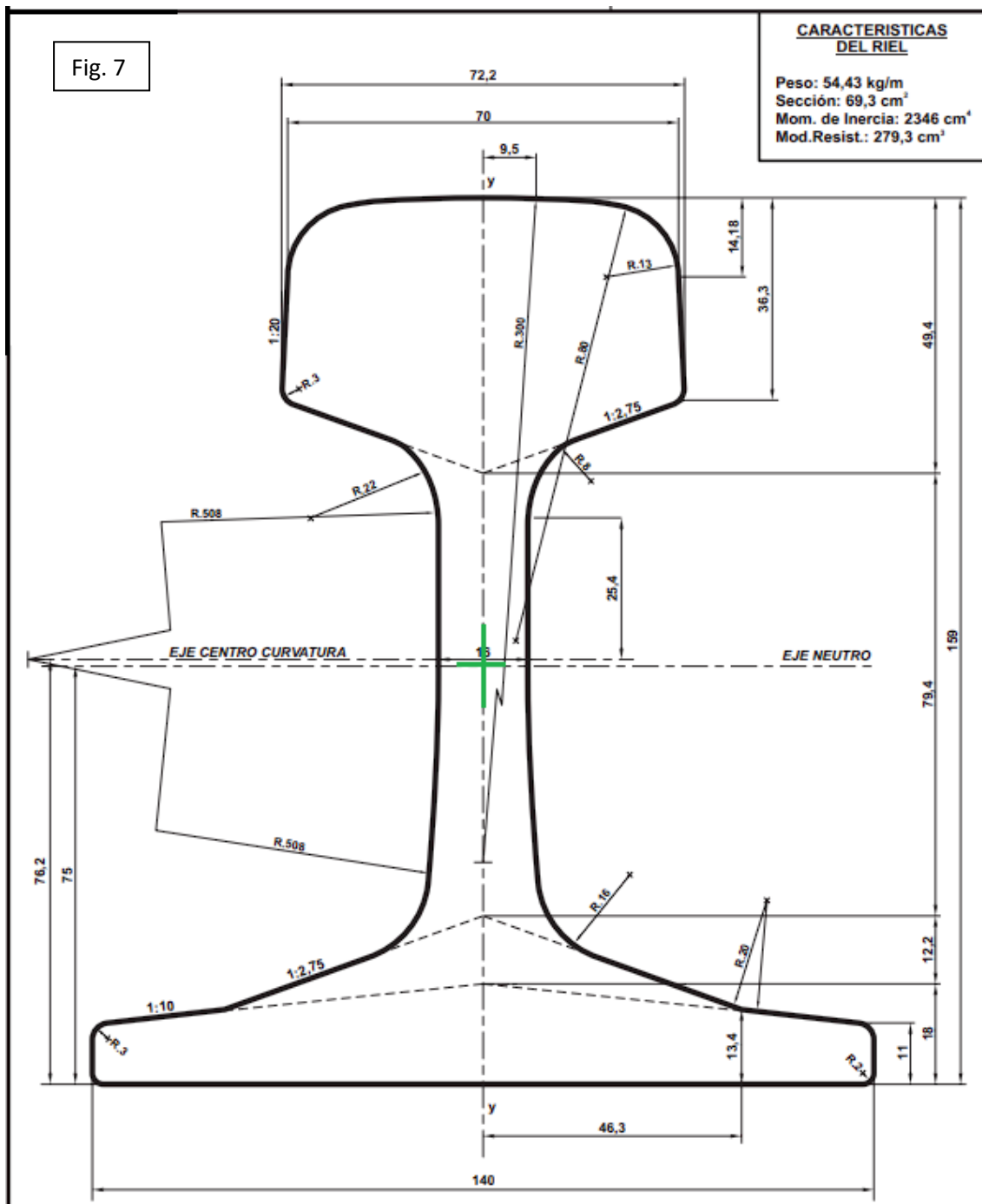
$$M_{67} = -V_A \cdot 37 + P_1 \cdot (12+3) = 0$$

El momento flector máximo se da en $P_1 \rightarrow M_{23} = 86,2 \text{ ton.m}$

Cálculo de Esfuerzos Normales Máximos de Tracción y Compresión

A continuación, calcularemos los esfuerzos máximos que se someten a la estructura del puente. Para una simplificación de los cálculos, trabajaremos sobre los rieles por los que pasa la formación de estudio. El perfil de dicho riel se demuestra a continuación (Fig. 7).

Durante el “Caso 2”, podemos observar que existe el momento máximo por el que sufre la estructura del puente, siendo este de unos 559,62 ton.metro. En este punto, los esfuerzos de compresión y tracción serán máximos.



Flexión en Vigas: $\Theta = \frac{M.C}{I}$

M = momento flector a estudiar

C = distancia al eje neutral

I = Momento de inercia respecto al eje de flexión

Momento Flector Máximo = 559,62ton.m

Ct = distancia de borde inferior (tracción) a eje neutral = 0,75m

Cc = distancia de borde superior (compresión) a eje neutral = 0,84m

I = 0,00002346 m⁴ (provisto por Fig.5)

$$\text{Esfuerzo Tractor } \Theta_t = \frac{M.C_t}{I} = \frac{559,62\text{Ton.m} \cdot 0,75\text{m}}{0,00002346\text{m}^4} = 19721,08 \text{ tom/m}^2$$

$$\text{Esfuerzo Compresor } \Theta_c = \frac{M.C_c}{I} = \frac{559,62\text{Ton.m} \cdot 0,84\text{m}}{0,00002346\text{m}^4} = 22087,61 \text{ tom/m}^2$$

Conclusión

El estudio previamente demostrado resulto de sumo interés para lograr comenzar a comprender la mecánica y la estática detrás de una estructura, en el específico del puente ferroviario.

Gracias a estos estudios de fuerzas y momentos, podemos empezar a tener una idea de lo que lleva construir un puente, cómo reaccionaría a distintas aplicaciones de fuerzas, a la hora de que una formación pase sobre este.

Debido a complejidad matemática de otros tipos de puentes, lamentablemente, mucha información queda fuera del alcance de este informe; Por ej.: estudiamos la estructura que compone al Puente Pacífico, simplificándolo a una viga simple, cuando en la realidad, es similar a un puente de arco, el cual lleva un estudio de fuerzas completamente distinto y extensivo.

Bibliografía

Información sobre material rodante utilizado:

<https://www.nca.com.ar/Material-Rodante>

Información teórica sobre los conceptos aplicados:

Lecciones de Estática Gráfica - Humberto Meoli

Imágenes:

<https://www.youtube.com/channel/UC38KogQw4uWhtA1FCpCpOMQ/featured>

<https://www.argentina.gob.ar/cnrt/normativa/transporte-ferroviario/perfiles-de-rieles>

(Riel de 54,43 - Perfil UIC 54)