



XXVIII
CONSEJO DIRECTIVO



El Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla A.C.

Te invita a la:

XX Semana de la Ingeniería

“Ingeniería Civil a la Vanguardia en la Construcción”

GEOTECNIA DE LAS VIAS FÉRREAS

ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

Investigadora

Instituto de Ingeniería, UNAM

aossal@iingen.unam.mx



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

Contenido

- Antecedentes
- Conceptos generales de las vías férreas
- Diseño geotécnico de una vía férrea
- Evaluación de la capacidad estructural la subestructura y obras complementarias
- Instrumentación y monitoreo geotécnico de las vías férreas



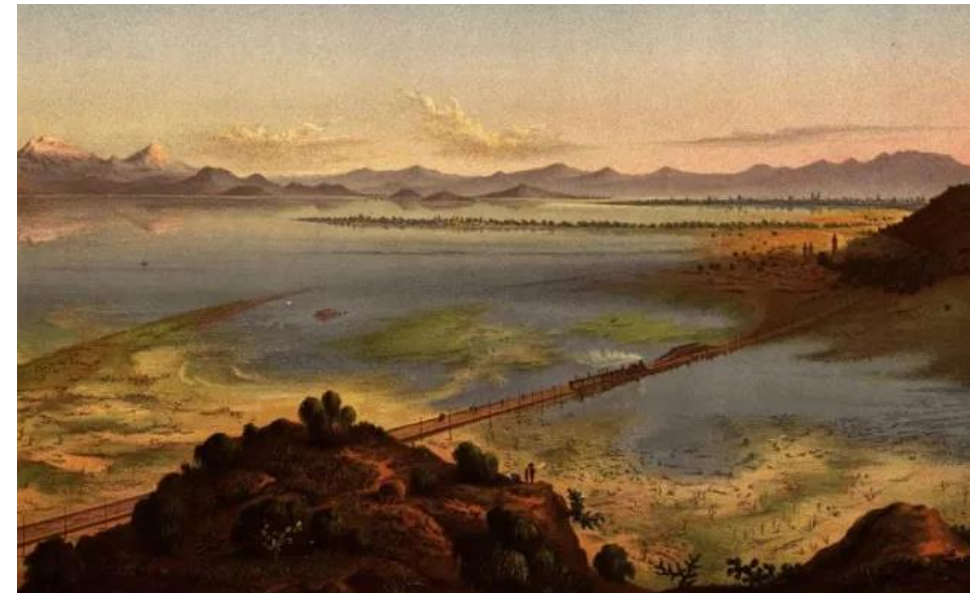
INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

Historia del ferrocarril mexicano

El ferrocarril mexicano ha pasado por **una época vertiginosa** de expansión y consolidación como uno de los **principales medios de transporte** hasta una **pérdida gradual de protagonismo** e incluso y, debido a la disminución de sus actividades, **se consideró al borde de la extinción**.

Desde su concesión en **1995**, el **transporte ferroviario de carga** en México ha mostrado un desarrollo y crecimiento constante lo que refleja claramente un **aumento continuo** interanual de las **toneladas** netas de mercancía transportadas.

Parte de las causas principales de este notable crecimiento, se debe a la **modernización del sector mediante el recambio y actualización de la flota tractiva y de arrastre**



Vista del Valle de México en 1877, desde el cerro del Risco, recreada por Casimiro Castro. (Antonio, 1877)

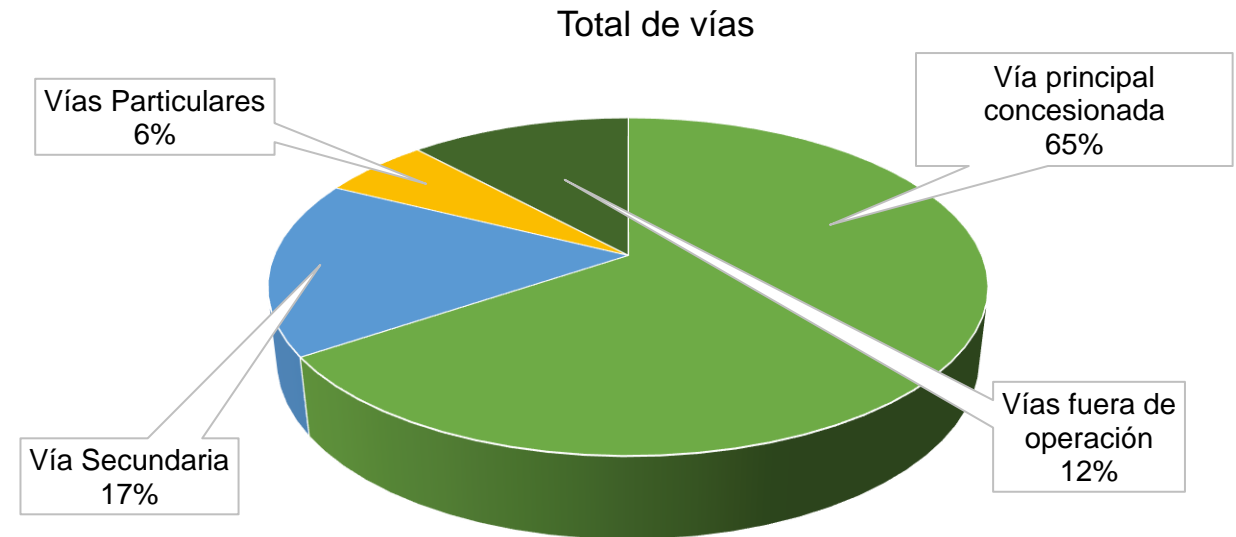
Contenido	Antecedentes	Conceptos generales	Diseño geotécnico	Evaluación de la capacidad estructural	Instrumentación y monitoreo
-----------	--------------	---------------------	-------------------	--	-----------------------------



La red ferroviaria actual cuenta con 26,914 kilómetros de longitud; de los cuales las vías en operación representan el 88% y las vías fuera de operación el 12% restante.

Tabla 1. Composición de las vías Férreas del SFM 2021. Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2022). Dirección de Estadística Ferroviaria. Anuario Estadístico Ferroviario 2021. Ciudad de México.

Tipo de vía	Longitud
Vía Principal Concesionada	17,643 km
Vía Secundaria	4,533 km
Vías Particulares	1,555 km
TOTAL (Vía operada)	23,731 km
Vías fuera de operación	3,183 km
TOTAL	26,914 km



Porcentaje de vías en operación y fuera de operación

Del año 2011 al 2021 la longitud de vías férreas ha incrementado 1,664 km aproximadamente, esto contemplando los kilómetros que se encuentran en fase de construcción en la ruta del Tren Maya.

Barroso J. (2023) "Análisis y diseño geotécnico para vías férreas". Tesis de Maestría, Programa de Maestría y Doctorado: UNAM.



Transporte de carga



Mapa del Sistema Ferroviario Mexicano. Anuario Estadístico Ferroviario (2021).

Transporte de pasajeros



Red de vías férreas para servicio de pasajeros. Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2022). (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2020)



Proyección del sistema ferroviario mexicano

El Programa Nacional Ferroviario 2022 se integra con 15 obras y proyectos, e incluye trenes de carga, trenes de pasajeros y libramientos ferroviarios y abarca los siguientes alcances:

- ✓ Construcción de nuevas vías férreas
- ✓ Rehabilitación y modernización de vías férreas
- ✓ Fortalecimiento de la logística a través de una mayor conectividad

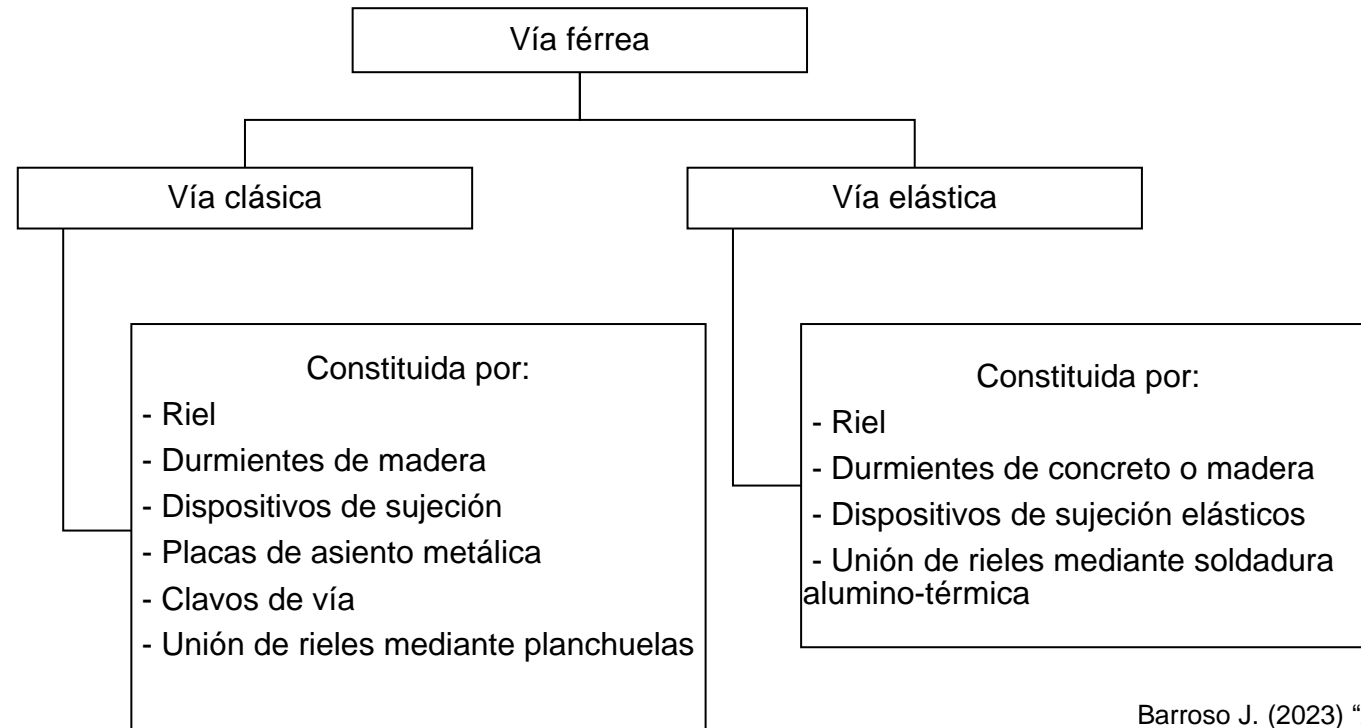


Contenido	Antecedentes	Conceptos generales	Diseño geotécnico	Evaluación de la capacidad estructural	Instrumentación y monitoreo
-----------	--------------	---------------------	-------------------	--	-----------------------------



Componentes de una vía férrea

Una vía férrea se compone de forma general por dos hileras de rieles, los cuales se encuentran sujetos a los durmientes, que a su vez se encuentran colocados por encima de la primera capa de material de la subestructura de la vía. Existen dos tipos de vía férrea, la clásica y la elástica.



Unión con planchuelas para vía clásica



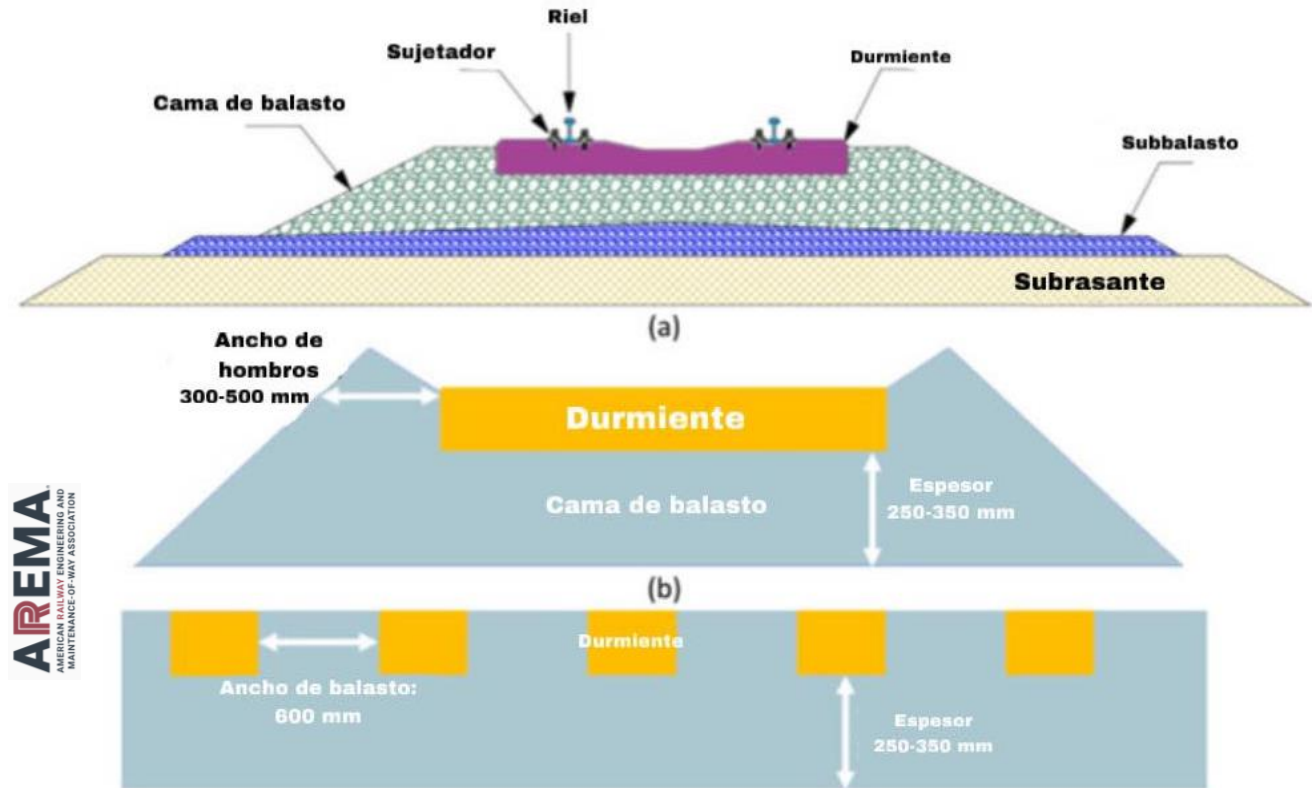
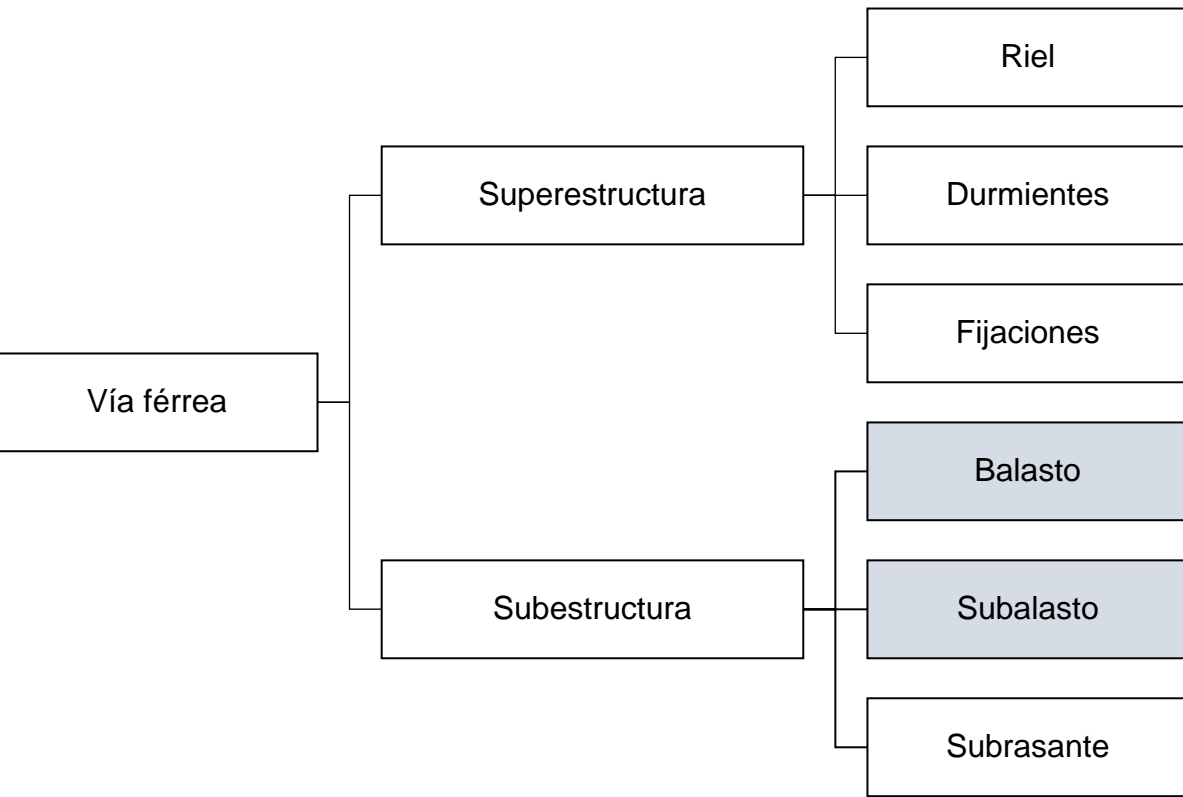
Unión con soldadura alumino-térmica para vía elástica

Barroso J. (2023) "Análisis y diseño geotécnico para vías férreas".



Superestructura y subestructura

La configuración general que presenta una vía férrea desde el punto de vista estructural se muestra a continuación:



Barroso J. (2023) "Análisis y diseño geotécnico para vías férreas".



➤ BALASTO:

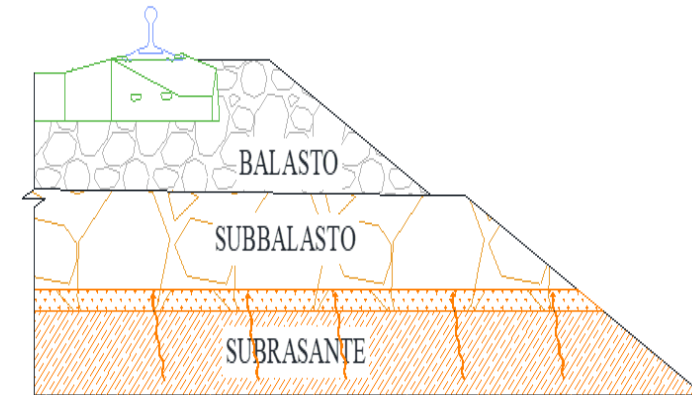
Material que conforma la capa superior de la subestructura, el cual consiste en una roca triturada que soportará, transmitirá y distribuirá la mayor concentración de cargas generadas por el paso del ferrocarril. Deberá cumplir con ciertas especificaciones para que su objetivo principal, mencionado anteriormente, se cumpla en la mayoría de casos

➤ SUBBALASTO:

Capa de material granular-térreo sobre la cual se encuentra apoyada directamente el balasto. Sus características deben ser adecuadas para soportar presiones transmitidas desde la superestructura de la vía. Al igual que el balasto, debe distribuir las presiones hacia la capa subyacente o hacia el terraplén, proporcionar un correcto drenaje de aguas pluviales, etc.

➤ SUBRASANTE:

Esta capa se puede formar con el mismo material que el terraplén, sin embargo, cabe destacar que debe ser **correctamente tratado y en estricto apego a la normatividad aplicable para que su funcionamiento pueda ser correcto.**



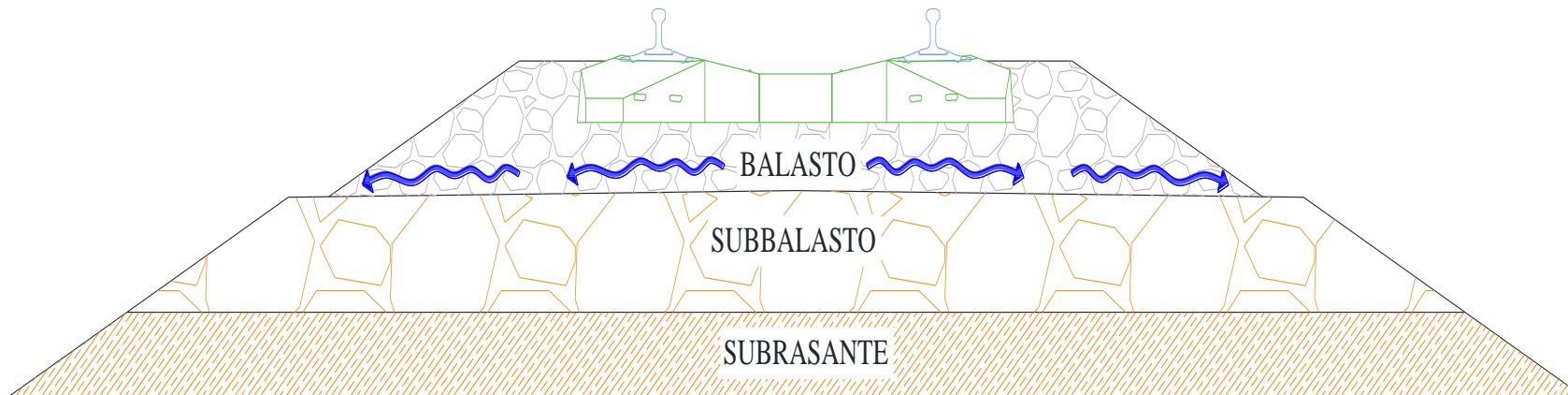
Barroso J. (2023) "Análisis y diseño geotécnico para vías férreas". Tesis de Maestría, Programa de Maestría y Doctorado: UNAM.



Subestructura

Estas capas de materiales granulares se colocan con el fin de:

- ✓ Permitir el drenaje dentro de la subestructura.
- ✓ Distribuir y transferir las cargas de la superestructura.
- ✓ Facilitar el ajuste de la alineación, la pendiente y el nivel transversal de la superestructura de la vía sin necesidad de una reconstrucción del sistema.





Propiedades que influyen en el funcionamiento del balasto y sub-balasto

Granulometría

% Finos

Tamaño y forma de partículas

Angulosidad

Rugosidad

Resistencia a la meteorización

Resistencia al desgaste

controlan

Resistencia al esfuerzo cortante, ϕ

Deformabilidad, M_r (Módulo resiliente)

Permeabilidad, k

Otros aspectos que influye significativamente es **el contenido de agua y el grado de saturación de la capa**



Propiedades y parámetros que influyen en el funcionamiento del balasto y sub-balasto

PROPIEDAD/PARÁMETRO	Resistencia al corte	Rigidez	Permeabilidad
Granulometría	X	X	X
% de finos	X	X	X
Tamaño y forma de partículas	X	X	X
Angulosidad, rugosidad y forma	X	X	
Litología de la roca	X	X	



Propiedades que influyen en el funcionamiento del balasto y sub-balasto, y sus respectivos daños asociados

Propiedades

Granulometría
% Finos
Tamaño y forma de partículas
Angulosidad
Rugosidad
Resistencia a la meteorización
Resistencia al desgaste



Daños asociados

Hundimientos
Deficiencias en el drenaje
Reducción de la resistencia al esfuerzo cortante
Reducción de la rigidez
Desgaste de agregados



Propiedades requeridas para el subbalasto

Propiedades generales que presenta el subbalasto. (Li, Hyslip, Sussmann y Chrismer, 2016).

Propiedad	Valores
Ángulo de fricción, ϕ	25° a 40°
K_0	0.40 a 1.0
Módulo resiliente, Mr	55 a 105 MPa
Relación de Poisson	0.30 – 0.40
Permeabilidad (mínima)	100 mm/día

Propiedades generales que presenta el balasto. (Indraratna y Ngo, 2018)

Propiedad	Valores
Ángulo de fricción	45° a 60°
Módulo resiliente, Mr	200 a 275 MPa
Permeabilidad	Dependerá del tipo de roca y de su origen



Normas y procedimientos para la caracterización del balasto

- Lineamiento de la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF), Febrero de 2020

Este lineamiento describe las características que deben cumplir los materiales considerados para balasto ferroviario de vías para tráfico de pasajeros y mixto. Recomienda el uso de materiales provenientes de la trituración de algunas rocas de origen ígneo y sedimentario.

- Normas europeas UNE 14146 y UNE 13450

Indica textualmente que las rocas de las que haya de extraerse el balasto tipo 1 (líneas con velocidad > 200 km/h) y tipo 2 (líneas con velocidad < 200 km/h) serán de naturaleza silíceas de origen ígneo o metamórfico. Para el balasto tipo 3 (líneas convencionales) excepcionalmente se admitirán rocas de origen sedimentario, siempre y cuando cumplan con las especificaciones correspondientes.

- AREMA

Recomienda el uso de materiales para balasto provenientes de la trituración de rocas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario específicamente incluye las rocas carbonatadas (caliza y caliza dolomítica) definidas como aquellas formadas por más del 50% de minerales carbonatados.



Lineamientos para balasto, comparación de las diferentes normativas

			EUROPEA (UNE)	AREMA	MÉXICO
Granulometría	Tamaño del balasto, mm	Máximo	50	75	Para ser empleado como balasto, la relación entre el volumen que pasa el tamaño máximo (D=63 mm) y mínimo (d=31.5 mm) deberá ser igual a 2.
		Mínimo	31.5	25.4	
Resistencia a la compresión	Kg/cm ²	Carga puntual Franklin	1200	N/A	1000
		Compresión simple			
Espesor mínimo	mm		27	N/A	25
Densidad	Kg/m ³			2.6	2.6
Resistencia a la fragmentación	%LA	Tipo 1	14	30	Depende del origen del material y la aplicación.**
		Tipo 2	16		
Partículas alargadas y/o planas	%	Alargadas	10	N/A	5.0
		Planas	15		
% de finos	%	En obra	1.0	1.0	1.0
		En lugar de producción	0.6		

* Las granulometrías de los lineamientos mexicanos, dependientes de las curvas granulométricas son casi iguales a las de AREMA.

** para dolomitas el % es < 18

Barroso J. (2023) "Análisis y diseño geotécnico para vías férreas". Tesis de Maestría, Programa de Maestría y Doctorado: UNAM.



Normas y litología de la roca originaria para balasto

UNE-EN 13450

- Roca de naturaleza silíceo de origen ígneo o metamórfico.
- Prohíbe rocas de naturaleza caliza, dolomítica, en general roca sedimentaria, cantos rodados y mezclas de rocas de diferente naturaleza geológica.

AREMA

- Roca ígneas y metamórficas
- Rocas carbonatadas tipo calcitas y dolomitas.
- Escoria de altos hornos y hornos de acero.

Lineamientos para
balasto ferroviario

- Rocas ígneas
- Para el estado de Tabasco, Campeche y Quintana Roo se aceptan rocas dolomíticas.

Estudios y modelos geológicos y geotécnicos geotécnico y modelo geotécnico.

Al igual que todo proyecto vial, en los proyectos ferroviarios, deben hacerse estudios para definir el modelo geológico y geotécnico de trazo de la vía.

- Tipos, secuencia y espesores de capas de suelo y roca
- Determinación de parámetros físicos y mecánicos
- Identificación de fallas
- Identificación de la presencia de aguas freáticas, flujos de aguas subterráneas
- Otros

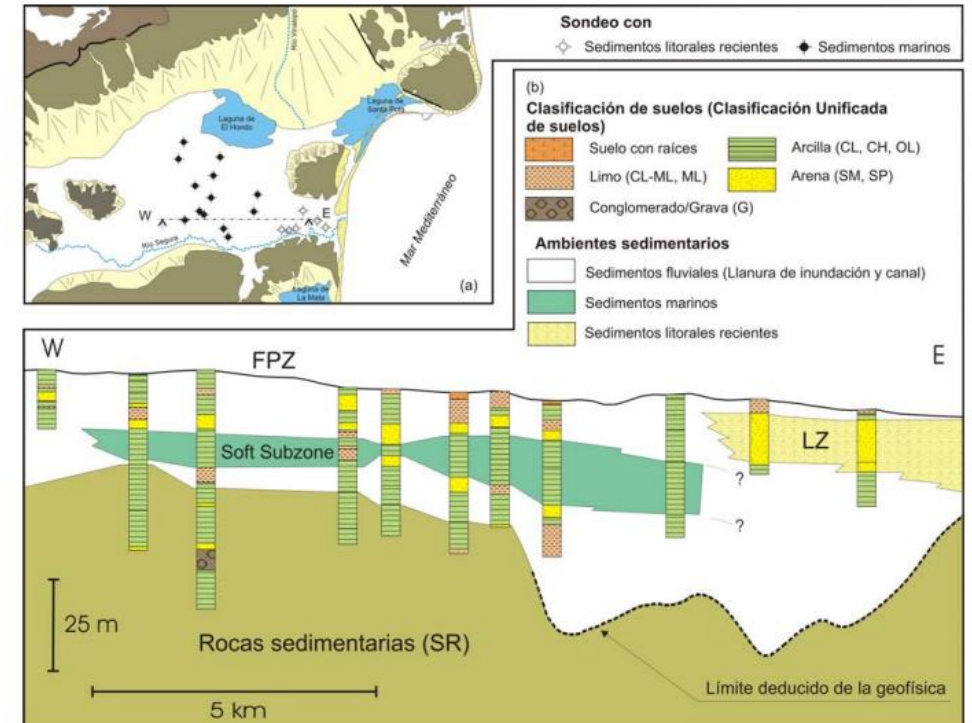


Fig. 1.- (a) Disposición de sedimentos marinos y litorales en los sondeos. (b) Ambientes y tipos de suelos (modificado de Delgado et al., 2003).

<https://core.ac.uk/download/pdf/16373195.pdf>

Métodos de diseño para el grosor de la capa granular.

- La capa granular se define como la combinación del espesor del balasto y subbalasto.
- El diseño adecuado del espesor de la capa granular previene la falla progresiva por corte y las deformaciones plásticas excesivas.
- Un espesor inadecuado genera incrementos de costos de mantenimiento ó sobrecostos iniciales asociados al sobredimensionamiento.
- Los esfuerzos en la base de la capa granular, causados por el tránsito ferroviario, son generalmente el parámetro que determina el buen rendimiento de esta capa.

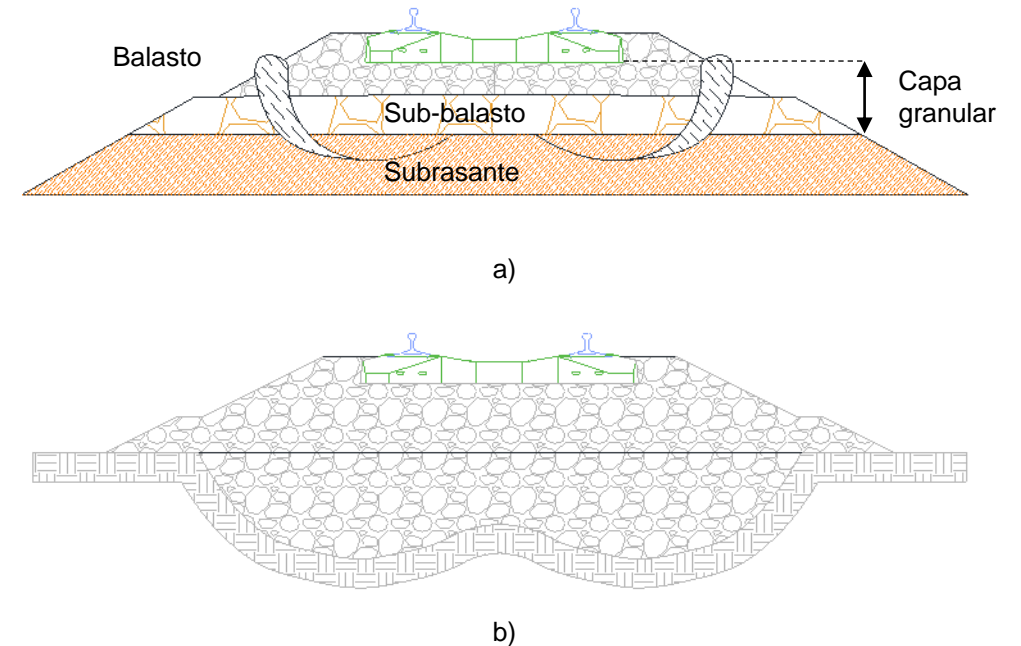


Figura X. a) Esquema de la falla por corte progresiva en la superficie de la subrasante. b) Esquema de la falla por excesiva deformación plástica en la subrasante.



Método de Talbot (1921). Criterio aceptado por AREMA

Utiliza una ecuación empírica basada en el desarrollo de pruebas de campo desarrolladas durante los primeros años del siglo XX.

$$h = \left(\frac{16.8 \cdot p_a}{p_c} \right)^{4/5}$$

h = Espesor de la capa granular.

p_a = esfuerzo vertical en la base del durmiente.

p_c = presión admisible de la capa de apoyo (138 kPa, AREMA).

El valor de p_a , causado por el paso del tren depende de los siguientes factores y variables:

$$P_a = \frac{\left[2P \left(1 + \frac{IF}{100} \right) \left(\frac{DF}{100} \right) \right]}{A}$$

P = Peso de la rueda.

A = Área de la cara del durmiente.

IF = Factor de impacto.

DF = Factor de distribución.

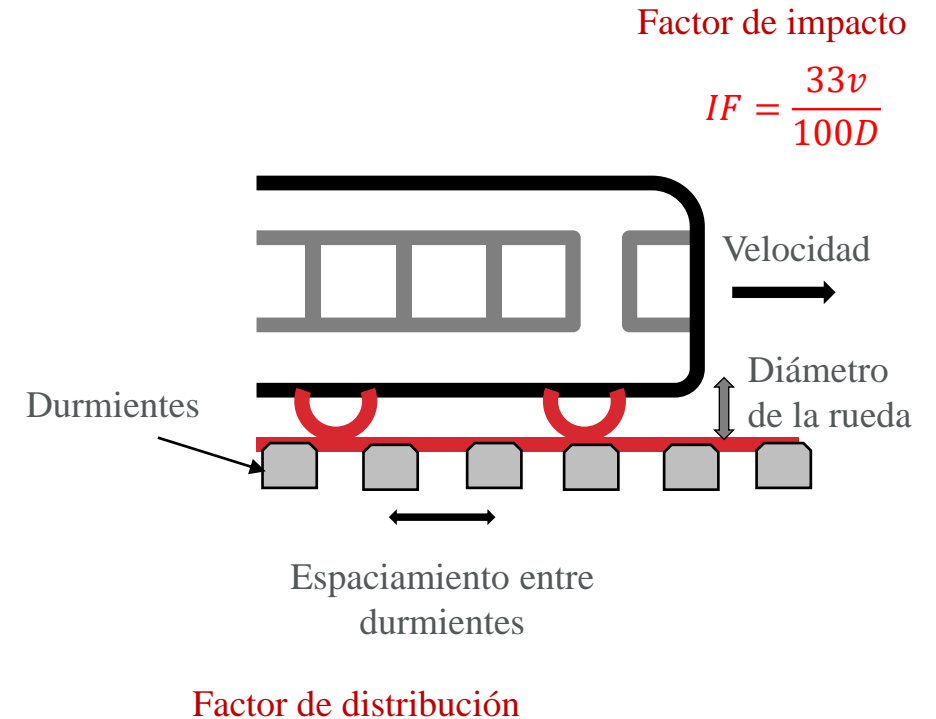


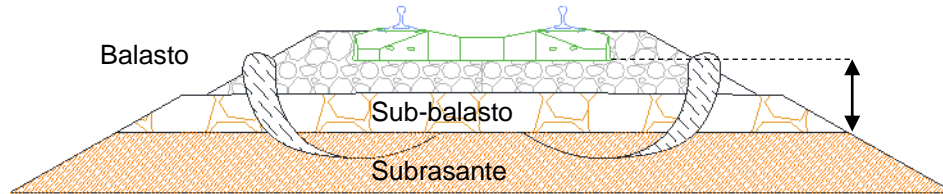
Figura X. a) Esquema de las variables implementadas para encontrar los factores de la ecuación de Talbot.



Método de Li y Seling (1998).

- Metodología enfocada a subrasantes de suelos blandos, basada en el rendimiento de la subrasante bajo cargas repetidas.
- Toma en cuenta la resistencia a la compresión simple, el módulo resiliente y el tipo de suelos en la subrasante y la capa granular.

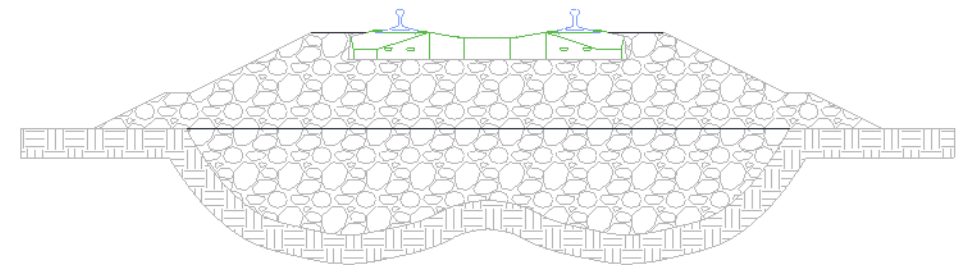
Se limita ($\epsilon\%$) deformación plástica acumulada en la superficie de la subrasante.



$$\epsilon_p \% = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b$$

- Implementa el número total de repeticiones de la aplicación de la carga para un periodo de diseño.
- No analiza el escenario de falla al interior de las capas granulares.
- Toma en cuenta la fatiga de la subrasante.

Se limita (ρ) deformación plástica acumulativa a lo largo de la capa de subrasante.



$$\rho = \int_0^T \epsilon_p dt$$



Método de Li y Seling (1998).

Modelo empírico mecanicista.

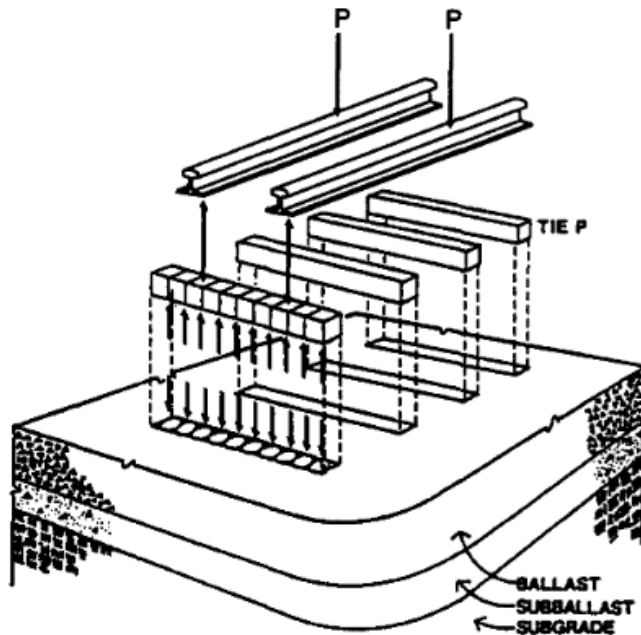
Componente mecanicista

La relación espesor granular- σ_d se estima a través de un Modelo elástico multicapa con los componentes de una vía férrea, variando las propiedades mecánicas de la capa granular y la subrasante. (GEOTRACK)

Componente empírico

Toma en cuenta la fatiga de la subrasante a través de leyes evaluadas empíricamente.

$$\varepsilon_p \% = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b$$





Modelación numérica mediante el método de elemento finito.

- No limita el número de capas que conforman la estructura de la vía.
- Caracteriza los materiales a través de modelos de comportamiento realistas, por lo tanto, no limita el tipo de materiales a considerar.

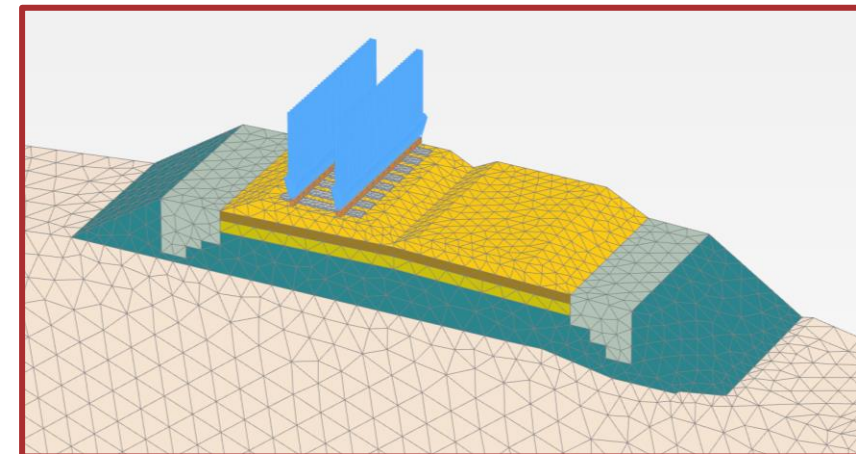
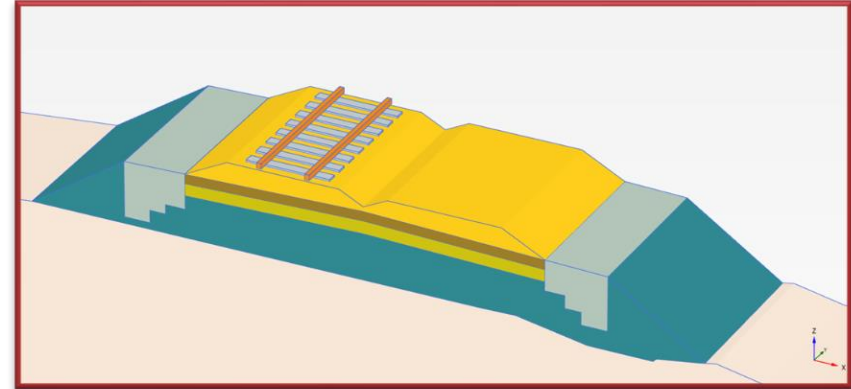
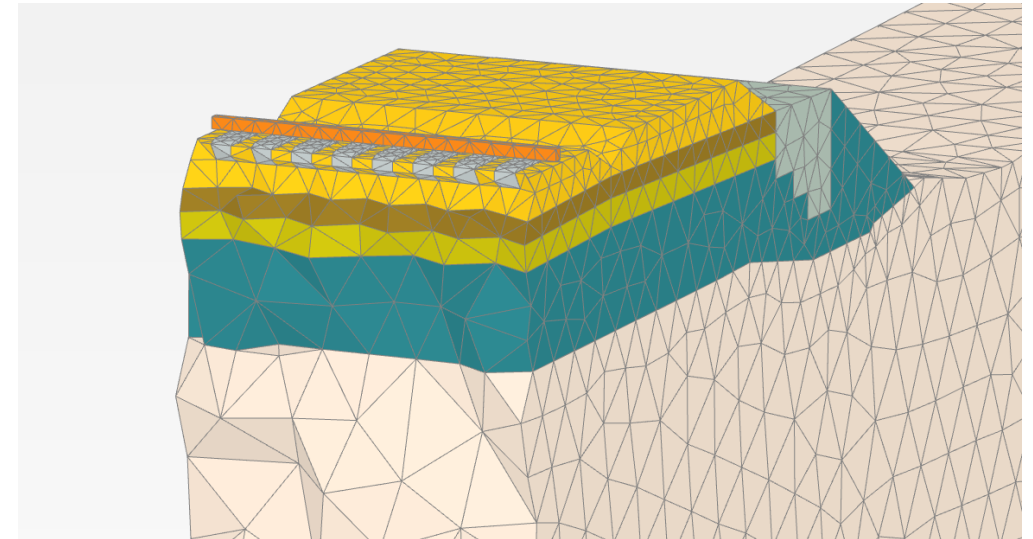


Figura 1. Modelación numérica mediante el método de elemento finito.

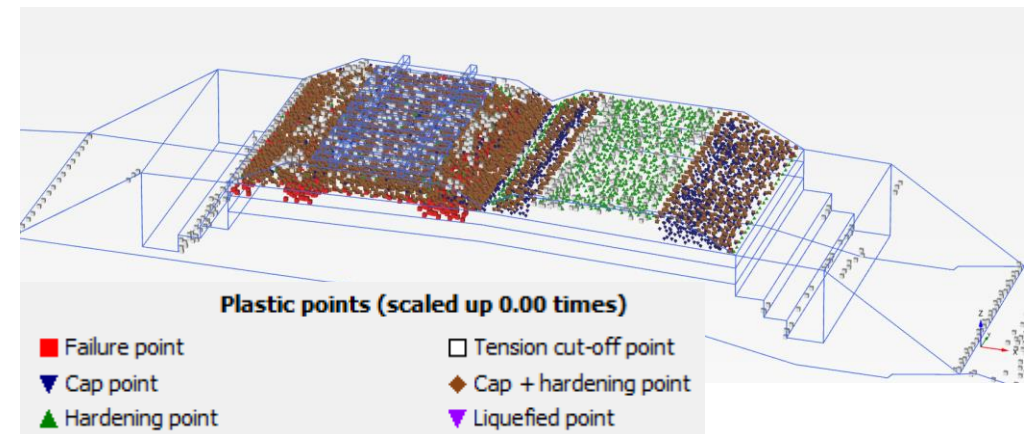


Método de elemento finito.

- Modelos de comportamiento realistas por lo tanto no limita el tipo de materiales a considerar
- Permite evaluar configuraciones geométricas de espaciamiento y dimensión de durmientes



Corte transversal del modelo 3D. Se observa la configuración geométrica y el espaciamiento entre durmientes.



Caracterización del balasto con un modelo de comportamiento Hardening soil
Puntos plásticos de Cap, hardening y falla.



Método de elemento finito.

- Permite conocer el estado de esfuerzos y deformaciones al interior de cada capa y los asentamientos en la superficie de la vía y por lo tanto comparar con umbrales permitidos
- Permite definir umbrales de deformaciones o desplazamientos para el monitoreo

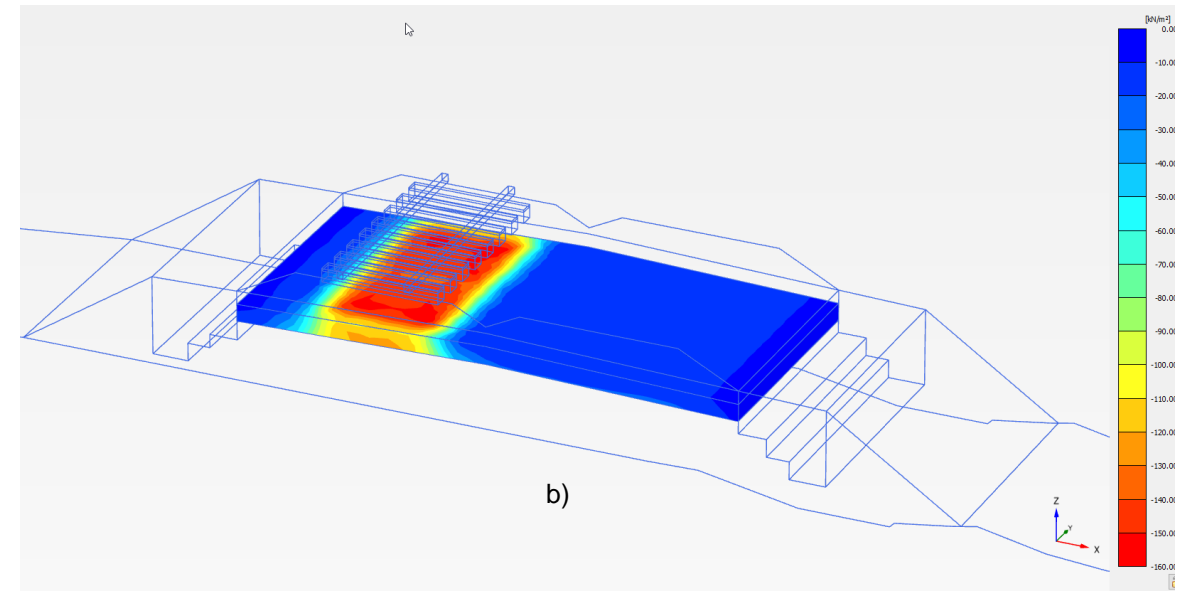
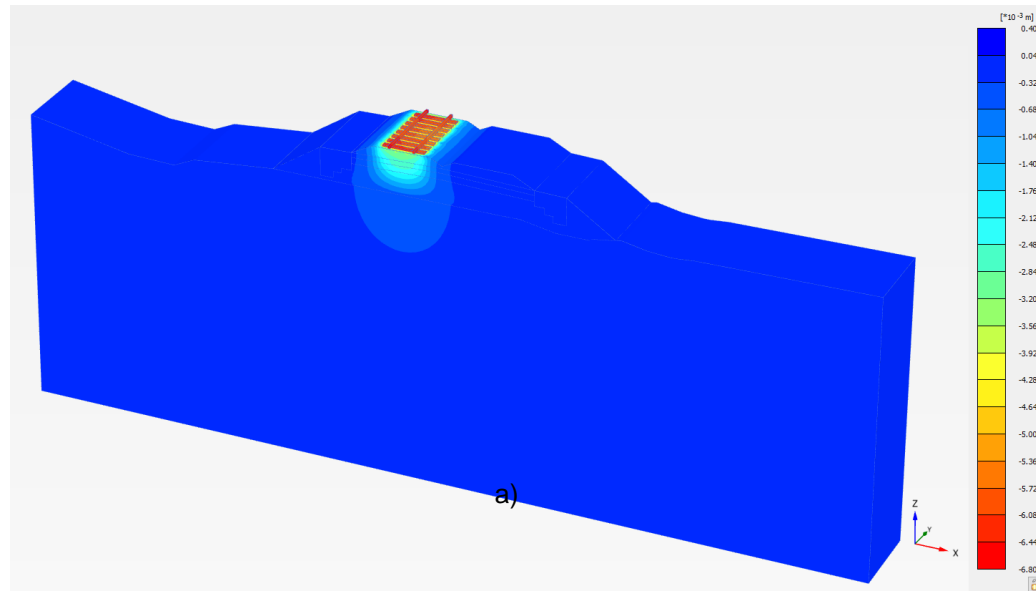
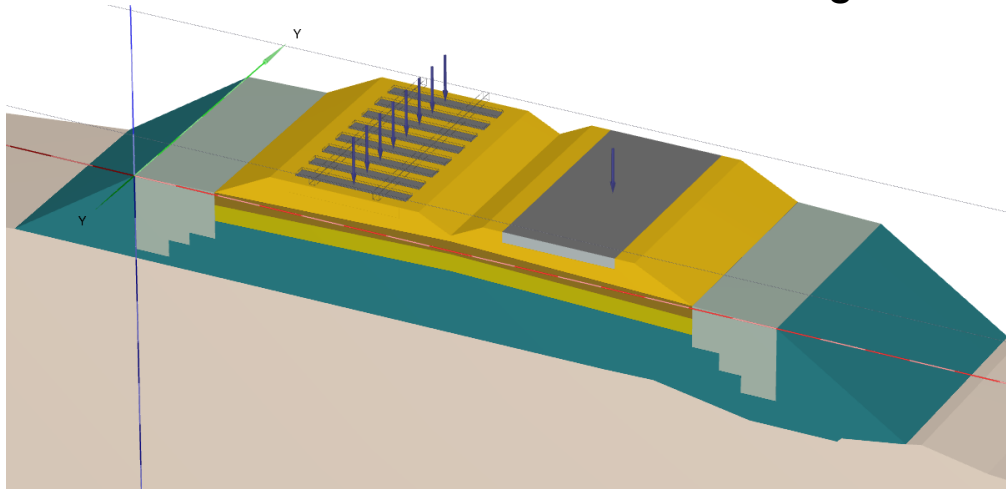


Figura X. a) Distribución de desplazamientos en dirección z con la aplicación de la carga del tren. b) Distribución de esfuerzos desviadores sobre la superficie de la subrasante con la aplicación de la carga.

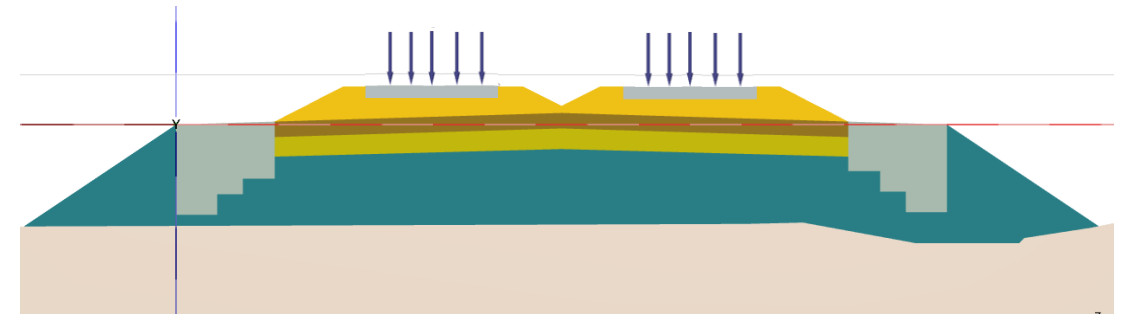


Método de elemento finito.

- En los análisis 2D se considera la carga transmitida a la subestructura a través de consideraciones que estiman la carga en la base del durmiente.
- En los análisis 3D se considera la carga en los rieles.



Modela numérico 3D. Lado derecho aplicando carga a cada uno de los durmientes. Lado izquierdo aplicando carga a una placa (contextualizado el Modelado 2D).



Modelo numérico 2D. Carga equivalente distribuida por metro lineal



Ventajas de la utilización de método de elemento finito en diseño de una vía férrea.

- No limita el número de capas que conforman la estructura de la vía.
- Simula configuraciones geométricas de espaciamiento y dimensión de durmientes.
- Simula la degradación de la rigidez con el paso de trenes (fatiga).
- Simula la presencia de elementos de refuerzo o sistemas de mejoramiento
- Simula la interacción de la vía con otras obras civiles (muros de contención)

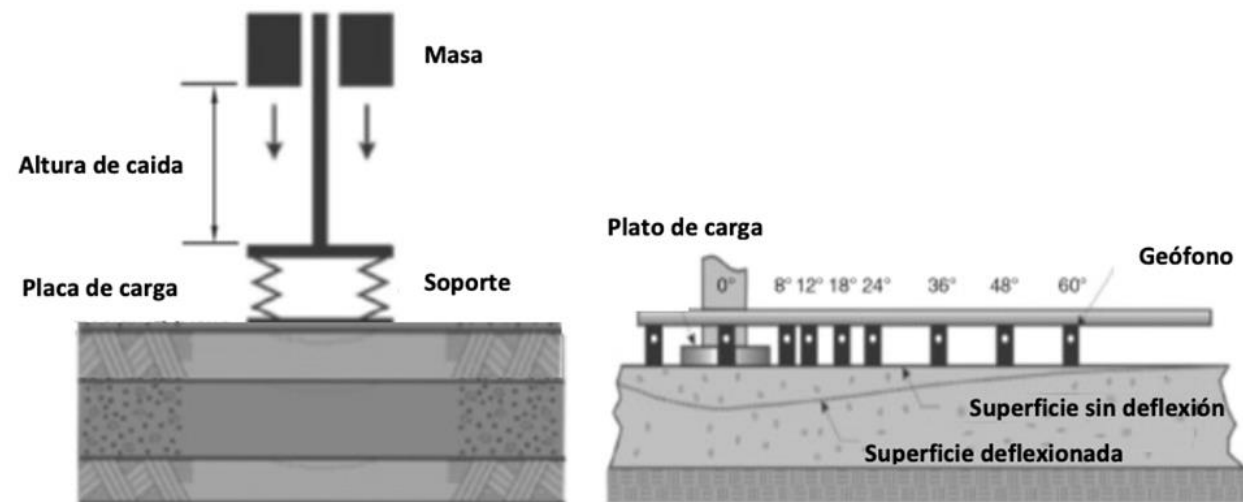


Estimación de rigideces mediante deflectometría de impacto.

Este ensayo describe la medición de la respuesta de una deflexión vertical en la superficie a una carga de impulso aplicada.



Deflectómetro de impacto en proyectos ferroviarios en operación

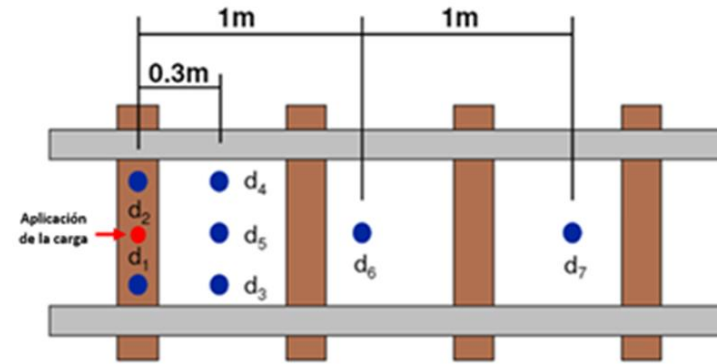


La deflectometría de impacto es un procedimiento de ensayo no destructivo, para evaluar las deformaciones de superficies y estimación de módulos de rigidez en proyectos carreteros, aeroportuarios y férreos, mediante un dispositivo de carga por impulsos del tipo de caída de masa libre.

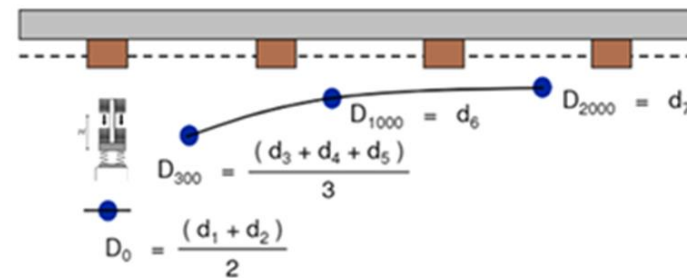


**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Pruebas sobre la superestructura (durmientes y rieles)

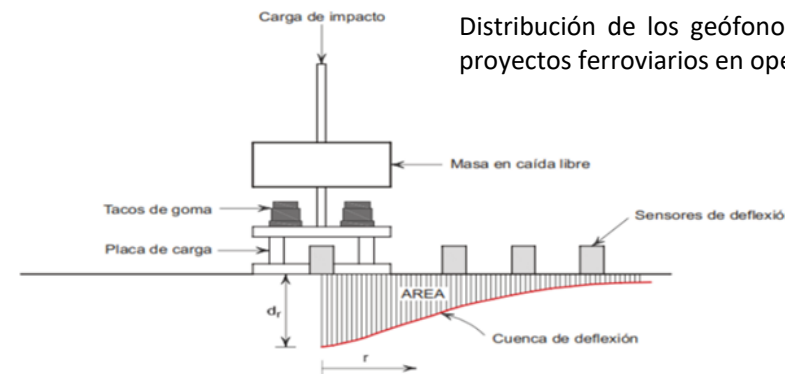


Ubicación de los geófonos del equipo FWD

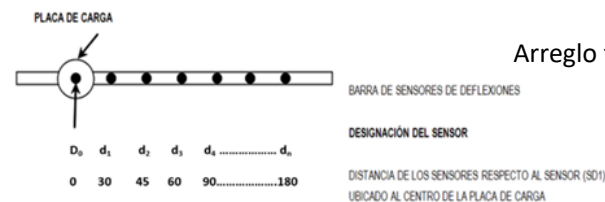


Muestra de la forma de la cuenca de deflexiones

Pruebas sobre la subestructura (capa de balastro o sub-balasto)



Distribución de los geófonos del deflectómetro de impacto en proyectos ferroviarios en operación.



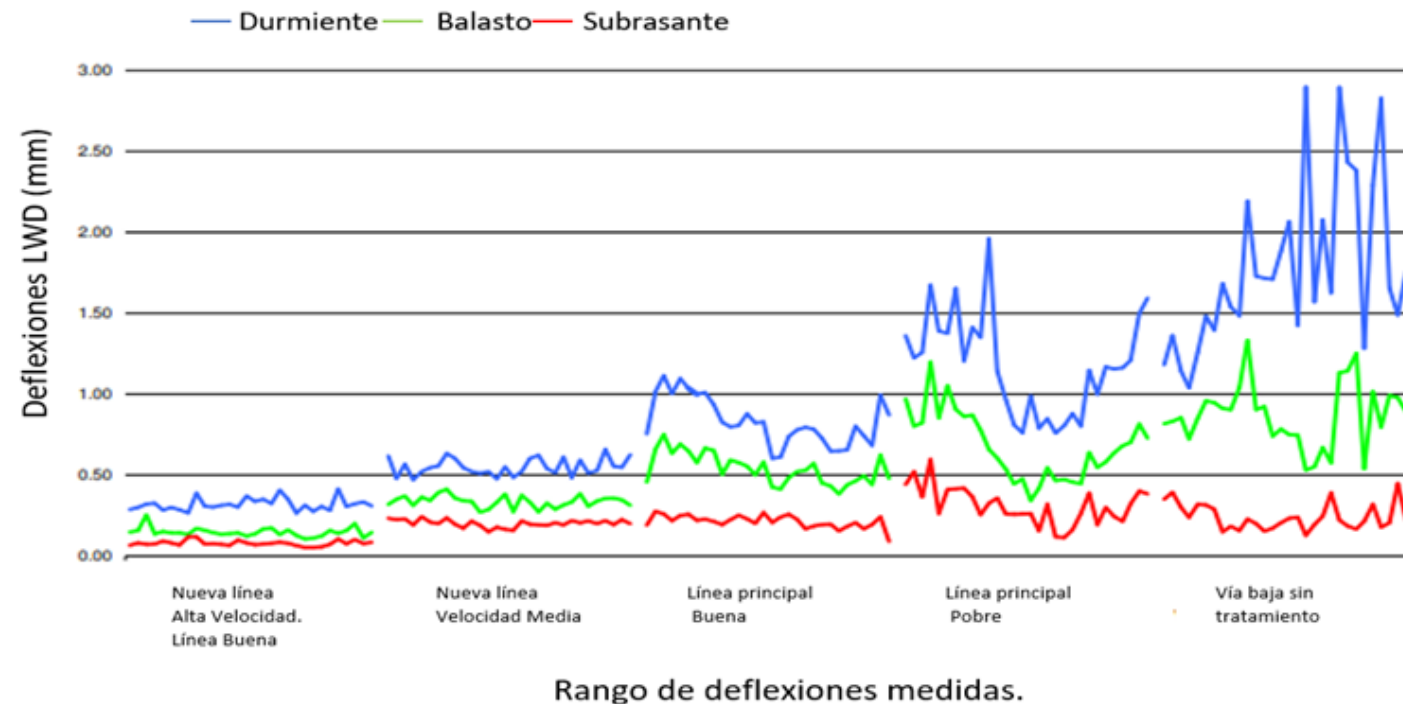
Arreglo típico de geófonos en el deflectómetro de impacto



Estimación de rigideces mediante deflectometría de impacto.

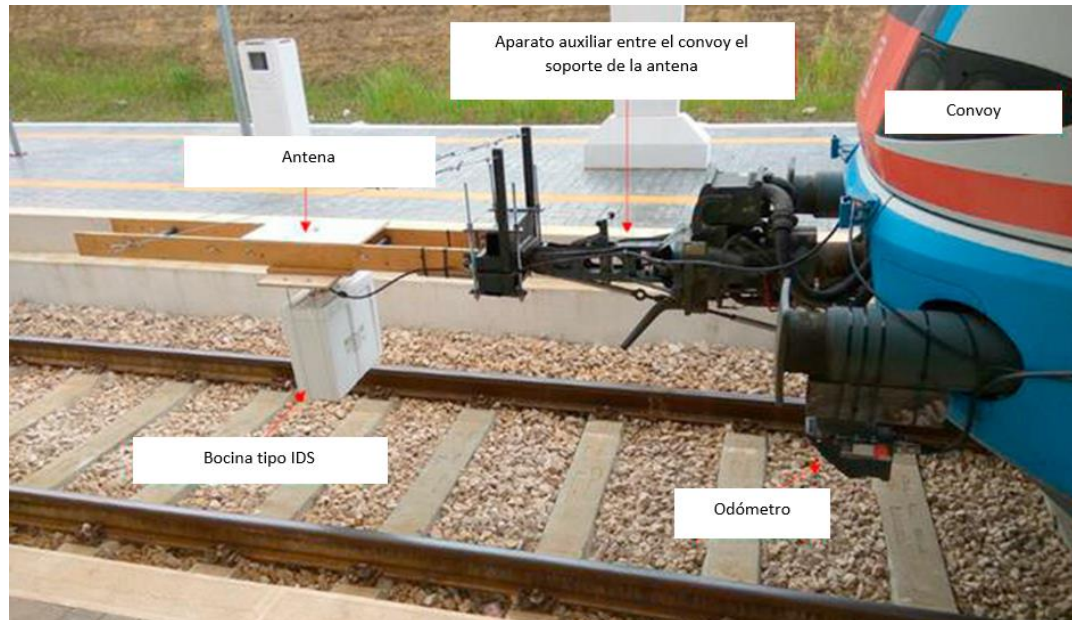
Los resultados de la prueba de deflectómetro de impacto se reportarán en términos de deflexiones en superficie y estimación del **módulo de rigidez dinámica** y **modulo de reacción dinámico** de cada capa o elemento.

De acuerdo a experiencias de datos recopilados en Reino Unido y Europa, se ha quedado definida la **calidad de la vía en función a una rigidez uniforme**, los valores de las deflexiones, estarán **ligados directamente con el valor de espesor y rigidez de la capa** o material analizado. (Sharpe, 1999).





Radars de Penetración Terrestre (Ground Penetrating Radar GPR)



GPR es una técnica no destructiva que utiliza radiación electromagnética para identificar la presencia de interfaces de capa entre los diferentes materiales que componen la construcción de la vía. Además, se utiliza como un indicativo de la profundidad del balasto, así como la condición del balasto y la formación.

Las adquisiciones GPR se llevaron a cabo utilizando dos sistemas de antena con frecuencias operativas de 1000 MHz y 2000 MHz.

Los sistemas GPR se montaron en un convoy de inspección y se suspendieron en el aire a 45 cm de altura de la superficie del balasto.



Radar de Penetración Terrestre (Ground Penetrating Radar GPR)

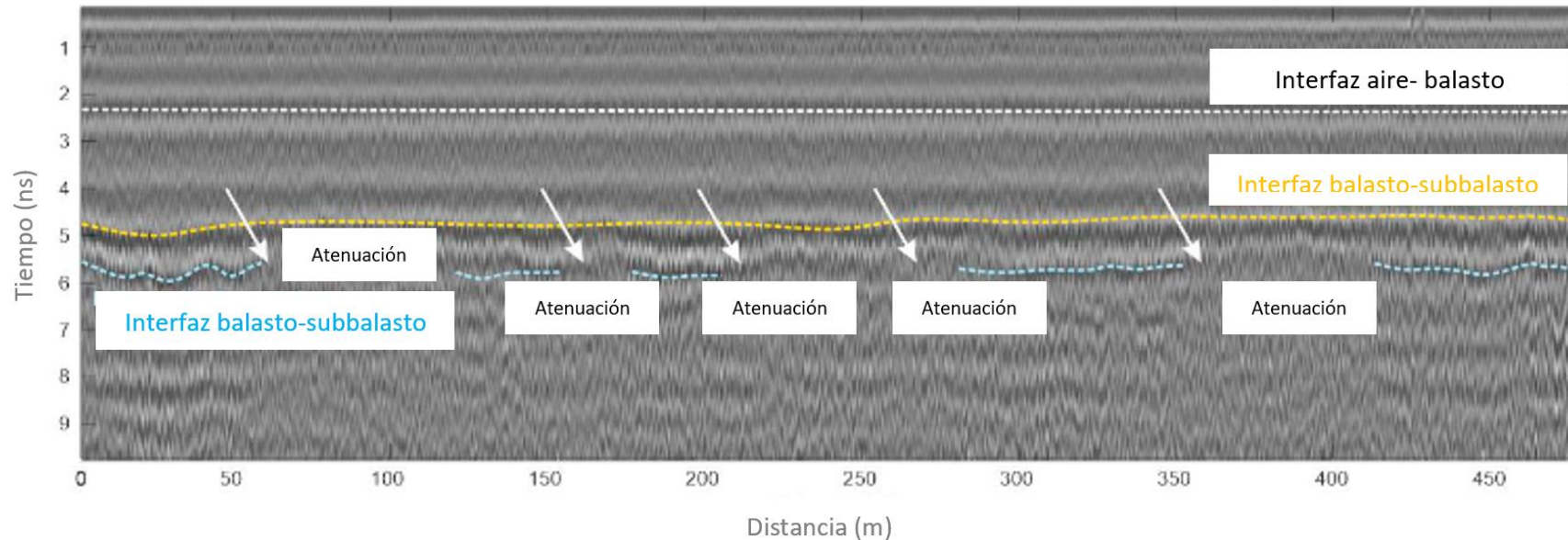


Grafico obtenido del GPR

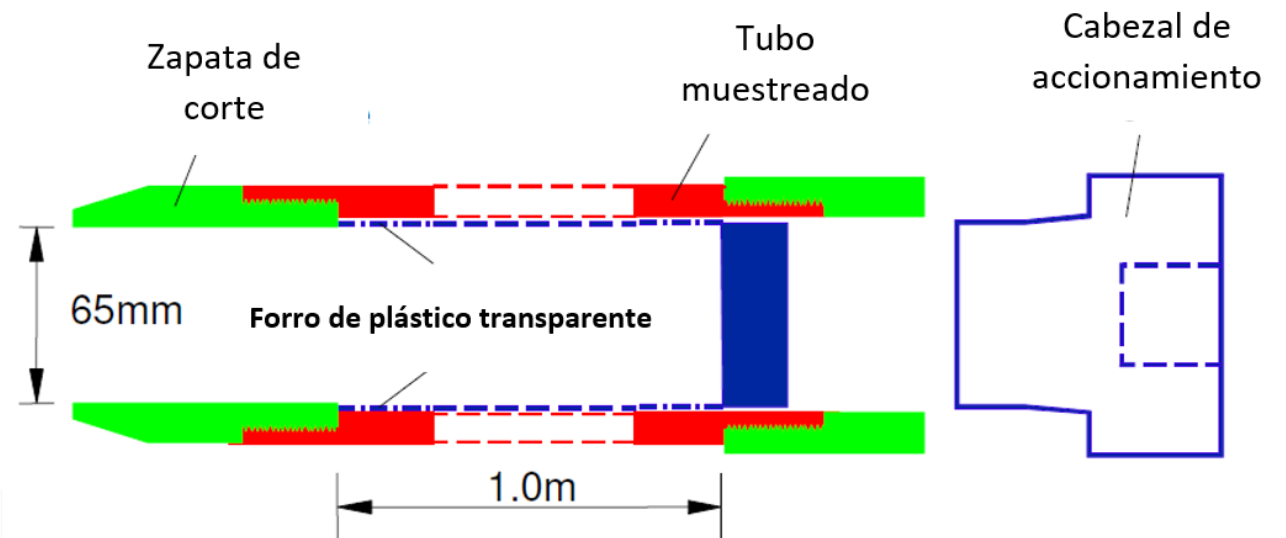
- Las profundidades de las capas se pueden estimar a partir del tiempo de viaje asumiendo la velocidad de propagación de la onda.
- Se pueden identificar las interfaces de capa entre los diferentes materiales que componen la construcción de la vía.
- Permite observar varios puntos afectados por la gran atenuación de la señal.



Muestreo Automático de Balasto (Automatic Ballast Sampling ABS)

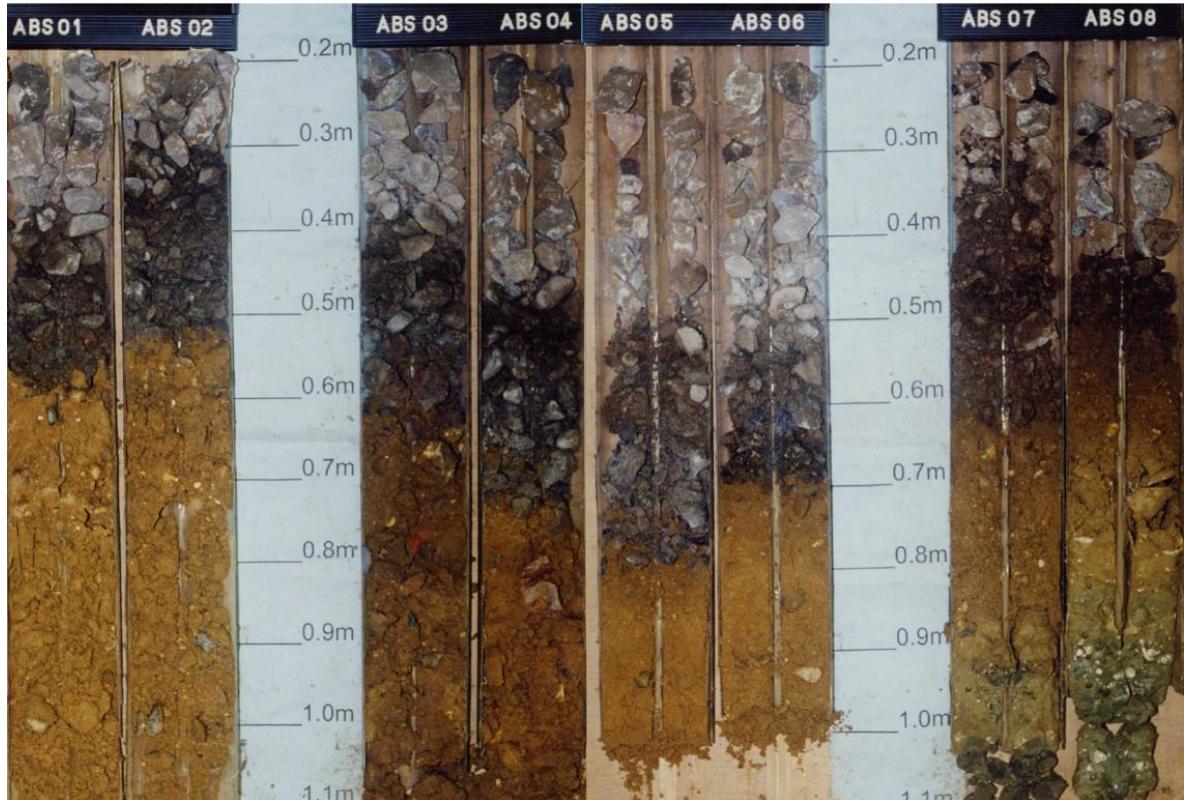


Se introduce en el lecho de la vía mediante un martillo accionado hidráulicamente. Se introduce en el lecho de la vía mediante un martillo accionado hidráulicamente. El dispositivo puede penetrar en el balasto y la formación para obtener una muestra de 65 mm de diámetro, normalmente a 1 m de profundidad, aunque puede utilizarse una profundidad de muestra de 0.6 m cuando sólo sea necesario registrar la profundidad y el estado del balasto





Muestreo Automático de Balasto (Automatic Ballast Sampling ABS)



Fotografías de núcleos de ABS

Las muestras se sellan en un tubo de plástico, lo que permite el examen fuera del sitio en condiciones controladas y un registro posterior de las capas de la formación y del lecho de la vía. La técnica da una idea de la condición y la vida residual del balasto directamente debajo de los componentes de la vía

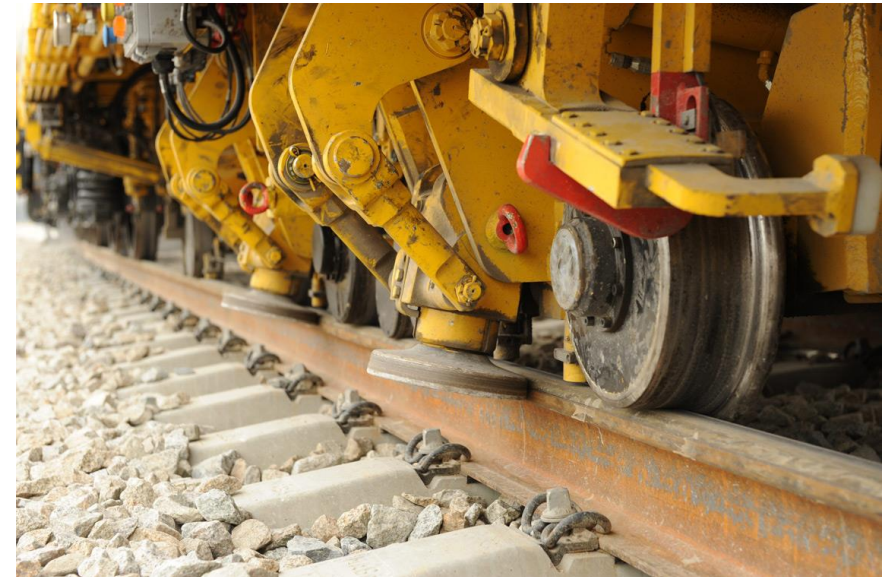
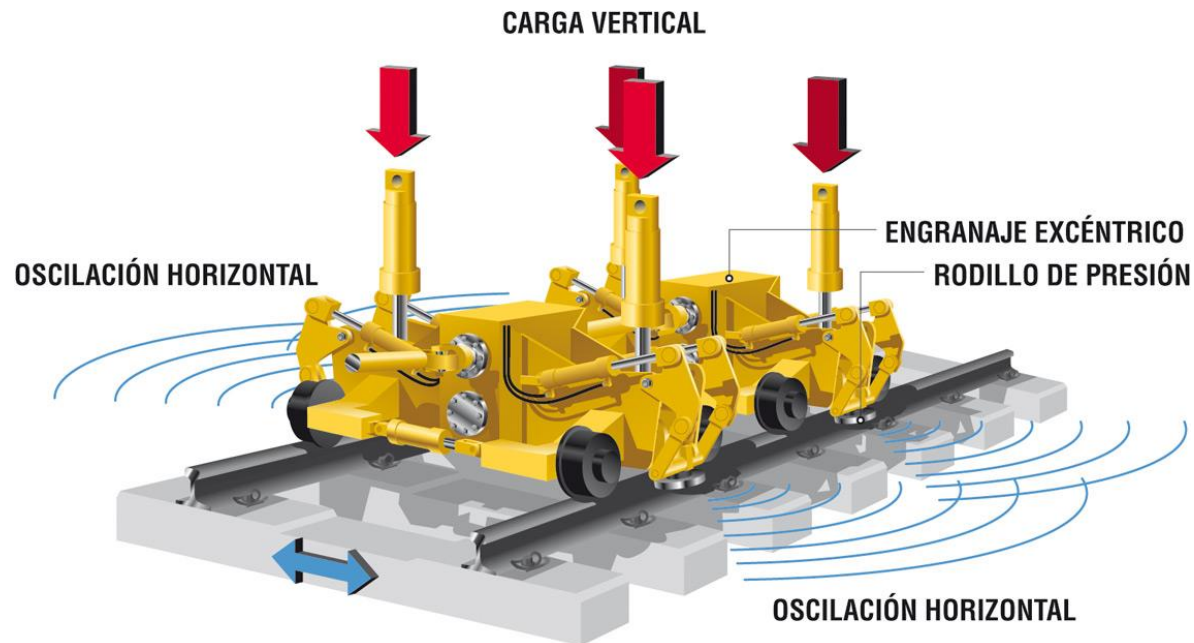




INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

Conservación y mantenimiento de la infraestructura de una vía férrea (NOM-003-ARTF-2018)

Estabilización del balasto



El estabilizador aplica una carga vertical estática para asentar la vía en el balasto y una vibración lateral que permite la reordenación del balasto y favorece el asentamiento de la estructura de la vía en el balasto.



Conservación y mantenimiento de la infraestructura de una vía férrea (NOM-003-ARTF-2018)

Balasto

La fresadora de vía se utiliza para retirar el balasto sucio de la estructura de la vía. Se utiliza una cadena de excavación para retirar el balasto viejo de la vía a una serie de cintas transportadoras y a una planta de cribado para separar el balasto útil.

- Aportes de finos tras su instalación
- Aportes desde el exterior (finos de minerales, acumulación de polvos del ambiente)
- Materiales finos provenientes desde la plataforma
- El fino que se produce por la presencia del tráfico



Vía con balasto limpio



Vía con balasto contaminado

El porcentaje máximo de finos es del orden del 30 % y cuando se supera el 40 % se debe proceder a su depuración

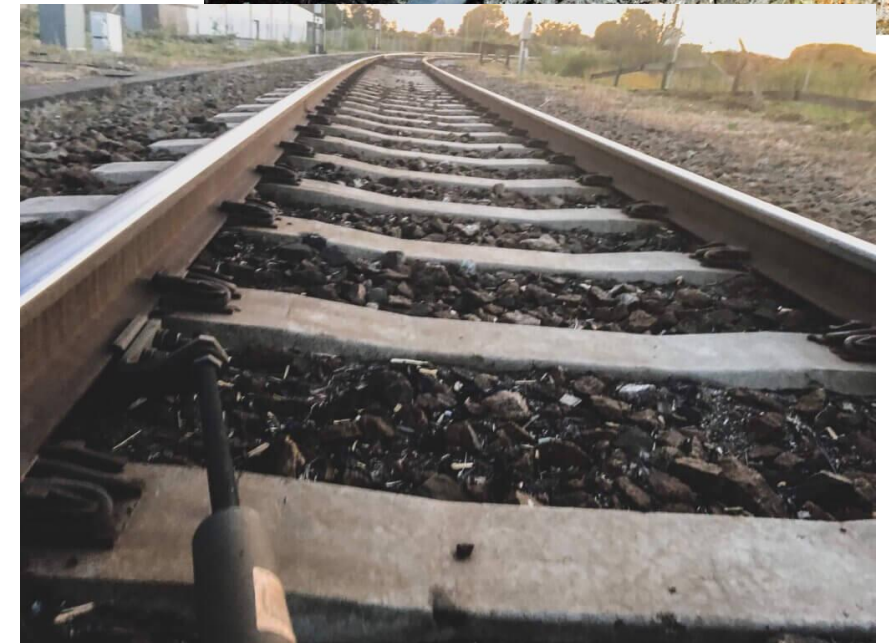


Conservación y mantenimiento de la infraestructura de una vía férrea (NOM-003-ARTF-2018).

Drenaje

Los problemas de la subestructura pueden estar relacionados con el drenaje y esto depende de la calidad de los materiales que componen la infraestructura.

Material		Capacidad de drenaje
GRAVA	GW	Excelente
	GP	Excelente a buena
	GM	Buena a muy baja
	GC	Baja a muy baja
ARENA	SG	Excelente
	SP	Excelente a buena
	SM	Buena a muy baja
	SC	Muy baja a no ser usado
SUELO FINO	ML	Buena a muy baja
	CL	Muy baja a no ser usado
	MH	Baja a muy baja
	CH	No ser usado
ORGÁNICO	OH	Baja a muy baja
	TURBA	Baja





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Requerimientos básicos para la inspección de la superestructura

Todas las vías, de acuerdo con su clase deben tener un mantenimiento adecuado para que puedan operar a la velocidad establecida para cada clase. El grado de mantenimiento está determinado por los requisitos de seguridad que debe cumplir cada vía, considerando la geometría y el estado físico de los componentes de la vía.

- Geometría
- Durmientes
- Defectos de riel
- Juntas de riel
- Fijaciones de riel



(NOM-003-ARTF-2018)

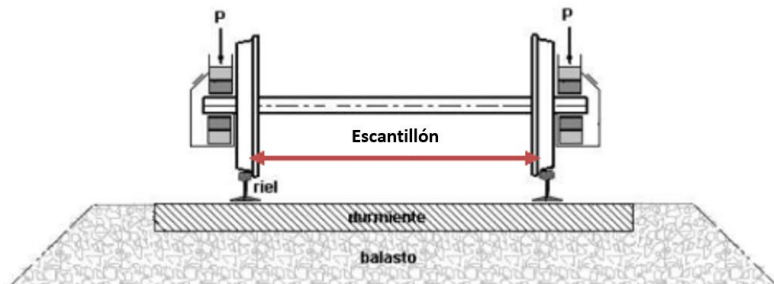


**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Requerimientos básicos para la inspección de la superestructura (NOM-003-ARTF-2018)

Geometría

Serie de requerimientos que se utilizan en el diseño de construcción y mantenimiento de la vía férrea tales como el ancho de la vía o escantillón, alineamiento, nivelación, elevación de los rieles exteriores en curvas, superficie de rodamiento de los rieles y los límites de velocidad.





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Requerimientos básicos para la inspección de la superestructura (NOM-003-ARTF-2018)

Durmientes.

Su función es soportar las cargas rodantes y transmitir las a la suestructura, distribuyéndolas a la infraestructura evitando que no se produzcan deformaciones perjudiciales en ésta.



Vía del istmo de Tehuantepec (febrero, 2022)





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Requerimientos básicos para la inspección de la superestructura (NOM-003-ARTF-2018)

Defectos de riel.

El riel cumple sus funciones básicas: pista de rodadura, elemento soporte de la carga de las ruedas de los trenes y de guiado de las cejas de las ruedas. El riel es el componente principal de la vía, el más costoso y por lo mismo al que se le debe dedicar cuidados especiales para su conservación.





Requerimientos básicos para la inspección de la superestructura (NOM-003-ARTF-2018)

Juntas del riel

Debido a los efectos dinámicos, son los puntos más débiles de la vía. La causa es que la rigidez de la vía en esa zona es discontinua, porque se produce una variación del momento de inercia disponible.



Fijaciones del riel

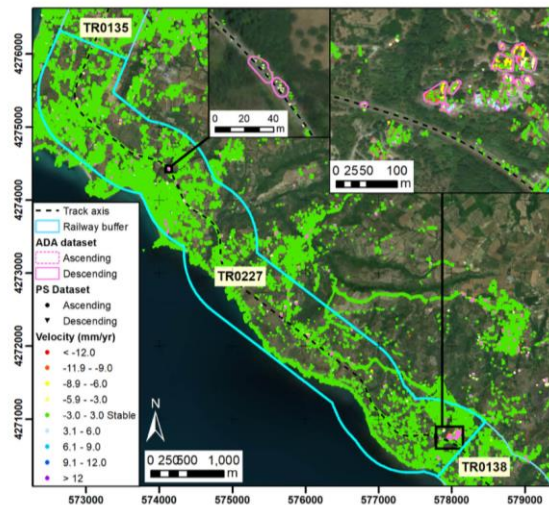
El sistema de fijación es el conjunto de elementos que sujetan el riel contra el durmiente para evitar desplazamientos laterales, longitudinales o verticales del riel, que afectan el alineamiento, el escantillón o la nivelación de la vía.



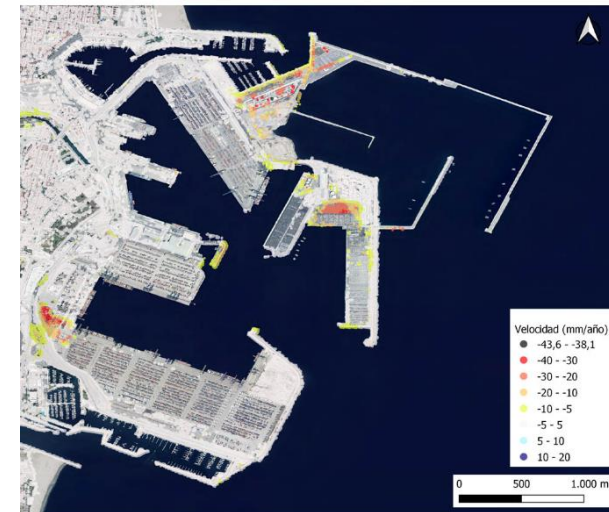


DEFINICIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO

- **Monitoreo global:** Técnica INSAR (Satellite Aperture Radar Interferometry), utilizada para medir los cambios en la elevación y la deformación de la superficie terrestre. Permite conocer en tiempo real los movimientos, los cuales pueden ser representados en mapas de distribución de desplazamientos o como series temporales.



Velocidades de desplazamiento del puerto de Valencia obtenidas a partir del procesado de 54 imágenes del satélite CosmoSkyMed (banda X) adquiridas entre el 14/05/2011 y el 08/08/2011. (Jover, 2022).

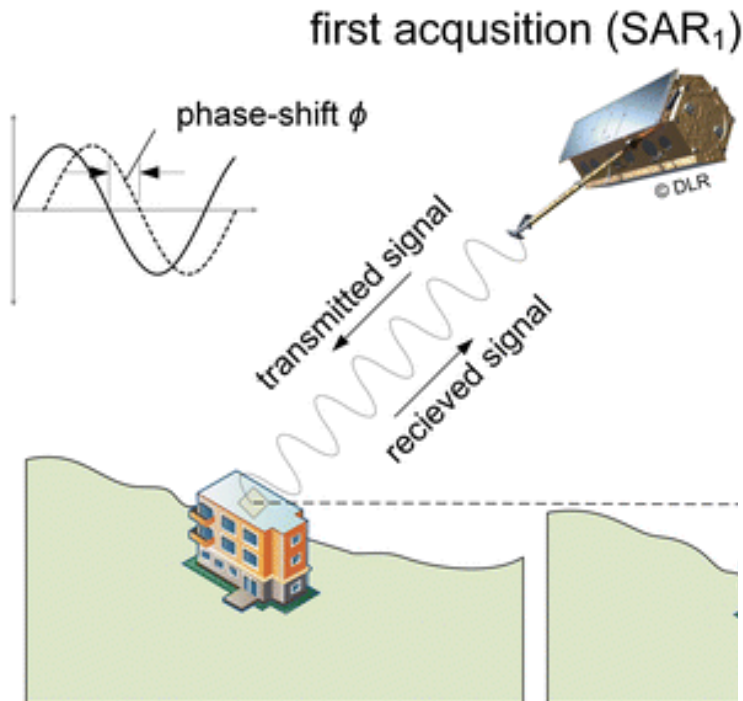


Mapa de desplazamientos (obtenidos a partir de órbitas ascendentes y descendentes) y de áreas activas de desplazamiento (77 en total) identificadas a partir de los datos InSAR en un tramo de la línea de ferrocarril Lamezia Terme-Rosarno (SW de Italia). (Jover, 2022).



DEFINICIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO

- **Monitoreo global:** Técnica INSAR (Satellite Aperture Radar Interferometry), utilizada para medir los cambios en la elevación y la deformación de la superficie terrestre. Permite conocer en tiempo real los movimientos, los cuales pueden ser representados en mapas de distribución de desplazamientos o como series temporales.



Zona/tipo de obra	Resolución	
	Alta	Media
Estaciones, puentes, taludes, terraplenes y muros de gran altura y/o longitud, zonas con alta densidad de expresiones kársticas, zonas de asentamientos humanos, obras civiles mayores, sitios de interés específico	X	
Zona rural, puentes, taludes, terraplenes y muros de mediana altura y/o longitud, obras inducidas menores		X

Se recomienda que, durante la etapa de operación del tren, la adquisición de datos se haga con una frecuencia de 10 días y la emisión de reportes (mapas, tablas) e interpretación de los mismos, se realice a más tardar 4 días después.

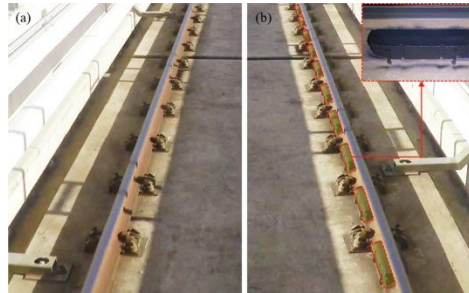


□ **Monitoreo de la superestructura:** El monitoreo de rieles y durmientes es una parte importante del mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias.

- Fatiga en rieles y durmientes
- Alineación Horizontal
- Perfil longitudinal
- Calibre y peralte

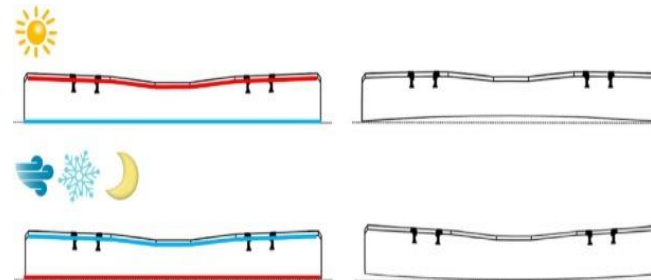


- Vibraciones y ruido



- Alineación Horizontal
- Perfil longitudinal
- Calibre
- Peralte

- Variaciones en la rigidez y alineamientos de la vía férrea





Tipos de mediciones a realizar en la superestructura (rieles y durmientes)

Tipo de instrumento	Tipo de medición	Problema asociado
Strain gauges (galgas extensiométricas)	Deformaciones Cargas	Fatiga Rigidez equivalente
LVDT's (transductor de desplazamiento lineal)	Desplazamientos	Fatiga Rigidez equivalente
Geófonos	Vibraciones Desplazamientos	Fatiga Vibración y ruido Rigidez equivalente
Acelerómetros	Vibraciones Desplazamientos	Fatiga Vibración y ruido Rigidez equivalente
Sensores de fibra óptica	Deformaciones	Fatiga Rigidez equivalente
Sensores piezoeléctricos	Cargas dinámicas	Fatiga Vibración y ruido Rigidez equivalente
Sensores ultrasónicos	Fisuras	Fatiga
FWD, Vehículo RMVS⁽¹⁾	Rigidez equivalente	Rigidez equivalente
Vehículo TGMV⁽²⁾	Desgaste de rieles	Vibración y ruido

(1) Vehículo de medición de rigidez en movimiento

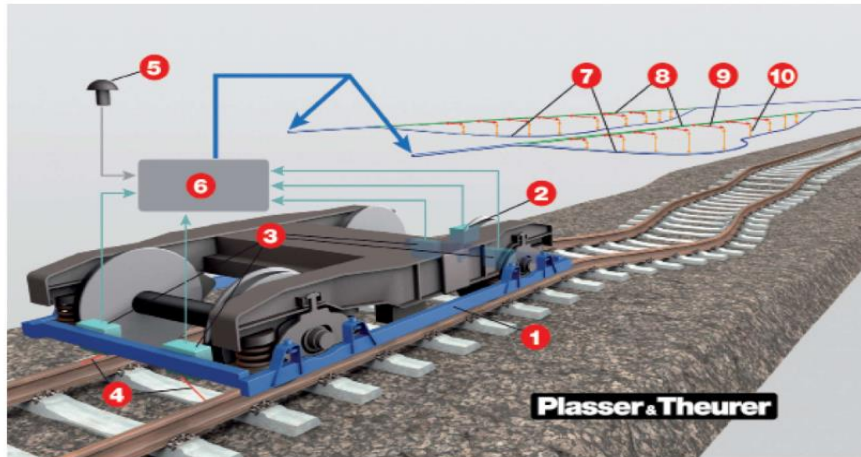
(2) Vehículo genérico de medición de geometría de vía



Tipos de instrumentos o dispositivos Vehículos TGVM o similares

Mediciones de geometría de vía: los parámetros de geometría de vía más comunes medidos por la mayoría de los TGMV son:

- Alineación Horizontal
- Perfil longitudinal
- Calibre
- Peralte



- 1 Measuring frame with fixed vertical distance to the rail surfaces
- 2 Inertial measuring unit (IMU)
- 3 Sensors of the track gauge measurement
- 4 Laser beams to scan the track gauge
- 5 GPS data acquisition
- 6 Navigation computer
- 7 Blue curves: space curves of both rails derived from the measurements along the track, synchronized with GPS data
- 8 Green lines: track design line
- 9 Red arrows (horizontal): alignment defects, calculated from the space curve
- 10 Orange arrows (vertical): longitudinal profile defects, calculated from the space curve





- **Monitoreo de la subestructura y obras civiles:** Una de las funciones principales de la subestructura (balasto, subbalasto, terraplenes) de una vía es brindar el soporte necesario a la superestructura, y permitir la transición de las cargas en superficie hacia el terreno natural en el cual se desplantará la vía férrea.

→ Deformaciones permanentes



→ Estabilidad de la vía





Tipos de mediciones a realizar en la subestructura (balasto, subbalasto y terraplenes)

Tipo de instrumento	Tipo de medición	Problema asociado
Strain gauges (galgas extensiométricas)	Deformaciones Cargas	Deformaciones permanentes
Acelerómetros	Vibraciones Desplazamientos	Deformaciones permanentes Estabilidad de la vía
Sensores de fibra óptica	Deformaciones	Deformaciones permanentes
Celdas de presión	Cargas estáticas	Estabilidad de la vía
Inclinómetros verticales	Desplazamientos verticales	Deformaciones permanentes Estabilidad de la vía
Clinómetros biaxiales	Desplazamientos horizontales y verticales	Deformaciones permanentes Estabilidad de la vía
Nivelaciones topográficas	Desplazamientos horizontales y verticales	Deformaciones permanentes Estabilidad de la vía



Determinación de obras y zonas o puntos de interés a monitorear

En todo proyecto ferroviario se debe identificar las obras civiles a instrumentar

- Murros
- Terraplenes
- Puentes
- Pasos a nivel
- Túnees
- Obras de drenaje
- Otrsp



Agradecimientos



XXVIII
CONSEJO DIRECTIVO



Gracias!!

Barroso J. (2023) “Análisis y diseño geotécnico para vías férreas”. Tesis de Maestría, Programa de Maestría y Doctorado: UNAM.