



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Laboratorio de
Geotecnia

SEMINARIO SOBRE GEOTECNIA FERROVIARIA



LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DESDE UNA PERSPECTIVA GEOTÉCNICA

José Estaire y María Santana

Montevideo, Mayo de 2025



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS



1. INTRODUCCIÓN - OBJETIVO

- Transmitir la experiencia CEDEX de los últimos 25 años en Geotecnia Ferroviaria...

Pensando en una **futura reactivación** de las líneas férreas latinoamericanas

- Pasar de un proyecto y construcción de la vía ferroviaria basado en **métodos empíricos** a usar:
 - Principios de la Mecánica de Suelos
 - Modelización numérica
 - Instrumentación y auscultación geotécnica
- Servir para presentar el resto de las charlas (seminario ALAF)

1. INTRODUCCIÓN - OBJETIVO



Buscar



SEMINARIO 9/4 : CICLO DE PONENCIAS SOBRE INFRAESTRUCTURA Y GEOTECNIA FERROVIARIA .



ALAFlatino
1,08 K suscriptores

Suscribirse



0



Compartir



CEDEX

**Laboratorio de
Geotecnia**



1. INTRODUCCIÓN - OBJETIVO

1

Cajón Ferroviario del CEDEX Ensayos a escala 1:1



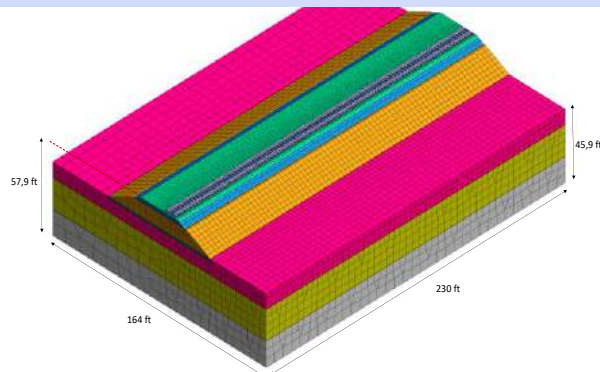
2

Instrumentación in-situ de secciones ferroviarias



3

Modelización numérica de secciones ferroviarias



Campos de actuación LG-CEDEX

4

Ensayos de laboratorio sobre materiales usados en vías férreas



CEDEX

Laboratorio de
Geotecnia



FACULTAD DE
INGENIERÍA



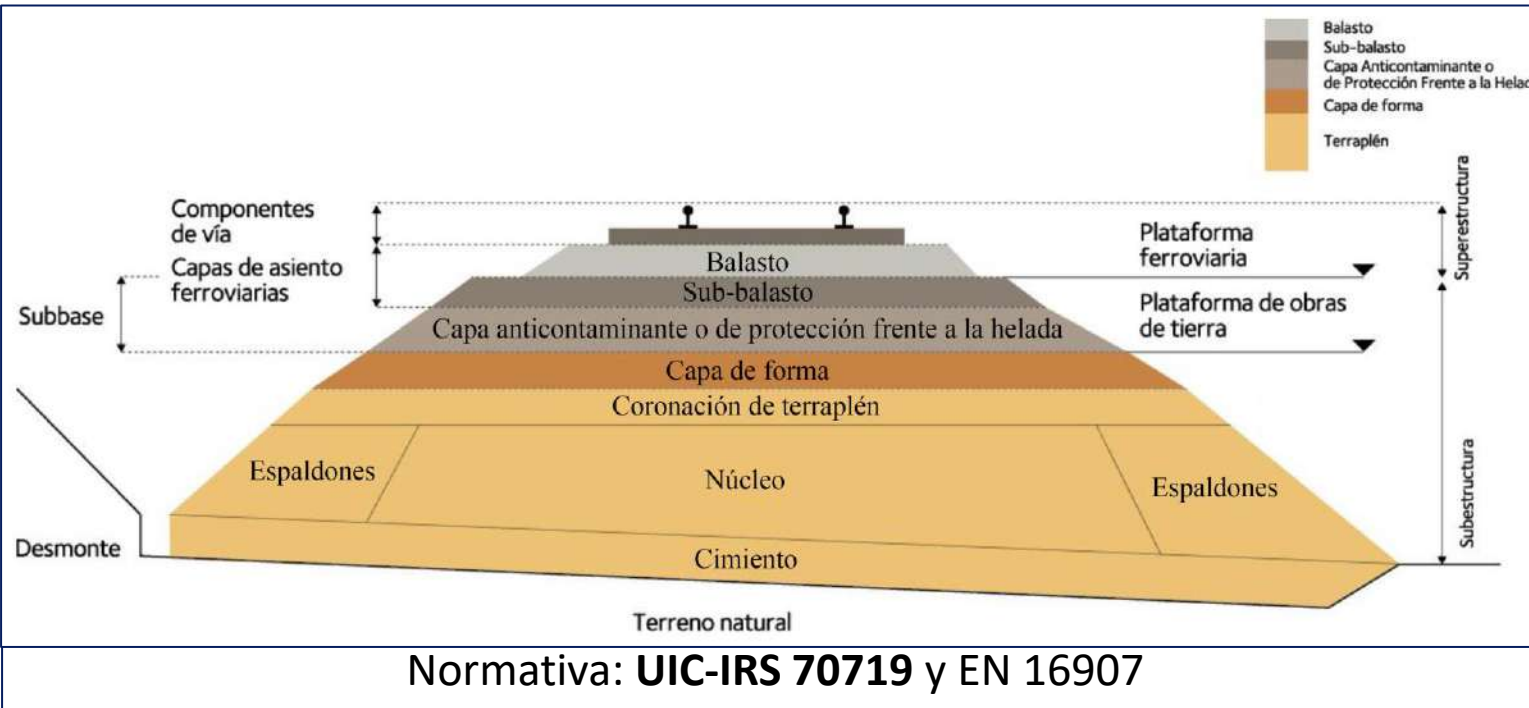
UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

2.a GEOTECNIA FERROVIARIA

Rama de la **Ingeniería Geotécnica** dedicada a las **características geotécnicas** de los **materiales** que componen la infraestructura de las líneas férreas

Elementos de la infraestructura ferroviaria

- **Componentes de vía:**
 - carril,
 - sistema sujeción,
 - suelas bajo carril,
 - Traviesas (durmientes)
- Banqueta de **balasto**
- Sub-base:
 - **Subbalasto**,
 - Capa de protección contra helada
 - Capa de filtro
- **Capa de forma**
- **Terraplén** (si hay)
- **Terreno natural o desmante**



2.b NORMATIVA FERROVIARIA

- Internacional

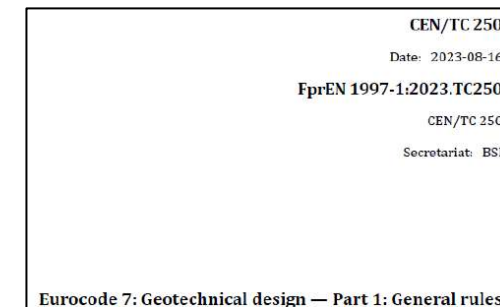
- UIC – IRS 70719 => Proyecto de obras de tierra “ferroviarias”
- UIC – IRS 70722 => Mantenimiento de obras de tierra “ferroviarias”
- AREMA => Manual de Ingeniería Ferroviaria

- Europea

- EN 1997 (Eurocódigo EC7) => Verificaciones de proyecto
- EN 13450 => Caracterización del balasto
- EN 16907 => Obras de tierra

- Española

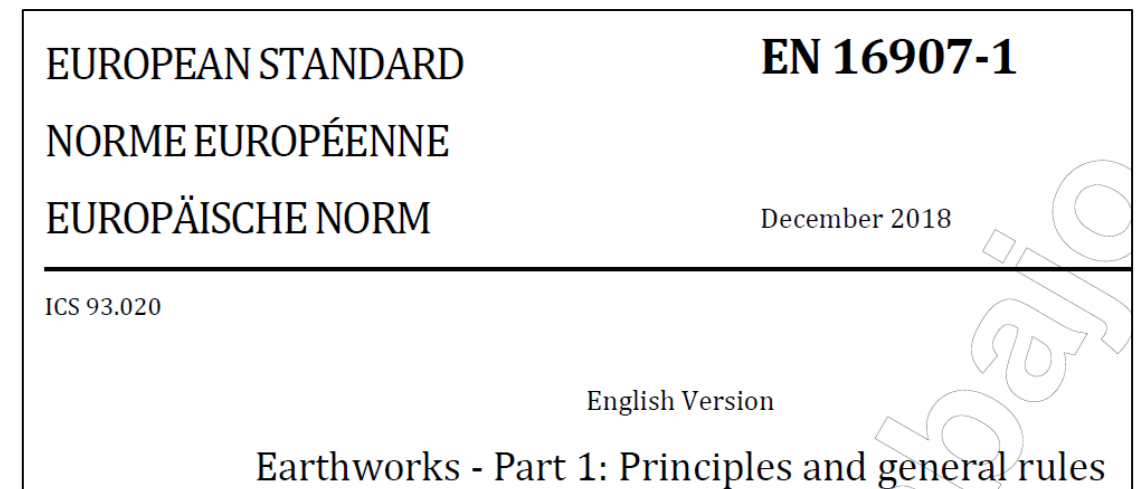
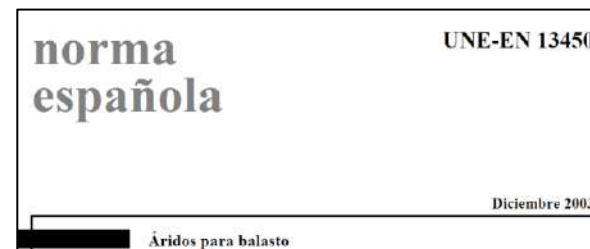
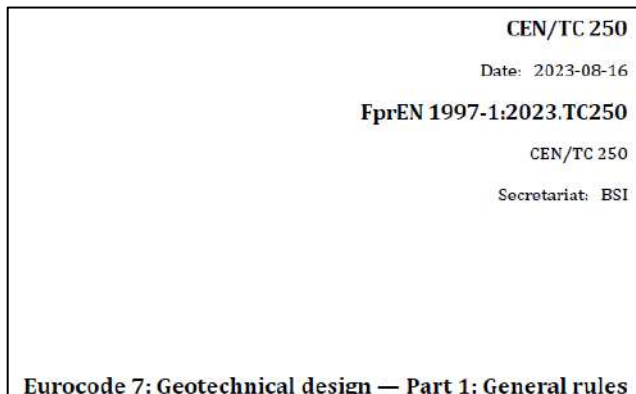
- PGP ADIF 2011 => Prescripciones proyecto infraestructura ferroviaria
 - Capítulo dedicado a rellenos
 - Capítulo dedicado a tratamientos con cal
- IF 3 => Proyecto y construcción vía en balasto
- PF 6 y 7 => Prescripciones material para balasto y subbalasto



<https://www.adif.es/empresas-contratacion/normativa-tecnica>

2.b NORMATIVA FERROVIARIA

- Internacional
 - **UIC – IRS 70719** => Proyecto de obras de tierra “ferroviarias”
- Europea
 - EN 1997 (**Eurocódigo EC7**) => Verificaciones de proyecto
 - EN 13450 => **Caracterización del balasto**
 - EN 16907 => **Obras de tierra**



2.b NORMATIVA FERROVIARIA

- Europe
 - EN 1997 (**Eurocódigo EC7**) => Verificaciones de proyecto
 - EN 13450 => **Caracterización del balasto**
 - EN 16907 => **Obras de tierra**
 - EN 1991-2 => **Acciones de tráfico sobre estructuras**

EUROPEAN STANDARD

EN 1991-2

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM

November 2023

ICS 91.010.30; 93.040

Supersedes EN 1991-2:2003

English Version

**Eurocode 1 - Actions on structures - Part 2: Traffic loads
on bridges and other civil engineering works**

8	Rail traffic actions and other actions specifically for railway bridges	56
8.1	Field of application	56
8.2	Representation of actions — nature of rail traffic loads	57
8.3	Vertical loads — load models, characteristic values (static effects) and eccentricity and distribution of loading	57
8.3.1	General	57
8.3.2	Load Model 71	58
8.3.3	Load Models SW/0 and SW/2	59
8.3.4	Load Model “unloaded train”	60
8.3.5	Eccentricity of vertical loads (Load Models 71 and SW/0)	60
8.3.6	Distribution of point loads or axle loads by the rails, sleepers and ballast	61
8.3.7	Actions for non-public footways	65
8.4	Dynamic effects (including resonance)	65

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CARRILES Y TRAVIESAS

Carriles → Transmisor de carga desde la rueda a la traviesa → Reparto de carga a varias traviesas

Cuantificación del reparto de carga

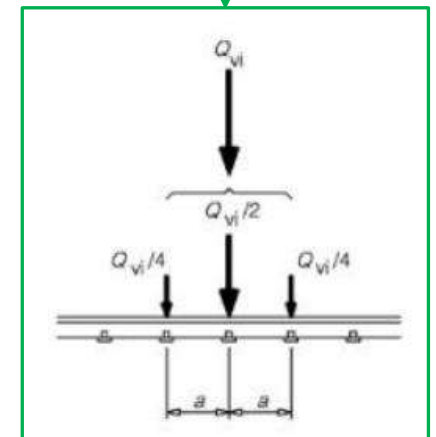
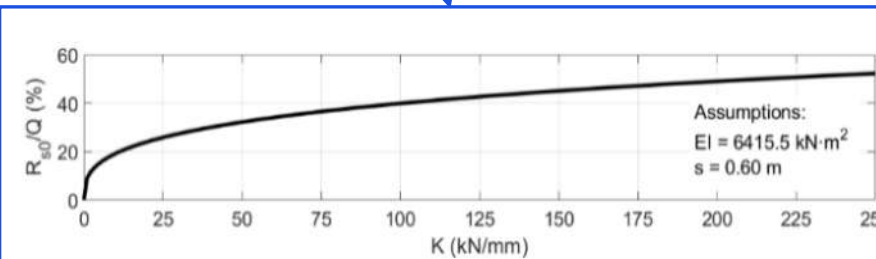
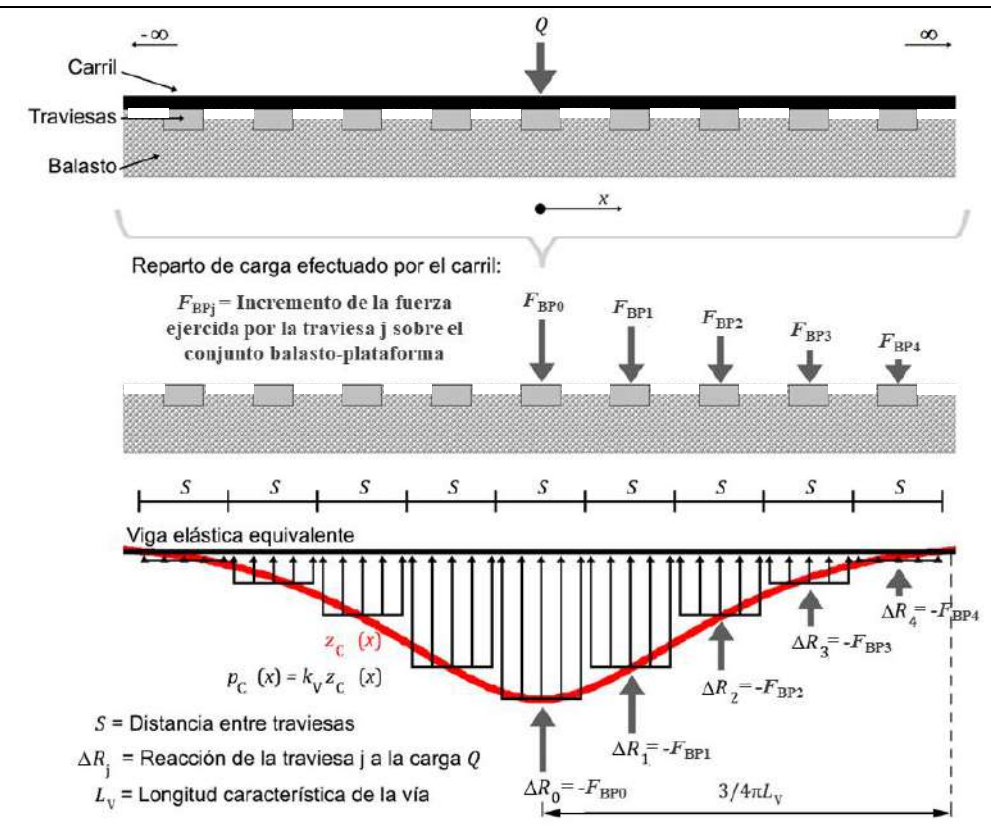
1 - Teoría de Winkler

Basada en la “Rigidez de vía (K)”

La traviesa sobre la que apoya la rueda recibe un **40% de la carga**

2 - Eurocódigo 1: Acciones sobre estructuras -Cargas de tráfico

La traviesa sobre la que apoya la rueda recibe el **50% de la carga**

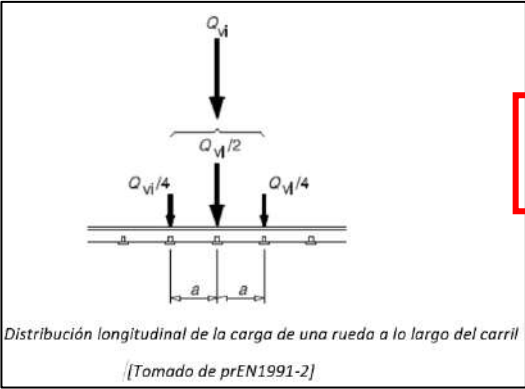








3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CARRILES Y TRAVIESAS

Estado límite último de estabilidad global – Modelización de las cargas

- Tren de pasajeros tipo, con una carga por eje de 170 kN
- Tren de mercancías tipo, con una carga por eje de 225 kN.



Distribution of contact pressure underneath the concrete sleeper	Description	Developer
	Uniform distribution	AREA [8], Talbot [15], Raymond [16]
	According to laboratory test	ORE [9], Talbot [17]
	Maximum pressure under the rails	ORE, Talbot [15]
	Concentration of pressure in sleeper center	Talbot [17]
	Tamping effects and ballast compaction in the vicinity of rails	ORE [9], Talbot [15], Bartlett [18], Clark [19]
	According to field test	Zakeri and Sadeghi [2]

La simulación del paso de trenes queda incompleta si no se consideran las acciones horizontales que sufre también la vía. Prud'homme estableció, en 1967, la relación entre el esfuerzo transversal aplicado y el desplazamiento máximo producido. Esta ley se obtuvo para diferentes esfuerzos verticales por eje aplicados sobre la vía, obteniéndose un coeficiente de correlación α igual a 0,25. Basándose en este dato, en el presente trabajo se ha supuesto que las tensiones horizontales van a representar como máximo el 30% de las verticales.

EN 1991-2:2023 (E)

8.5	Horizontal forces — characteristic values	84
8.5.1	Centrifugal forces	84
8.5.2	Nosing force	89
8.5.3	Actions due to traction and braking	89
8.5.4	Combined response of structure and track to variable actions.....	91

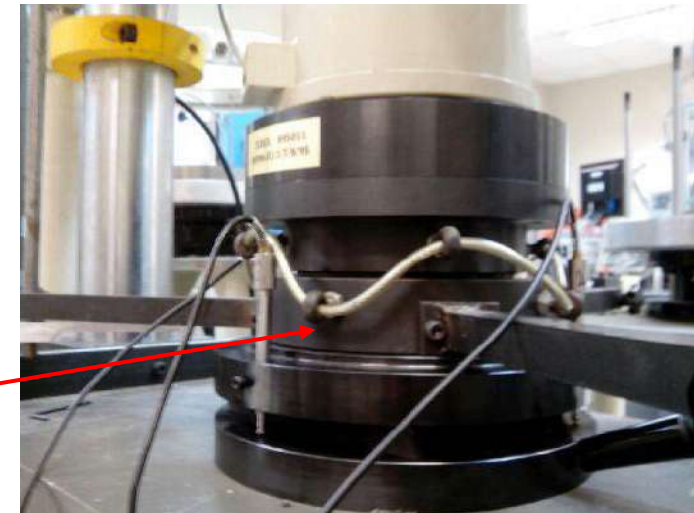
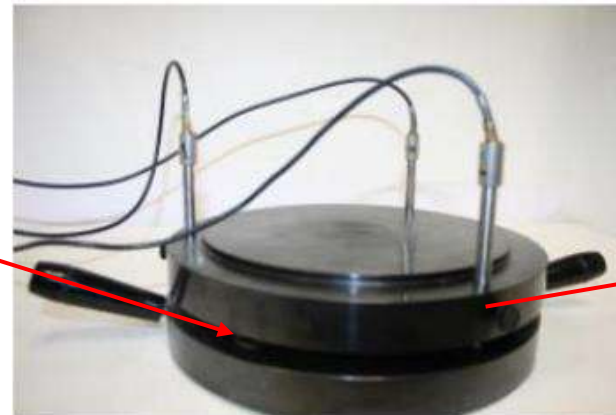
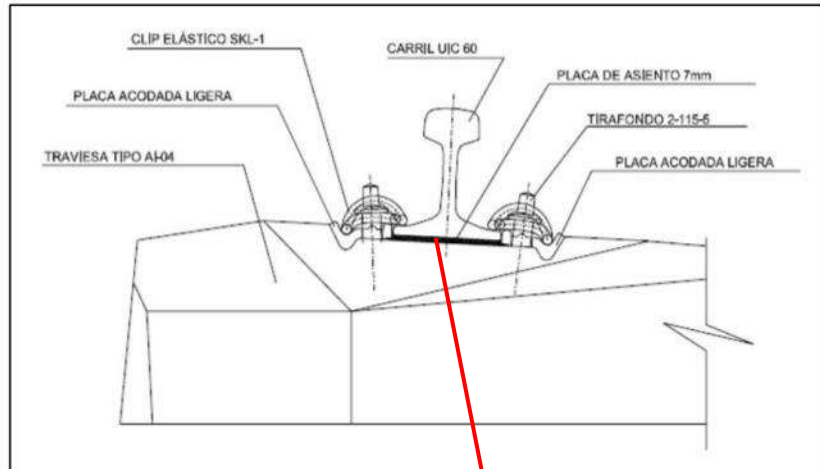
3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

SUELAS BAJO CARRIL (Placas de asiento)

Suela bajo carril ➡ Amortiguación de vibraciones ➡ Parámetro clave: **Rigidez**

Algunas ideas generales:

- Valores de espesor y rigidez muy variados (estática y dinámica)
[4,5 mm a 10 mm] – [27 kN/mm a 500 kN/mm]
- A menor rigidez, menor degradación del balasto (aprox. 10%)
- Ensayo de rigidez en laboratorio (Norma EN 13146-9)



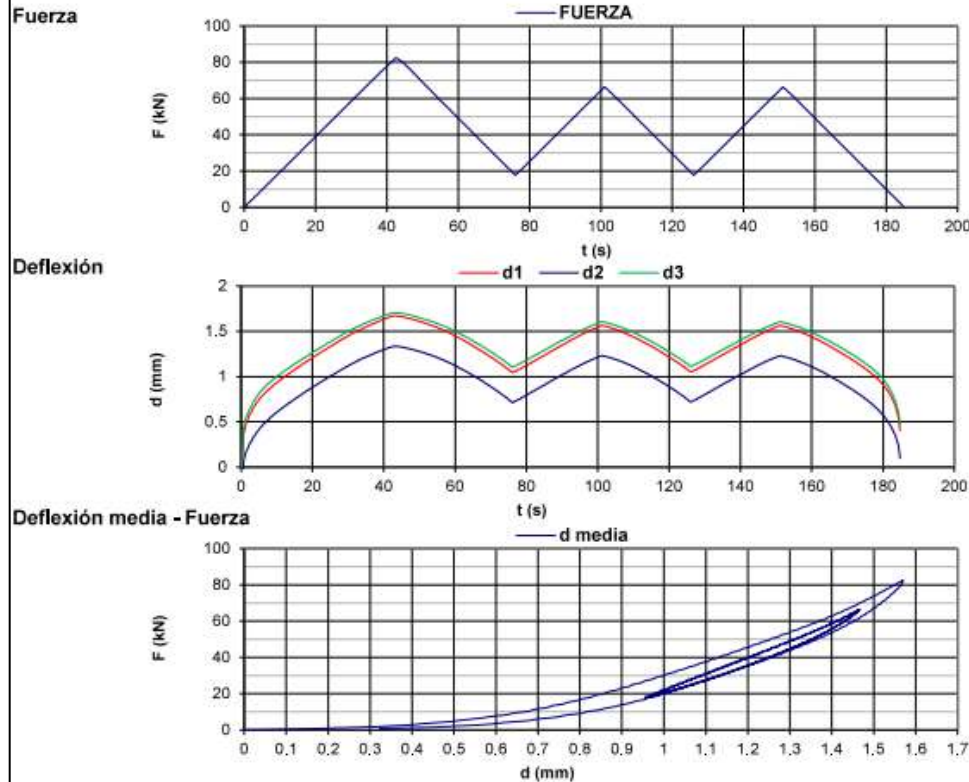
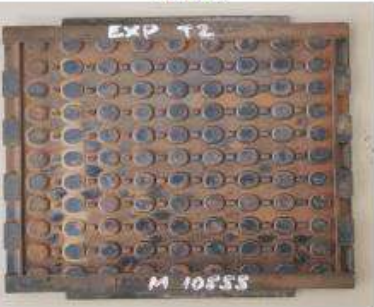
3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

SUELAS BAJO CARRIL (Placas de asiento)

FOTO 1

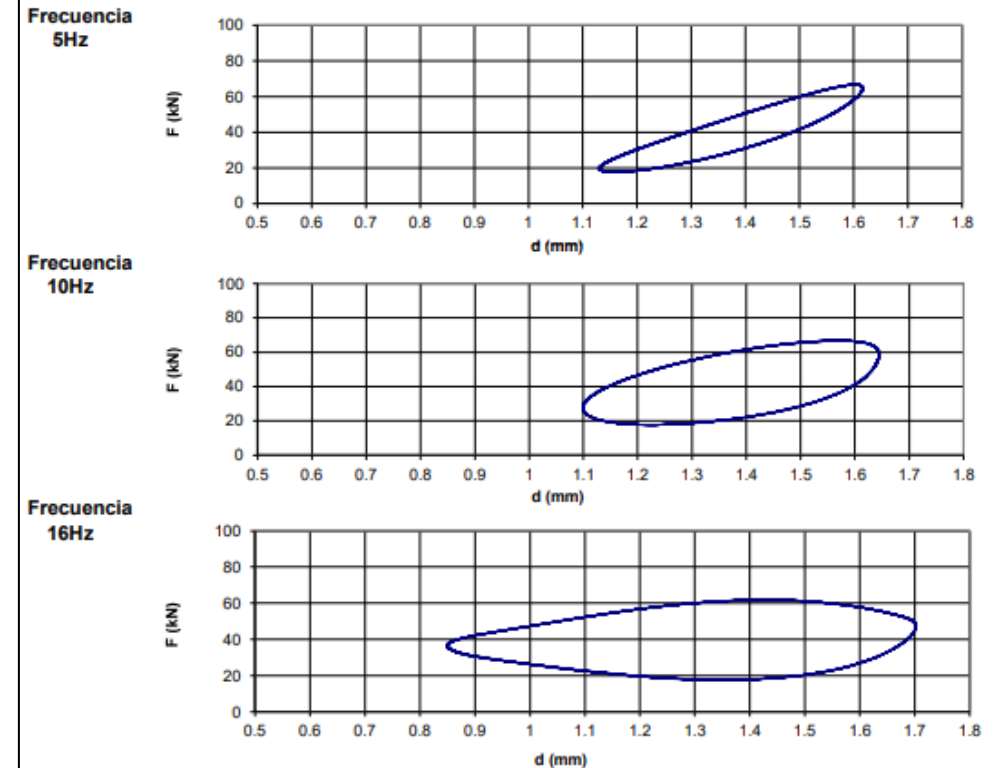


FOTO 2



Incremento	F min (kN)	F max (kN)	d media (mm)	k (MN/m)
Primero	17.767	66.356	0.512	94.819
Segundo	17.748	66.385	0.500	97.236

Rigidez estática (k media): 96 MN/m



f (Hz)	F min (kN)	F max (kN)	d medio (mm)	k (MN/m)
5	17.648	66.641	0.486	k 5Hz 100.745
10	17.656	66.643	0.546	k 10Hz 89.801
16	17.729	61.770	0.850	k 16Hz 51.826

Rigidez dinámica a baja frecuencia (k media): 81 MN/m

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

SUELAS BAJO CARRIL (Placas de asiento)

- Los ferrocarriles franceses optaron en la línea de alta velocidad París-Lyon por una placa de asiento de 9 mm de espesor y 90 kN/mm de rigidez nominal frente a la placa de 4.5 mm y 150 kN/mm, empleada en sus líneas convencionales.
- Los ferrocarriles alemanes utilizaron, en sus primeras líneas de alta velocidad, placas de asiento de 500 kN/mm para pasar posteriormente a placas con 60 kN/mm y hasta de 27 kN/mm y 10 mm de espesor en un tramo de 14 km en la línea de alta velocidad Hannover-Berlín.
- En España, si bien inicialmente en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla se utilizaron placas de 400 a 500 kN/mm, hoy en día en las líneas de alta velocidad españolas se usan normalmente placas de asiento de 7 mm de espesor y 100 kN/mm de rigidez nominal.

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

BANQUETA DE BALASTO

Balasto ➡ Material granular con variadas funciones ➡ Caracterización: Norma EN 13450



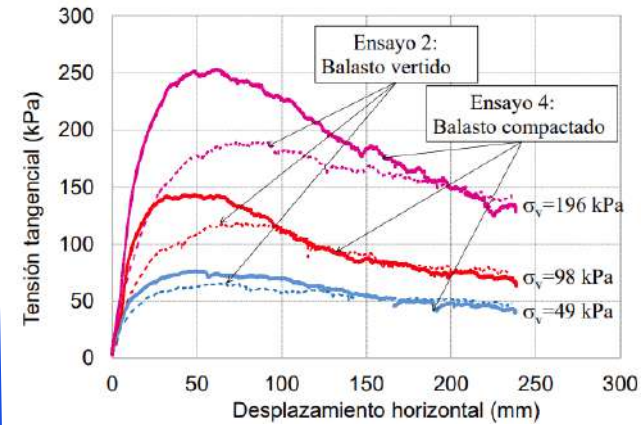
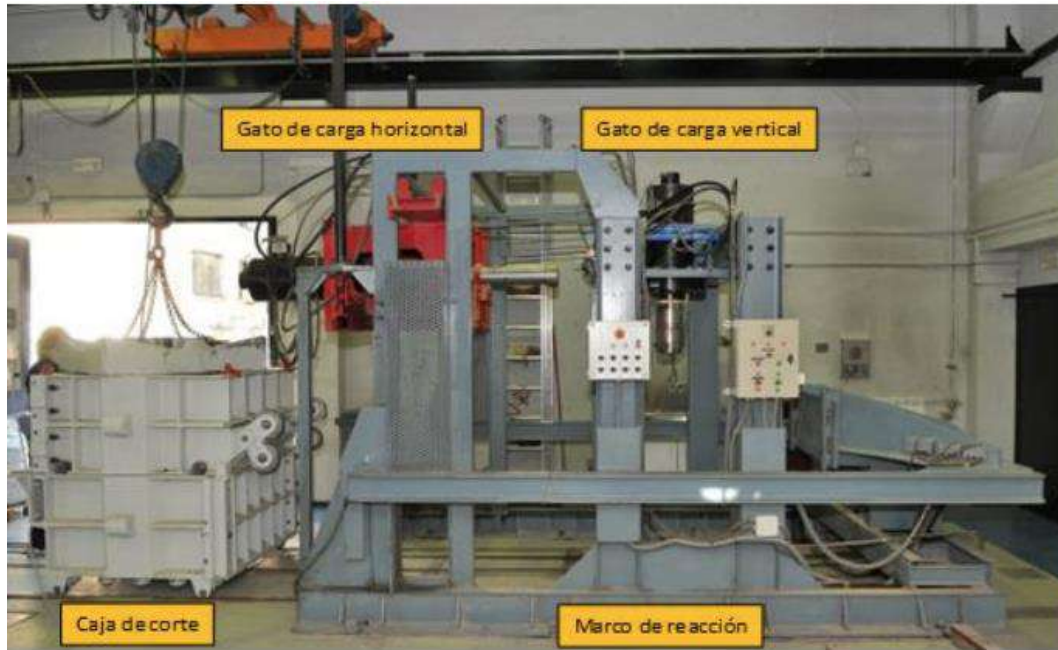
Función	Propiedad
Proporcionar rigidez a la vía frente a las fuerzas horizontales, verticales y longitudinales producidas por el paso de trenes	<i>Resistencia al corte</i>
Permitir libre drenaje del agua de lluvia	<i>Permeabilidad</i>
Disipar cargas dinámicas	<i>Amortiguamiento</i>
Permitir mantenimiento de alineación y nivelación de la vía	<i>Compactación</i>
Disponer de suficiente porosidad para almacenar material fino	<i>Uniformidad granulométrica</i>

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

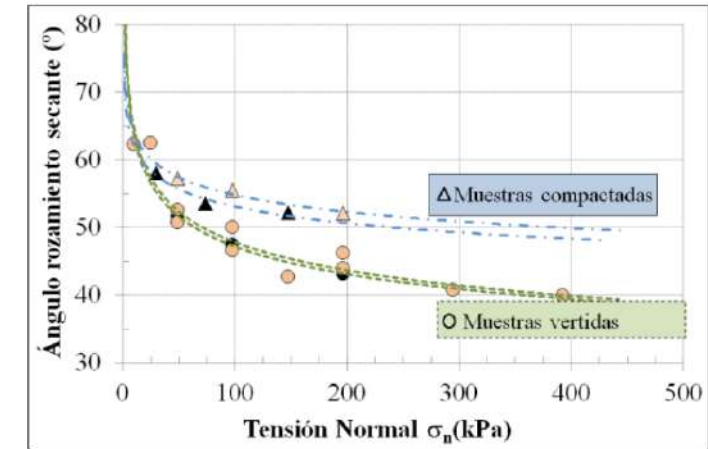
BANQUETA DE BALASTO

Resistencia al corte – Caja de corte de grandes dimensiones

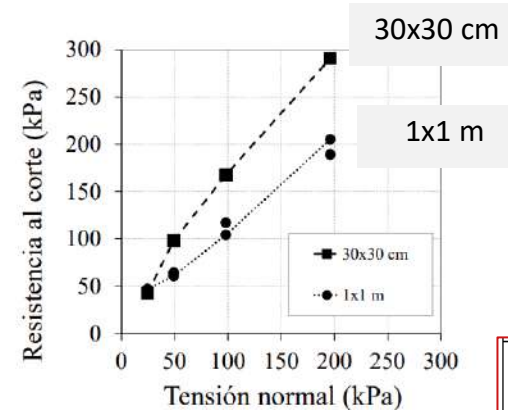
Resultados



Pico tensional <> Dilatancia



Comportamiento resistente no-lineal



Efecto escala en ensayo

Balasto de líneas de ferrocarril:
características mecánicas

María Santana

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

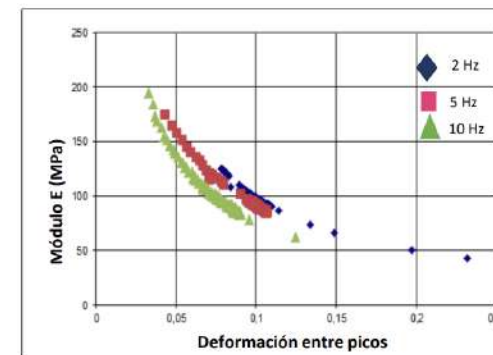
BANQUETA DE BALASTO

Permeabilidad– Permeámetro grandes dimensiones

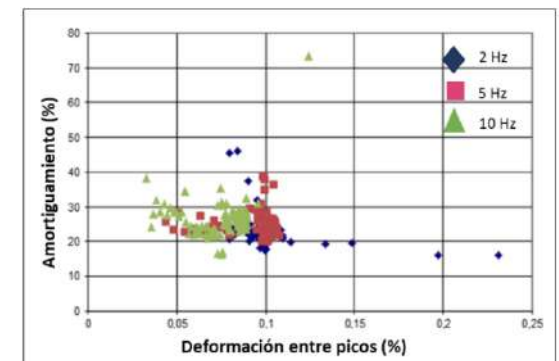


Permeabilidad – 5×10^{-2} cm/s

Prop. Dinámicas – Triaxial dinámico grandes dimensiones



E: 100-200 MPa

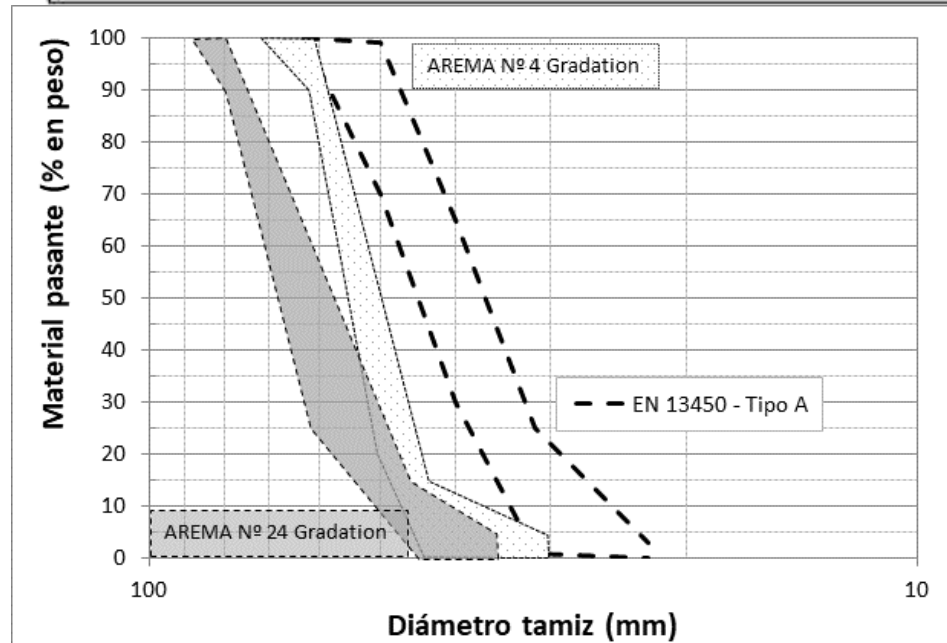
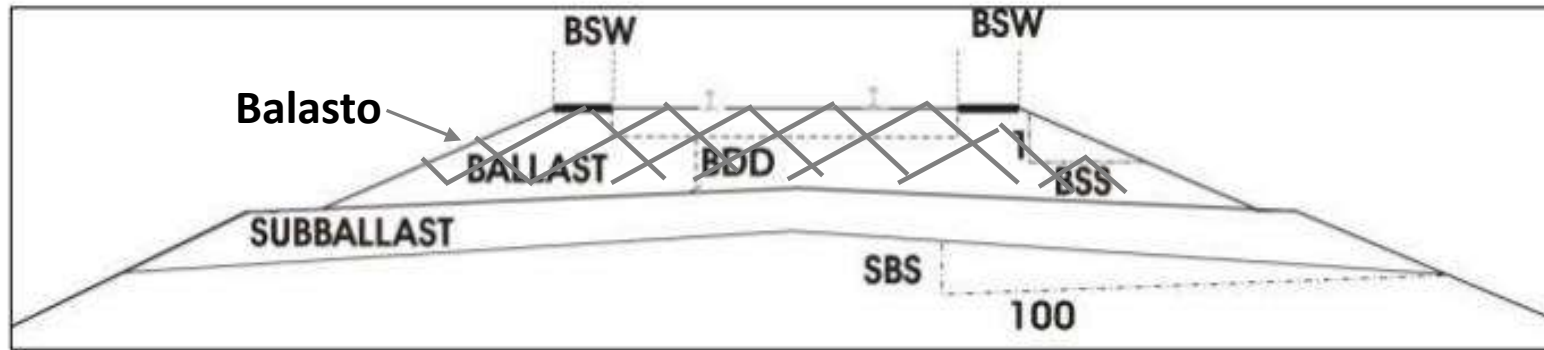


Amortiguamiento: 20 %

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

BANQUETA DE BALASTO

Dimensionamiento de la banqueta de balasto



Tradicionalmente proyectado de forma **empírica**

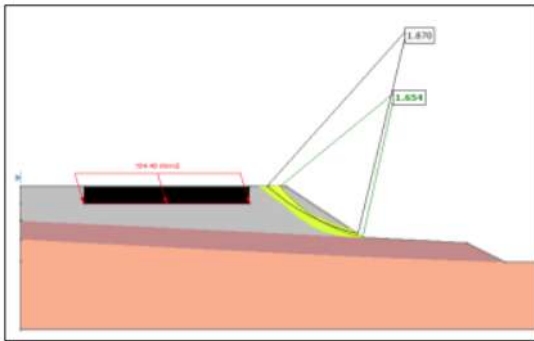
- **Espesor bajo traviesa (BDD):** 30-35 cm
- **Ancho del hombro (BSW):** 50-80 cm
- **Inclinación talud (BSS):** 1V:1,5H
- **Pendiente transversal (SBS):** 3-5%

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

BANQUETA DE BALASTO

Dimensionamiento de la banqueta de balasto: Métodos basados en la Mecánica del Suelo

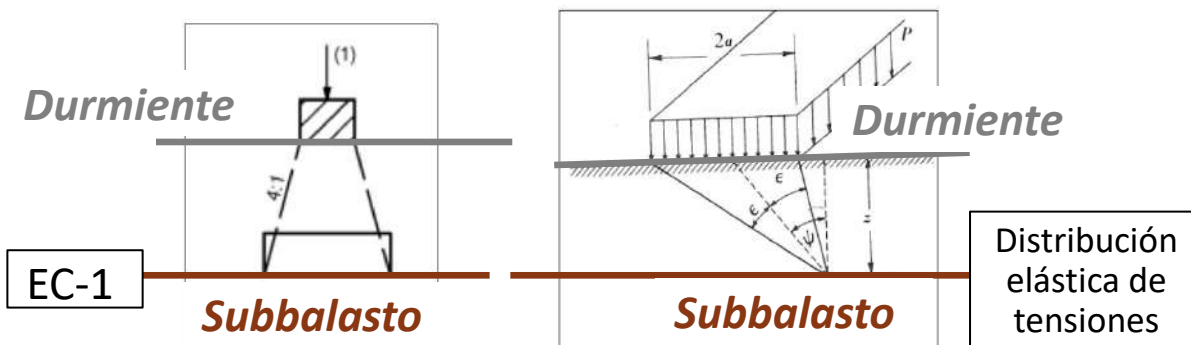
Estado límite último de estabilidad global



*Método de cálculo:
teorías de equilibrio límite*

FS recomendado: 1,5 - 2,0

Estado límite último de capacidad portante del subbalasto



Transmisión de carga y comparación con capacidad portante

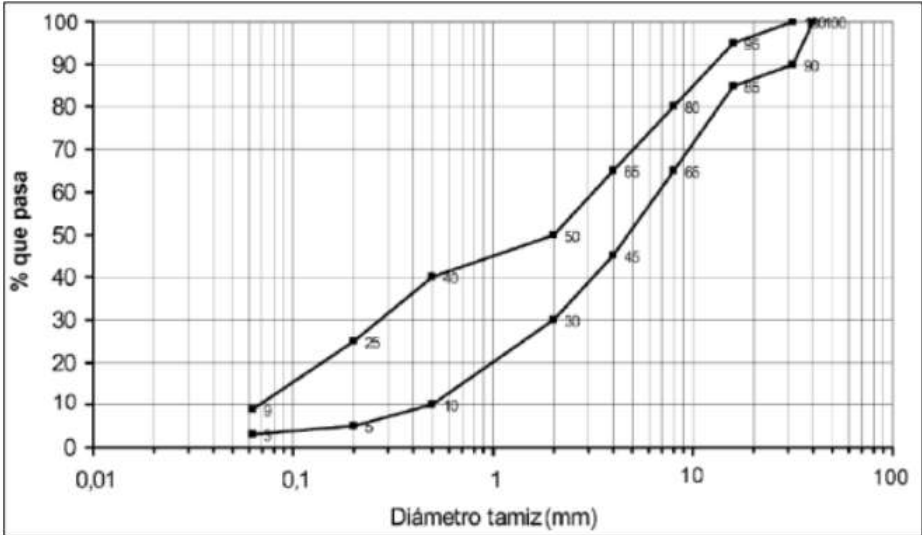
Estado límite último de servicio => Movimientos de carril

- Depende de la rigidez de vía
 - LAV españolas => $K = 100 \text{ kN/mm}$
 - Deflexión de carril => 0,8 – 1 mm
- Contribución de los elementos de vía a la deflexión de carril
 - Suela bajo carril: 30-40%
 - Banqueta balasto: 40-50%
 - Subbalasto: 10-15%
 - Resto (capa de forma/terraplén): 5-8%

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CAPA DE SUBBALASTO

- **Subbalasto** ➡ Material granular o bituminoso



Función	Propiedad
Servir de base a la banqueta de balasto y soportar las cargas que le llegan	Capacidad portante
Facilitar evacuación de agua de lluvia percolada	Impermeabilidad
Mejorar comportamiento dinámico de la infraestructura	Amortiguamiento
Actuar como capa de filtro	Granulometría adecuada

Difícil compatibilidad entre funciones
UIC- IRS 70719 recoge requisitos nacionales

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CAPA DE SUBBALASTO

- Subbalasto → Material granular

Table 6 : Granular sub-ballast layer specifications

Infrastructure manager	D _{max} (mm)	Fines ¹ (%)	Cu	Fracture faces (%)	C _{LA}	MD	Permeability (k) (m/s)	EV ₂ (MPa)	Notes
DB (Germany)	56	< 5-7	---	---	---	---	< 10 ⁻⁶	---	---
	63	< 5-7	---	---	---	---	> 5.10 ⁻⁵	---	Frost protection
Infrabel (Belgium)	40	3-10	---	---	Type I CLA < 25 Type II CLA < 30	Type I MD < 20 Type II MD < 25	< 10 ⁻⁶	---	ME1 > 110 MPa according to MF 40/78 Standard
ZSR (Slovakia)	63	5-14	---	---	---	---	---	---	---
SNCF (France)	31.5	4-8	---	100	---	---	---	---	- < 40 (LA + MDE) for v > 160 km/h - < 50 (LA + MDE) for v < 160 km/h
Network Rail (Great Britain)	23.6	< 10 > 4 NP	> 2	---	---	---	---	---	---
RFI (Italy)	31.5	6-10	---	---	---	---	---	---	Asphalt conglomerate
	40.0	2-7	---	---	---	---	---	---	"Misto cementato" (mixed cement) (according to CNR BU n.29 standard)
SZDC (Czech Rep.)	32	< 5	> 15	> 50	< 50	---	---	---	---
Trafikverket (Sweden)	150	0-8	---	100	---	---	---	---	---
	150	0-8	---	100	< 25	< 15	---	---	Frost protection
ADIF (Spain)	40	3-9	> 14	100 (> 4 mm)	< 28	< 22	< 10 ⁻⁶	> 120	---
CR (China)	60	≤ 5	≥ 15	---	---	---	> 5.10 ⁻⁵	---	---

1. The fines content refers to the usual sieve size currently used in each country. It can vary from 0.080 to 0.063 mm.

INTERNATIONAL
RAILWAY SOLUTION

IRS
70719 - Ed. 1

Railway Application

Track & Structure
"Earthworks and track bed layers for railway lines"
Design and construction principles



3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CAPA DE SUBBALASTO


- **Subbalasto** Material bituminoso

Table 7 : Bituminous sub-ballast layer specifications

Infrastructure manager	Bituminous binders	Bitumen content	Filler ratio	Aggregate maximum size
RFI (Italy)	50/70	4.1 - 4.8% (referring to the total mass of the aggregates)	1.5 - 2.0	31.5 mm
SNCF (France)	35/50	---	---	---
Infrabel (Belgium)	50/70	> 5.6% top layer > 4.2% bottom layer	---	14 mm top layer 31.5 mm bottom layer
ADIF (Spain)	50/70 70/100	> 4.75%	0.9 - 1.2	45 mm
SBB (Switzerland)	160/220	≥ 5.4 weight-% (AC Rail 16) ≥ 5.2 weight-% (AC Rail 22)	---	---

Table 18 : Bituminous sub-ballast layer specifications

Infrastructure manager	Bituminous layer thickness	Granular supporting layer thickness
RFI (Italy)	12 cm	≥ 30 cm super compacted layer
SNCF (France)	10 - 12 cm	20 cm
Infrabel (Belgium)	12 cm	25 - 85 cm
ADIF (Spain)	8 cm	30 - 40 cm
SŽDC (Czech Republic)	7 - 10 cm	20 - 40 cm
SBB (Switzerland)	7 - 10 cm	25 - 60 cm
ÖBB-Infrastruktur (Austria)	9 - 12 cm	30 - 60 cm

	SISTEMA DE GESTIÓN	
	PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS TIPO PARA LOS PROYECTOS DE PLATAFORMA	PGP-2011

G0114 SUBBALASTO BITUMINOSO

Rasante, espesor, anchura y pendiente transversal

La tolerancia para la superficie de la capa de subbalasto terminada, respecto a la cota definida en los planos del proyecto, será de ± 15 mm en cualquier punto.

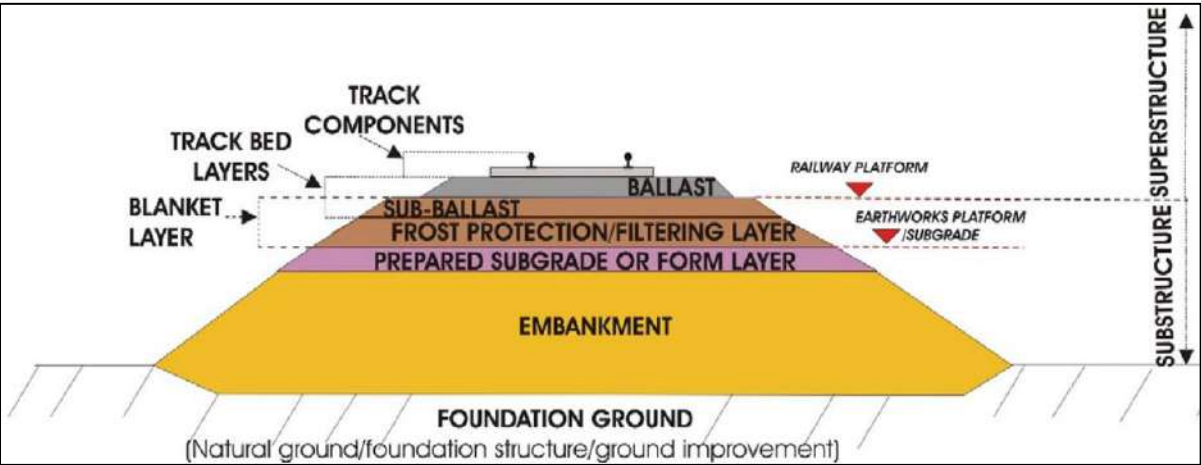
La tolerancia en el espesor de la capa de subbalasto, respecto al definido en los planos del proyecto, estará comprendida en el intervalo (0, +20 mm), medida según la vertical.

El espesor mínimo de la capa será de 80mm.

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

PLATAFORMA FERROVIARIA

Plataforma ferroviaria ➡ Capa de forma +Terreno natural/Terraplén sobre la que se coloca subbalasto y balasto



➤ **Capa de forma** – dimensionamiento en función del tráfico de la vía ➡ Plataforma [P1, P2, P3]

Tipo de suelo/material [QS0-QS3]

Subgrade bearing capacity	Embankment upper zone ¹ / Cutting surface	Requirements of prepared subgrade	
		Quality class material	Minimum thickness (e _p)
P1 (Poor subgrade)	QS1	QS1	---
P2 (Average subgrade)	QS1	QS2	0.50 m
		QS3	0.35 m
P3 (Good subgrade)	QS2	QS2	---
	QS1	QS3	0.50 m
	QS3		0.35 m

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Table 3 : Classification of soils in QSi quality classes

Parameter	QS quality class			
	QS0 (Unsuitable material)	QS1 (Poor material)	QS2 (Average material)	QS3 (Good material)
Group name (Soil group symbol in accordance with Table 1 - page 20 and Table 2 - page 21)	F4 - FV	I1 - IL- I2- IM F1 - FL- F2 FM - F3 - FH	G2 - S2 G4 - S4	G1 - S1 G3 - S3
Organic matter content (%)	> 2.0	< 2.0	< 1.0	< 0.5
Water-soluble sulphate content (SO ₄ ²⁻ , %)	> 5.0	< 5.0	< 2.5	< 1.0
Soluble salt content (%)	> 1.0	< 1.0	< 0.5	< 0.2
CBR index (see Note A below)	< 5	> 5	> 10	> 17
Free swelling (%) (see Note B below)	> 2.0	< 2.0	< 1.5	< 1.0
Collapse (%) (see Note C below)	> 1.0	< 1.0	< 0.75	< 0.5
Frost susceptibility	See Note D below			
Internal erosion susceptibility	See Note E below			

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Table 1 : Groups for coarse soils. Materials containing particles not larger than 63 mm, with fines content of not more than 15% and with organic matter content of not more than 2% [taken from EN 16907-2]

Main group	Group name	Soil group symbol	Particle fractions				Comments
			Fines content $C_{0.063}$	Sand fraction $0.063 \text{ mm} < D \leq 2 \text{ mm}$	Gravel fraction $2 \text{ mm} < D \leq 63 \text{ mm}$	Uniformity coefficient C_u	
Coarse soil	Gravel, widely graded	G1	< 5%	Less than gravel fraction	More than sand fraction	≥ 6	Soil is normally usable in earth structures
	Gravel, narrowly graded	G2				< 6	
	Sand, widely graded	S1		More than gravel fraction	Less than sand fraction	≥ 6	
	Sand, narrowly graded	S2				< 6	
Composite coarse soil	Gravel-fines mixture, widely graded	G3	5 to 15%	Less than gravel fraction	More than sand fraction	≥ 6	Soil is normally usable in earth structures
	Gravel-fines mixture, narrowly graded	G4				< 6	
	Sand-fines mixture, widely graded	S3		More than gravel fraction	Less than sand fraction	≥ 6	
	Sand-fines mixture, narrowly graded	S4				< 6	

NB: The coefficient of curvature (C_c) is also used for classification. Approaches and limiting values vary widely between different countries.

Table 2 : Groups for coarse soils. Materials containing particles not larger than 63 mm, with fines content of more than 15% and with organic matter content not more than 2% [taken from EN 16907-2]

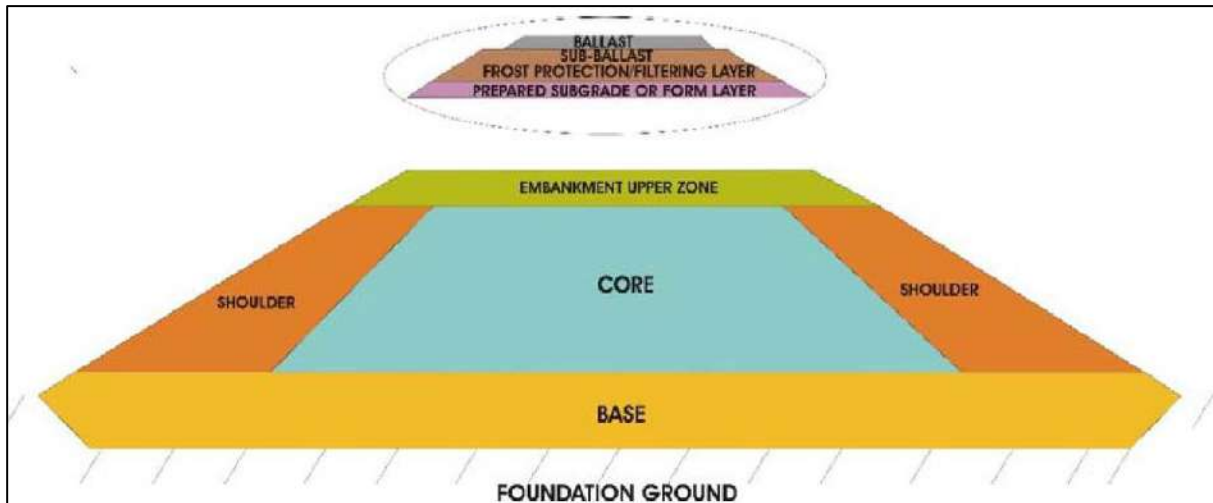
Main group	Group name	Soil group symbol	Fines content $C_{0.063}$	Further grouping parameters (see NB: 1)		Comments
				Liquid Limit w_L	Plastic Index, I_p (Methylene Blue Value V_{BS})	
Intermediate soil (see NB: 2)	Intermediate soil - low plasticity	I1	> 15 to 35%	---	$\leq 12\%$ (≤ 1.5)	Soil is normally usable in earth structures
		IL		$\leq 35\%$	---	
	Intermediate soil - medium to high plasticity	I2		---	$\leq 12\%$ (≤ 1.5)	
		IM		$< 35\%$	---	
Fine soil	Low plasticity fine soil	F1	> 35%	---	$\leq 12\%$ (≤ 2.5)	Soil is normally usable in earth structures. Distinction between silt and clay in fine soils may be based on the A-line (see Fig. 4 - page 22)
		FL		$\leq 35\%$	---	
	Medium plasticity fine soil	F2		---	> 12 to 22% (> 2.5 to 6)	
		FM		> 35 to 50%	---	
	High plasticity fine soil	F3		---	> 22 to 40% (> 6)	These soils should be presumed unusable unless testing, local experience or treatment demonstrate otherwise
		FH		> 50 to 70%	---	
	Very high plasticity fine soil	F4		---	$> 40\%$ (n/a)	
		FV		$> 70\%$	---	

3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

PLATAFORMA FERROVIARIA

- **Terraplén** – “Estructura zonada” => Permite uso de tipos de suelos en diferentes zonas

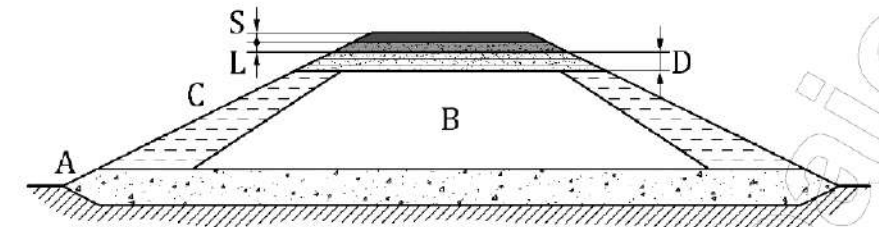
UIC-IRS 70719



INTERNATIONAL RAILWAY SOLUTION	IRS 70719 - Ed. 1
Railway Application	
Track & Structure	
"Earthworks and track bed layers for railway lines"	
Design and construction principles	

EN 16907-1

EN 16907-1:2018 (E)



Key	
A	base
B	core
C	shoulders (side zones)
D	upper zone of multiple layers
L	capping layer (part of upper zone)
S	superstructure (pavement / rail track) (not part of earthworks)

Figure 1 — Zones of infrastructure fill: general case

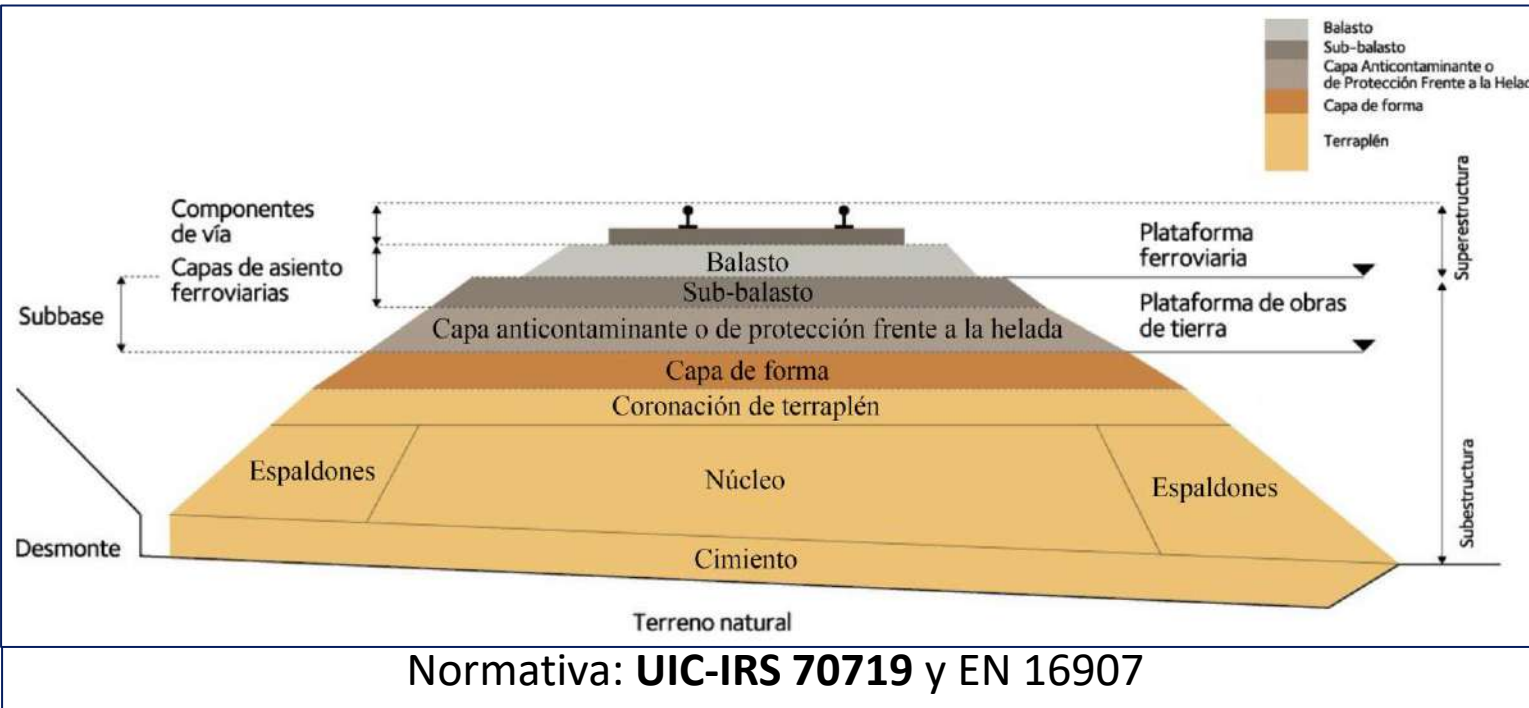
EUROPEAN STANDARD	EN 16907-1
NORME EUROPÉENNE	
EUROPÄISCHE NORM	December 2018
CS 93.020	
English Version	
Earthworks - Part 1: Principles and general rules	

2.a GEOTECNIA FERROVIARIA

Rama de la **Ingeniería Geotécnica** dedicada a las **características geotécnicas** de los **materiales** que componen la infraestructura de las líneas férreas

Elementos de la infraestructura ferroviaria

- **Componentes de vía:**
 - carril,
 - sistema sujeción,
 - suelas bajo carril,
 - Traviesas (durmientes)
- Banqueta de **balasto**
- Sub-base:
 - **Subbalasto**,
 - Capa de protección contra helada
 - Capa de filtro
- **Capa de forma**
- **Terraplén** (si hay)
- **Terreno natural o desmante**

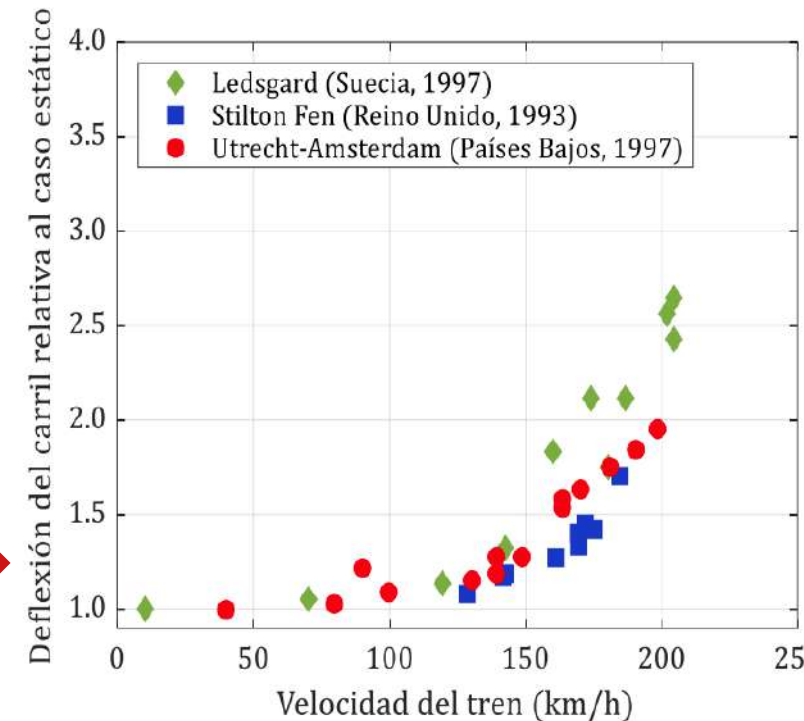


3. FASE DE PROYECTO: ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

VELOCIDAD CRÍTICA

➤ Efecto de una carga en movimiento sobre la vía

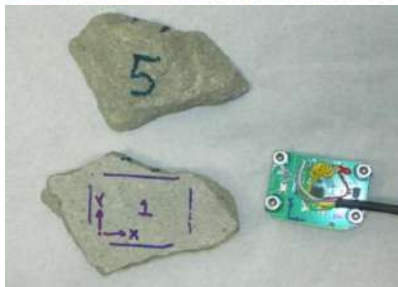
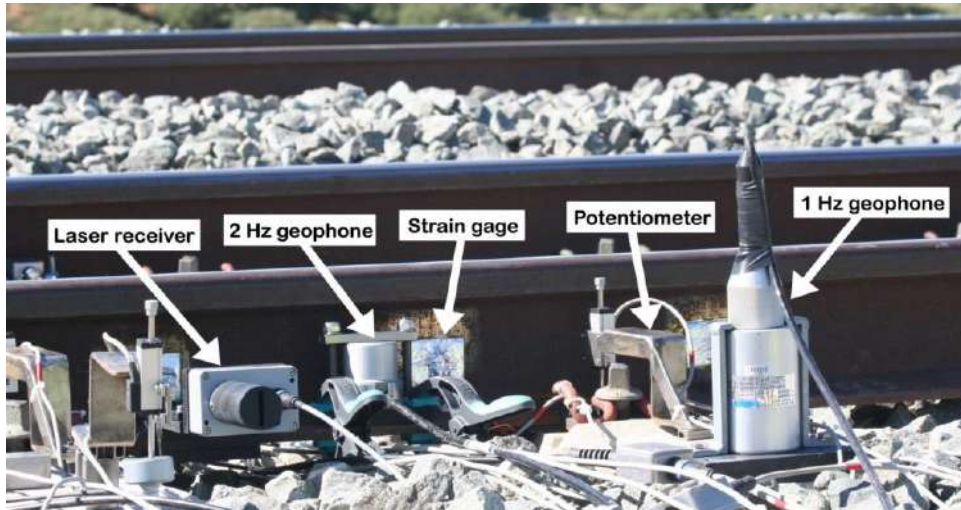
- **Una carga, al desplazarse** por la vía con cierta velocidad produce movimientos en la infraestructura y en el terreno natural subyacente
- Esa carga transmite energía que se desplaza en el terreno en forma de ondas
- Esas ondas se transmiten por el terreno a la velocidad de propagación de las ondas (V_s) que depende de la “calidad geotécnica” del terreno (a mayor calidad, mayor velocidad)
- Si el tren va a velocidades parecidas a la velocidad de propagación de las ondas, a la energía no le da tiempo a disiparse y se va acumulando
- Esa acumulación de energía se transforma en amplificaciones del movimiento
- Problema asociado a terrenos geotécnicos malos (blandos)



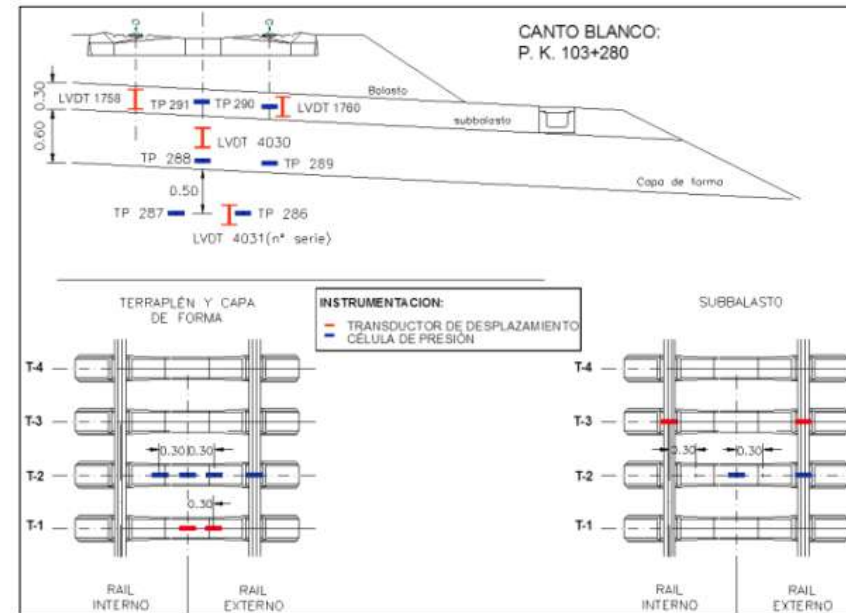
Atención en líneas en renovación con aumento significativo de velocidad

Velocidad crítica de líneas de ferrocarril	Inés Crespo
--	-------------

4. AUSCULTACIÓN DE SECCIONES FERROVIARIAS



Acelerómetro en piedra de balasto



Instrumentación y ensayos geofísicos en líneas de ferrocarril

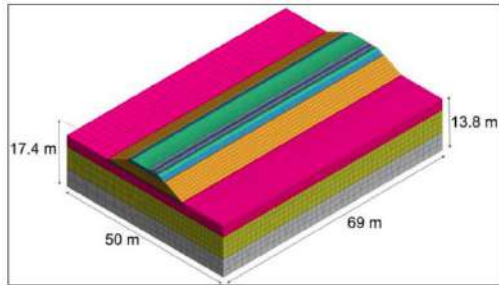
Ángel Tijera

5. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Métodos de Elementos Finitos (MEF) o de Diferencias Finitas (MDF)

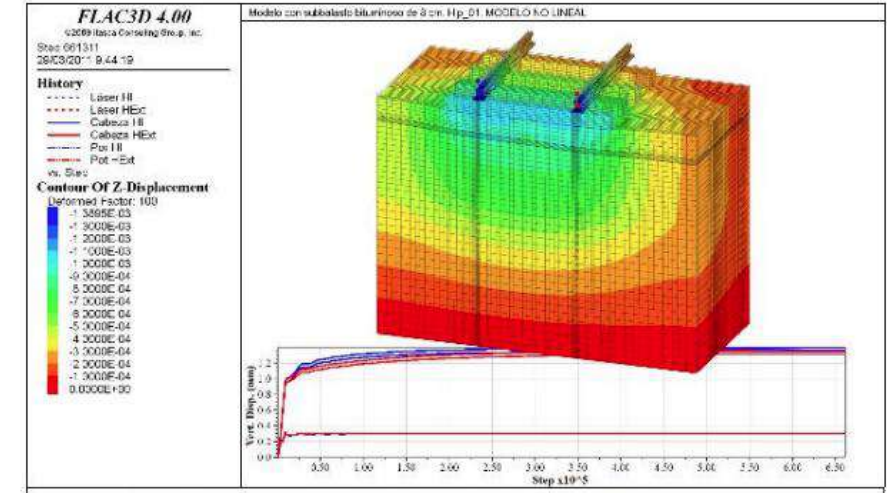
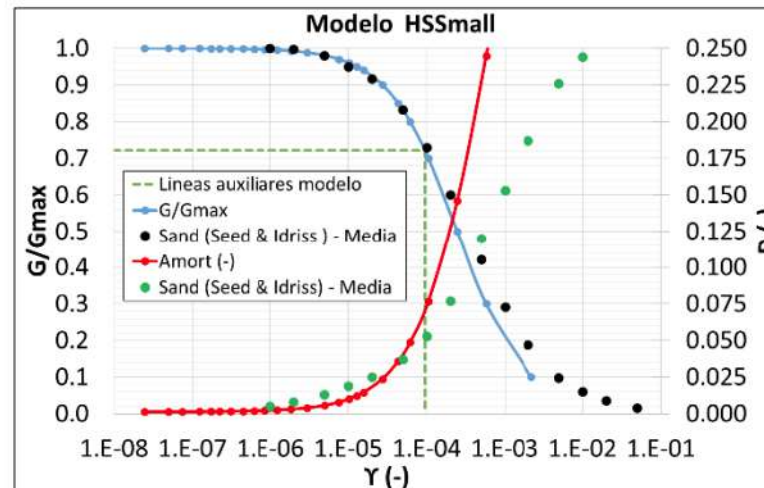
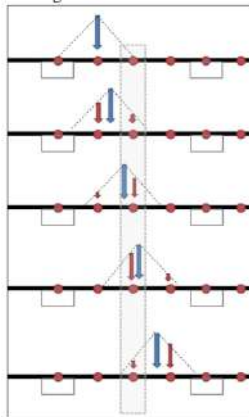
Factores a considerar en la modelización:

- Geometría de la sección y detalles de superestructura



Carriles – vigas
Suelas bajo carril – muelles
Traviesas – elemento volumétrico con interfaces

- Condiciones de borde – absorción en contorno vertical
- Modelización de la deformabilidad y amortiguamiento
- Aplicación de cargas móviles



Modelización numérica
de líneas de ferrocarril

Javier Moreno

6. CAJÓN FERROVIARIO DEL CEDEX



Instalación de ensayos de infraestructura ferroviaria

- Modelos a escala 1:1
- Modelización de trenes hasta 420 km/h
- Ensayos acelerados => 10 días de ensayos equivalente a 1 año de tráfico en vía real

RESUMEN

- Elementos de la infraestructura ferroviaria
- Modelización numérica
- Auscultación de las vías ferroviarias
- Normativa

AGRADECIMIENTOS

- **Precursores de la Geotecnia Ferroviaria en CEDEX**

- Vicente Cuéllar, José Luis G. de la Oliva y Julián Valerio

- **Ponentes en este seminario:**

- Inés Crespo, Ángel Tijera, Javier Moreno y María Santana

- **Compañeros en el CEDEX**

- Rubén Ruiz, Natalia Montero, Juan L. Cámara, Sagrario Merino, Miguel Martínez, Marcos Asperilla, Fernando Pesquera, Felipe García, Pedro J. García, José L. Amores, Mauro Muñiz, Eva Marull, Silvia Ajates, Rosa Navidad, José L. Gómez, José L. Toledo

CEDEX

Laboratorio de
Geotecnia



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

SEMINARIO SOBRE GEOTECNIA FERROVIARIA

CEDEX

**LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA
DESDE UNA PERSPECTIVA GEOTÉCNICA**

José ESTAIRE



María SANTANA

jose.estaire@cedex.es

Maria.S.Ruiz@cedex.es

CEDEX

Laboratorio de Geotecnia

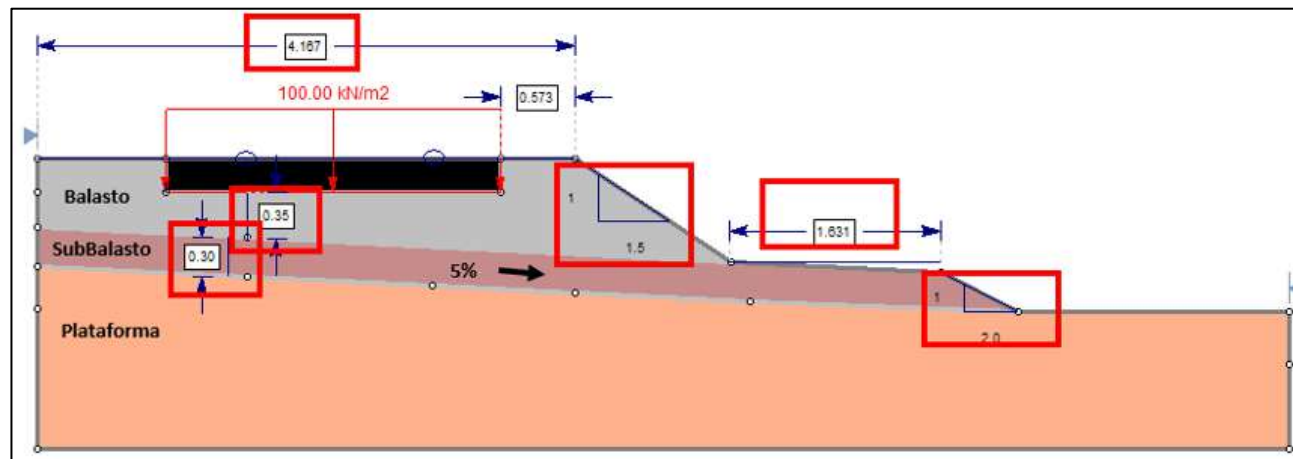
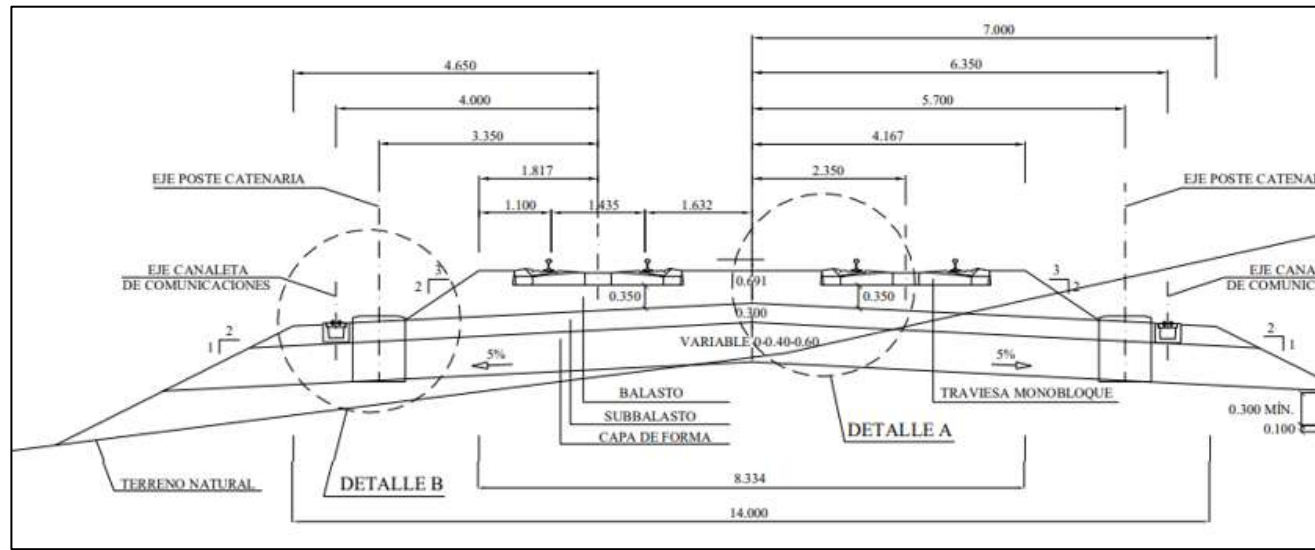
 CEDEX_es  CEDEX



ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Geometría analizada

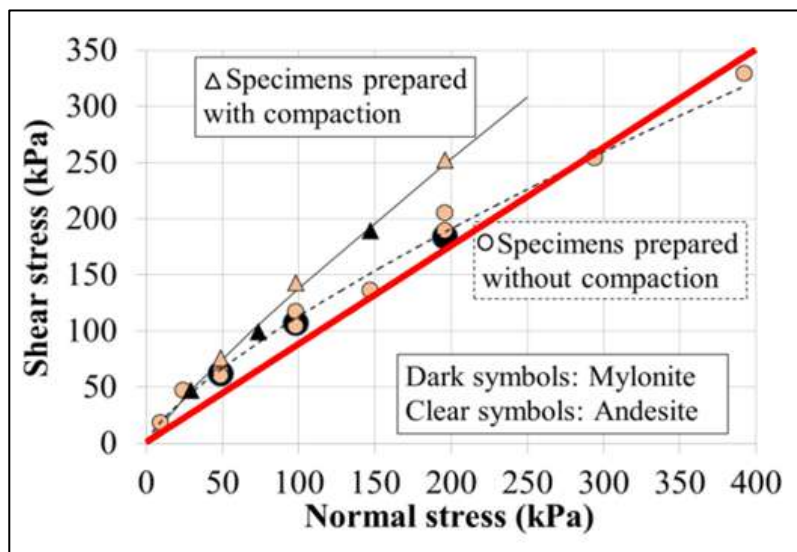


ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Propiedades de los materiales

BALASTO



$$\phi_i = 45^\circ$$

SUBBALASTO

Tabla 4.- Propiedades resistentes de la capa de subbalasto usadas en los modelos

Cohesión (kPa)	Ángulo de rozamiento (°)	Calidad
10	40	Buena
5	35	Media
2,5	30	Mala

PLATAFORMA

La plataforma modelizada en este trabajo se ha supuesto de buena calidad, equiparándose incluso a un sustrato rocoso que no va a verse afectado por posibles roturas de las capas de balasto y subbalasto. Tal y como se detallará en el apartado del modelo de cálculo, esta capa se ha modelizado con una resistencia infinita, para evitar que las superficies de deslizamiento la atraviesen.

ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

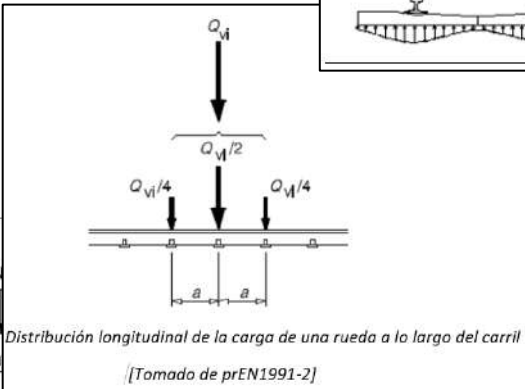
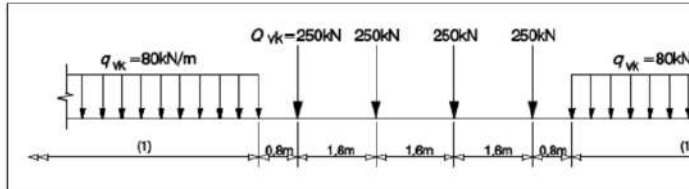
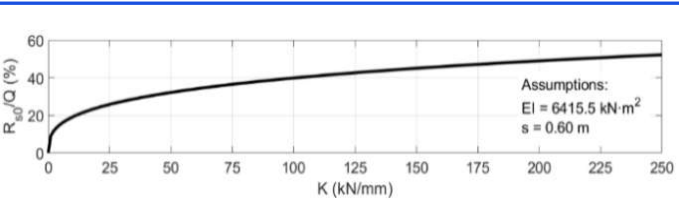
MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO







Estado límite último de estabilidad global – Modelización de las cargas

- Tren de pasajeros tipo, con una carga por eje de 170 kN
- Tren de mercancías tipo, con una carga por eje de 225 kN.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- Categoría de sujeción C, según UNE-EN 13481-2 vigente. Superación de ensayos UNE-EN 13146 vigente, partes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 , 9 y 10.
- Resistencia longitudinal del carril $\geq 9\text{kN}$ (7kN para velocidad $\leq 250\text{ km/h}$), según UNE-EN 13146-1
- Atenuación a las cargas de impacto media, según UNE-EN 13146-3.
- Fuerza de apriete $\geq 15\text{kN}$, según UNE-EN 13146-7.
- Carga de diseño máxima por eje: 26 t.
- Rigidez estática nominal de la placa de asiento: Ver planos.
- Rigidez estática del conjunto comprendida entre 100 y 200 kN/mm, según UNE-EN 13146-9.
- Inclinación del carril 1:20.



Distribution of contact pressure underneath the concrete sleeper	Description	Developer
	Uniform distribution	AREA [8], Talbot [15], Raymond [16]
	According to laboratory test	ORE [9], Talbot [17]
	Maximum pressure under the rails	ORE, Talbot [15]
	Concentration of pressure in sleeper center	Talbot [17]
	Tamping effects and ballast compaction in the vicinity of rails	ORE [9], Talbot [15], Bartlett [18], Clark [19]
	According to field test	Zakeri and Sadeghi [2]

La simulación del paso de trenes queda incompleta si no se consideran las acciones horizontales que sufre también la vía. Prud'homme estableció, en 1967, la relación entre el esfuerzo transversal aplicado y el desplazamiento máximo producido. Esta ley se obtuvo para diferentes esfuerzos verticales por eje aplicados sobre la vía, obteniéndose un coeficiente de correlación α igual a 0,25. Basándonos en este dato, en el presente trabajo se ha supuesto que las tensiones horizontales van a representar como máximo el 30% de las verticales.

Tabla 5.- Cargas aplicadas en el programa de estabilidad

Tren	Caso	Carga vertical (kPa)	Carga horizontal (kPa)	Carga resultante (kPa)	Inclinación de la carga respecto a la vertical (°)
Pasajeros	1	100	0	100	0
	2		15	101,1	8,5
	3		30	104,4	16,7
Mercancías	4	135	0	135	0
	5		20	136,5	8,5
	6		40	140,8	16,7
Carga máxima de diseño	7	155	0	155,0	0
	8		25	157,0	8,5
	9		50	162,8	16,7

ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

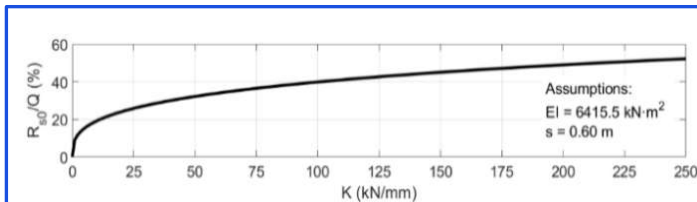
MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Modelización de las cargas

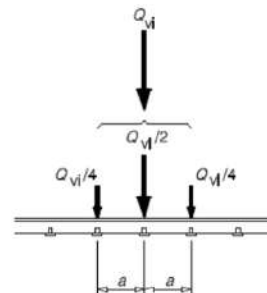
- Tren de pasajeros tipo, con una carga por eje de 170 kN
- Tren de mercancías tipo, con una carga por eje de 225 kN.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- Categoría de sujeción C, según UNE-EN 13481-2 vigente. Superación de ensayos UNE-EN 13146 vigente, partes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10.
- Resistencia longitudinal del carril $\geq 9\text{ kN}$ (7kN para velocidad $\leq 250\text{ km/h}$), según UNE-EN 13146-1
- Atenuación a las cargas de impacto media, según UNE-EN 13146-3.
- Fuerza de apriete $\geq 15\text{ kN}$, según UNE-EN 13146-7.
- Carga de diseño máxima por eje: 26 t.
- Rigidez estática nominal de la placa de asiento: Ver planos.
- Rigidez estática del conjunto comprendida entre 100 y 200 kN/mm, según UNE-EN 13146-9.
- Inclinación del carril 1:20.



Coeficiente de reparto: 0,4



Distribución longitudinal de la carga de una rueda a lo largo del carril

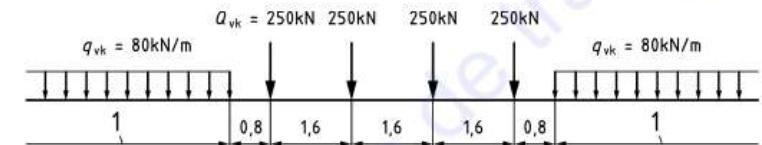
[Tomado de prEN1991-2]

EN 1991-2:2023 (E)

8.3.2 Load Model 71

- (1) Load Model 71 (LM71) represents the static effect of vertical loading due to normal rail traffic.
- (2) The load arrangement and the characteristic values for vertical loads shall be taken as shown in Figure 8.1.

Dimensions in metres



Key

- 1 No limitation, see 8.8.1

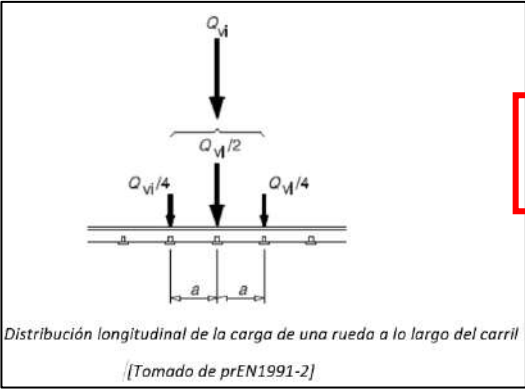
Figure 8.1 — Load Model 71 and characteristic values for vertical loads

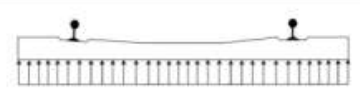
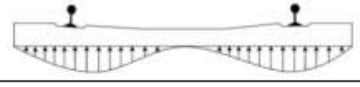
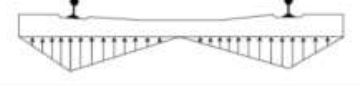



ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Modelización de las cargas

- Tren de pasajeros tipo, con una carga por eje de 170 kN
- Tren de mercancías tipo, con una carga por eje de 225 kN.



Distribution of contact pressure underneath the concrete sleeper	Description	Developer
	Uniform distribution	AREA [8], Talbot [15], Raymond [16]
	According to laboratory test	ORE [9], Talbot [17]
	Maximum pressure under the rails	ORE, Talbot [15]
	Concentration of pressure in sleeper center	Talbot [17]
	Tamping effects and ballast compaction in the vicinity of rails	ORE [9], Talbot [15], Bartlett [18], Clark [19]
	According to field test	Zakeri and Sadeghi [2]

La simulación del paso de trenes queda incompleta si no se consideran las acciones horizontales que sufre también la vía. Prud'homme estableció, en 1967, la relación entre el esfuerzo transversal aplicado y el desplazamiento máximo producido. Esta ley se obtuvo para diferentes esfuerzos verticales por eje aplicados sobre la vía, obteniéndose un coeficiente de correlación α igual a 0,25. Basándose en este dato, en el presente trabajo se ha supuesto que las tensiones horizontales van a representar como máximo el 30% de las verticales.

EN 1991-2:2023 (E)

8.5	Horizontal forces — characteristic values	84
8.5.1	Centrifugal forces	84
8.5.2	Nosing force	89
8.5.3	Actions due to traction and braking	89
8.5.4	Combined response of structure and track to variable actions.....	91

ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Modelización de las cargas

Tabla 5.- Cargas aplicadas en el programa de estabilidad

Tren	Caso	Carga vertical (kPa)	Carga horizontal (kPa)	Carga resultante (kPa)	Inclinación de la carga respecto a la vertical (°)
Pasajeros	1	100	0	100	0
	2		15	101,1	8,5
	3		30	104,4	16,7
Mercancías	4	135	0	135	0
	5		20	136,5	8,5
	6		40	140,8	16,7
Carga máxima de diseño	7	155	0	155,0	0
	8		25	157,0	8,5
	9		50	162,8	16,7

ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Resultados obtenidos – Rotura a través de la banquetta de balasto

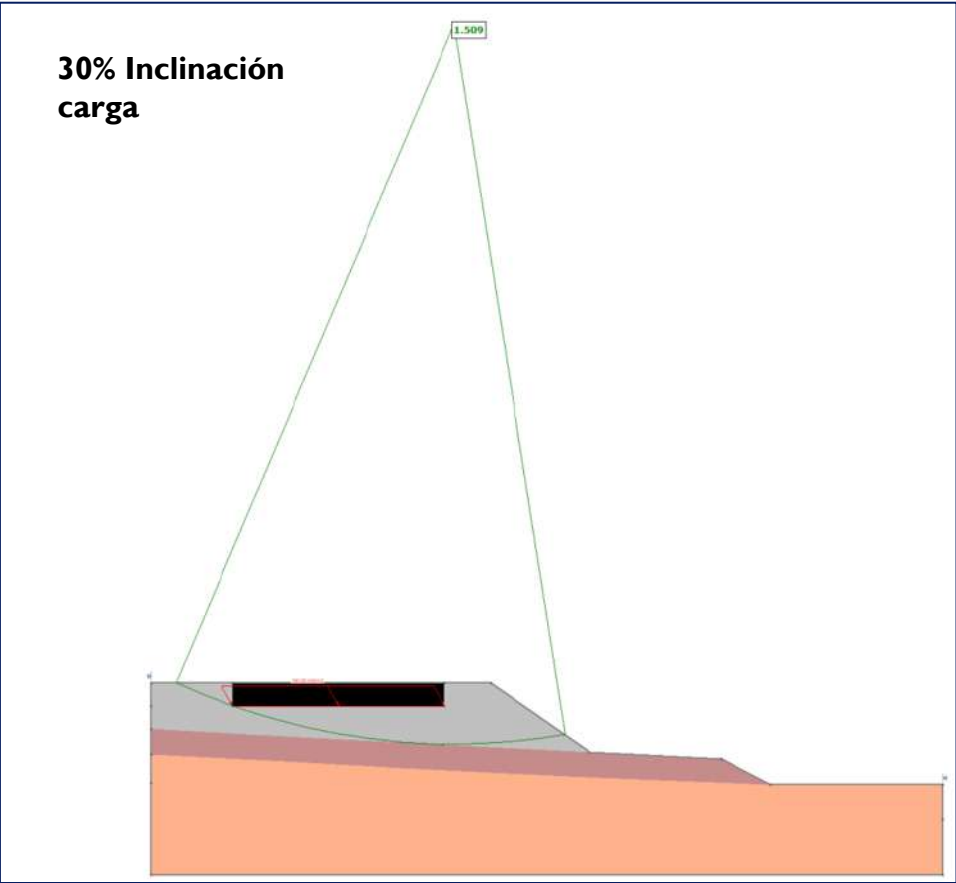


Tabla 6.- Factores de seguridad para tren de pasajeros y sin carga horizontal

Carga vert.	100 kPa	Carga horizt.	0 kPa	Inclinación	90º	Resultante	100 kPa
Subbalasto		Espesor Balasto cm					
c (kPa)	fi (º)	15	25	35	50	75	100
infinito	infinito	10,47	7,84	6,41	4,75	3,85	3,05
10	40	5,35	4,58	4,00	3,53	2,96	2,58
5	35	4,36	3,79	3,35	2,98	2,52	2,22
2,5	30	3,54	3,18	2,86	2,56	2,20	1,96

ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Resultados obtenidos – Rotura a través de la banquetta de balasto

Tabla 6.- Factores de seguridad para tren de pasajeros y sin carga horizontal

Carga vert.	100 kPa	Carga horizt.	0 kPa	Inclinación	90°	Resultante	100 kPa
Subbalasto		Espesor Balasto cm					
c (kPa)	fi (°)	15	25	35	50	75	100
infinito	infinito	10,47	7,84	6,41	4,75	3,85	3,05
10	40	5,35	4,58	4,00	3,53	2,96	2,58
5	35	4,36	3,79	3,35	2,98	2,52	2,22
2,5	30	3,54	3,18	2,86	2,56	2,20	1,96

Tabla 8.- Factores de seguridad para tren de pasajeros y con carga horizontal de 30 kPa

Carga vert.	100 kPa	Carga horizt.	30 kPa	Inclinación	71,4°	Resultante	104,4 kPa
Subbalasto		Espesor Balasto cm					
c (kPa)	fi (°)	15	25	35	50	75	100
infinito	infinito	2,60	2,36	2,44	2,06	1,89	1,85
10	40	2,21	2,13	2,11	1,87	1,79	1,74
5	35	1,76	1,74	1,65	1,57	1,46	1,47
2,5	30	1,44	1,40	1,44	1,32	1,25	1,26

Tabla 12.- Factores de seguridad para el tren representativo de la carga máxima de diseño y sin carga horizontal

Carga vert.	155	Carga horizt.	0 kPa	Inclinación	90°	Resultante	166 kPa
Subbalasto		Espesor Balasto cm					
c (kPa)	fi (°)	15	25	35	50	75	100
infinito	infinito	10,47	7,54	6,30	4,60	3,62	2,97
10	40	4,91	4,07	3,70	3,26	2,72	2,38
5	35	4,08	3,45	3,17	2,79	2,31	2,05
2,5	30	3,40	2,91	2,72	2,43	2,08	1,85

Fi = 45°

45	tan 45	1,00
40	tan 40	0,84
35	tan 35	0,70

ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LA BANQUETA DE BALASTO

MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DEL SUELO

Estado límite último de estabilidad global – Resultados obtenidos – Rotura a través del hombro

