

UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS



REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA NORMATIVA DE CERTIFICACIÓN DINÁMICA DE LA UNIÓN EUROPEA Y DE RUSIA

Trabajo y Ampliación de Fin de Máster

Máster Universitario de Sistemas Ferroviarios

Miguel Ángel Fernández Martínez

Director: Dr. José Carlos Miguel de Priego

Julio de 2015

FICHA RESUMEN

Autor:	Fernández Martínez, Miguel Ángel
Director:	Dr. Miguel de Priego, José Carlos
Programa académico:	Máster Universitario de Sistemas Ferroviarios
Curso académico:	2014-2015
Título:	<i>Revisión y análisis de la normativa de certificación dinámica de la Unión Europea y de Rusia</i>

La motivación principal para la realización del presente trabajo es el interés de la industria española ferroviaria en participar en el mercado del CIS (Commonwealth of Independent States, compuesto por los países que conformaron la extinta URSS), por lo que procede realizar estudios sobre los requisitos para comercializar productos en dicho entorno.

Para ello es necesaria la comparativa entre las exigencias europeas y las establecidas en dichos países. Uno de los aspectos fundamentales a tratar es la certificación dinámica, por lo que en este documento se abordará un análisis comparativo entre las **normativas de certificación dinámica** europea y rusa.

El análisis se realiza comparando los parámetros de ambos entornos obteniéndose el grado de compatibilidad entre ellos. Así es posible determinar si un vehículo ferroviario certificado bajo las especificaciones europeas cumplirá con las rusas y qué aspectos no son comparables, dando lugar estos últimos a ensayos y cálculos adicionales.

El estudio se centrará en trenes autopropulsados con bogies con el fin de acotar el alcance, dejando como posible desarrollo extenderlo a otro tipo de vehículos ferroviarios de distintas características.

Los aspectos fundamentales tratados en este trabajo y las conclusiones respecto de éstos son los siguientes:

- **Seguridad en circulación:** la Norma europea es más restrictiva que la rusa.
- **Solicitud a la vía:** la Norma europea es más restrictiva que la rusa, teniendo en cuenta el tratamiento de los datos obtenidos en los ensayos. En este apartado existen aspectos en ambas Normas que no son comparables entre sí.
- Los criterios de **confort o comodidad** no son comparables.
- Las Normas rusas relacionan los valores de los índices dinámicos con los **requisitos estructurales**. La Normas europeas tratan por separado ambos aspectos, el dinámico y el estructural.

Firma del autor

Miguel Ángel Fernández

Firma del Director

Dr. José Carlos Miguel de Priego

1.	INTRODUCCIÓN Y RESUMEN.	1
2.	OBJETIVOS.....	2
3.	TAREAS Y PLANIFICACIÓN.....	2
4.	DESARROLLO Y MEMORIA.	4
4.1.	Normativa principal de certificación dinámica europea y rusa.....	4
4.2.	Métodos de ensayo	5
4.2.1.	Enfoque de la normativa europea.	5
4.2.1.1.	Tipos de ensayo.....	5
4.2.1.2.	Ensayos en línea	5
4.2.1.3.	Métodos de medición.....	10
4.2.1.4.	Condiciones para la ejecución de los ensayos	14
4.2.2.	Enfoque de la normativa rusa	16
4.2.2.1.	Método de ensayo	16
4.2.2.2.	Condiciones para la ejecución de los ensayos	17
4.2.3.	Comparativa de la normativa europea y rusa en ensayos.	18
4.3.	Seguridad en circulación	19
4.3.1.	Estabilidad en dinámica ferroviaria.....	19
4.3.1.1.	Velocidad crítica.	19
4.3.1.2.	Influencia de la geometría contacto carril.....	20
4.3.2.	Criterios de seguridad en curva.	20
4.3.2.1.	Criterio de descarrilo de Nadal.	21
4.3.2.2.	Criterio de descarrilo de Weinstock.....	21
4.3.2.3.	Criterio de descarrilo basado en la duración del valor admisible de Y/Q para el remonte de pestaña.	22
4.3.2.4.	Criterio de descarrilo basado en la distancia recorrida con un valor admisible de L/V para el remonte de pestaña.	22
4.3.2.5.	Criterio de descarga de rueda.....	23
4.3.2.6.	Límite de ripado.	23
4.3.3.	EN 14363. Seguridad en circulación.....	23
4.3.3.1.	Seguridad contra el descarrilamiento en vehículos ferroviarios que circulan por vías en curva.	24
4.3.3.2.	Suma de las fuerzas directrices de guiado.....	25
4.3.3.3.	Coeficiente entre la fuerza de guiado y la carga de rueda.	25
4.3.3.4.	Suma de las fuerzas transversales de la caja de grasa.	26
4.3.3.5.	Aceleración máxima del bogie.	26
4.3.3.6.	Aceleraciones máximas en la caja del vehículo.	26
4.3.3.7.	Criterio de inestabilidad.	27
4.3.4.	Conclusiones relativas a la seguridad en circulación de la Norma EN 14363.	28
4.3.5.	GOST R 55496 / GOST R 55495. Seguridad en circulación.	28
4.3.5.1.	Indicador de dinámica horizontal I_{dhor}	28

4.3.5.2.	Factor de seguridad contra el descarrilamiento λ .	30
4.3.6.	Conclusiones relativas a la seguridad de circulación de las Normas GOST R 55495 y GOST R 55496	31
4.3.7.	Seguridad en circulación. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.	32
4.3.7.1.	Criterios de inestabilidad.	32
4.3.7.2.	Criterios de ripado de vía.	33
4.3.7.3.	Criterio de descarrilamiento	36
4.4.	Solicitud a la vía.	38
4.4.1.	EN 14363. Solicitud a la vía.	38
4.4.2.	GOST R 55496 / GOST R 55495. Solicitud a vía.	39
4.4.2.1.	Indicador de la dinámica vertical de la suspensión primaria I_{d1} .	39
4.4.3.	Solicitud a la vía. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.	40
4.5.	Comodidad (comfort).	43
4.5.1.	Calidad de marcha según EN 14363.	43
4.5.2.	Suavidad de marcha (comodidad media) GOST R 55495 / GOST R 55496.	44
4.5.3.	Confort o comodidad. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.	45
4.6.	Parámetros no comparables.	47
4.6.1.	Indicador de la dinámica vertical de la suspensión secundaria I_{d2} .	47
4.6.1.1.	Método de cálculo.	48
4.6.1.2.	Método de ensayo	48
4.7.	Cálculo y ensayo estructural de los componentes de rodadura.	48
4.7.1.	EN 14749. Aspectos generales de los requisitos estructurales. Bastidor de bogie.	49
4.7.2.	GOST R 55495. Aspectos generales de los requisitos estructurales. Bastidor de bogie.	51
4.7.3.	Requisitos estructurales. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.	52
4.7.3.1.	Fuerzas verticales dinámicas durante la circulación.	52
4.7.3.2.	Fuerzas horizontales en el bastidor.	53
4.8.	Tratamiento de datos.	53
4.8.1.	Tratamiento de datos. Norma GOST R 55495.	54
4.8.2.	Tratamiento de datos. Norma EN 14363.	56
4.8.3.	Tratamiento de datos. Comparativa de las Normas.	56
5.	CONCLUSIONES Y APORTACIONES.	58
5.1.	Conclusiones	58
5.2.	Aportaciones	58

1. INTRODUCCIÓN Y RESUMEN.

La industria española ferroviaria tiene entre sus objetivos participar en el mercado del CIS* que en mayor medida toma como referencia la reglamentación que emana de las autoridades ferroviarias de Rusia, algo que viene derivado de los vínculos históricos de los países que conformaron la extinta U.R.S.S, con lo que es necesario adaptar los productos a la certificación rusa identificando los aspectos que pudieran permitir el cumplimiento con esta reglamentación. Por lo que surge la necesidad analizar si un producto podría ser certificado en ambos entornos, Europa y Rusia.

En este documento se abordará un análisis comparativo entre las **normativas de certificación dinámica** europea y rusa. El estudio se centrará en trenes autopropulsados con bogies con el fin de acotar el alcance, dejando como posible desarrollo extenderlo a otro tipo de vehículos ferroviarios.

El documento es autocontenido, para que no sea necesaria la lectura de las distintas reglamentaciones implicadas para extraer una idea general de cada una de ellas y el grado de compatibilidad o equivalencia entre ambas.

Inicialmente se describirán los métodos de ensayo de cada una de las reglamentaciones para después compararlos buscando los aspectos comunes y no comunes. Posteriormente se focalizará el estudio en los aspectos fundamentales de la dinámica ferroviaria:

- Seguridad en la circulación.
- Solicitud a la vía.
- Confort del viajero.

Adicionalmente se tratará el cálculo y ensayo estructural de los componentes de rodadura, en concreto el bastidor del bogie, y su relación con parámetros dinámicos, dado que así lo establecen las normas rusas.

En cada uno de los apartados se seguirá el mismo esquema:

1. Inicialmente se detallarán los parámetros o índices presentes en la bibliografía más destacada.
2. Posteriormente se expondrán cada una de las reglamentaciones (rusa y europea) indicando los índices y los valores de referencia, contrastándolos con el punto anterior.
3. Seguidamente se realizará una comparativa cuantitativa entre ambas normativas.

El estudio finaliza con una serie de conclusiones y análisis sobre la compatibilidad entre ambas regulaciones.

**Commonwealth of Independent States, compuesto por Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Kazajistán, Kirguistán, Moldavia, Rusia, Tayikistán, Uzbekistán y, como participante no asociado, Ucrania.*

2. OBJETIVOS.

Los objetivos del Trabajo Fin de Máster son los siguientes:

- Recopilación y resumen de los aspectos determinantes de la normativa de certificación dinámica europea y rusa.
- Análisis de esas normativas.
- Comparativa entre ellas.

En cuanto a la ampliación del Trabajo Fin de Máster, el objetivo es:

- Análisis cuantitativo determinando si el vehículo ferroviario diseñado para cumplir con la normativa Europea cumpliría con la de Rusia o qué previsiones habría que tener para que cumpla.

3. TAREAS Y PLANIFICACIÓN.

Tareas del estudio.

- Adquisición de la normativa básica.
- Lectura general.
- Ordenación de las definiciones y aspectos básicos de cada una de las normativas (comunes y no comunes).
- Realización de un índice.
- Lectura en profundidad de las normativas.
- Adquisición de normativa complementaria o adicional.
- Comparativa de las normativas.

Tareas de la Ampliación del estudio.

- Síntesis de la comparativa.
- Análisis y objetivos de cada uno de los aspectos comunes.
- Análisis y objetivos de los aspectos singulares de cada normativa.
- Cuantificación de cada uno de los parámetros.
- Conclusiones sobre los parámetros necesarios y sus valores para el cumplimiento de ambas normativas.
- Compatibilidad. Cumplimiento con ambas reglamentaciones.

Año 2014-2015	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Tareas										
Adquisición de la normativa básica										
Lectura general de la normativa básica										
Ordenación de las definiciones y aspectos básicos										
Realización de un índice (primer borrador).										
Lectura en profundidad de las normativas.										
Adquisición de normativa complementaria o adicional										
Comparativa de las normativas										
Tareas de la ampliación del estudio										
Síntesis de la comparativa										
Análisis y objetivos de cada uno de los aspectos comunes										
Análisis y objetivos de los aspectos singulares de cada normativa										
Cuantificación de cada uno de los parámetros										
Conclusiones sobre los parámetros analizados										
Valores para el cumplimiento de ambas normativas										
Compatibilidad. Cumplimiento con ambas reglamentaciones.										
Tareas finales										
Emisión del primer borrador del estudio										
Correcciones sobre el estudio										
Elaboración de la presentación del estudio										
Presentación										

4. DESARROLLO Y MEMORIA.

4.1. Normativa principal de certificación dinámica europea y rusa.

La norma principal en cuanto a certificación dinámica en Europa es la **EN 14363:2005** '*Aplicaciones ferroviarias. Ensayos para la aceptación del comportamiento dinámico de vehículos ferroviarios. Ensayos en parada*', que regula los ensayos de vehículos ferroviarios desde el punto de vista de su comportamiento dinámico. Los ensayos se aplican esencialmente a todos los vehículos ferroviarios de transporte público que circulan sin restricciones sobre vías de ancho normal (1435 mm).

En cuanto a la reglamentación rusa son dos normas. La **GOST R 55496-2013** '*Trenes autopropulsados. Metodología de ensayos dinámicos y de resistencia*', que es de aplicación al material autopropulsado destinado a la explotación en ferrocarril con ancho de vía 1520 mm. Este estándar establece la metodología de pruebas dinámicas y de resistencia. Y la **GOST R 55495-2013** '*Trenes autopropulsados. Requisitos de resistencia y características dinámicas*'. De aplicación en trenes autopropulsados designados para ancho de vía de 1520 mm, que establece los requisitos de resistencia y cualidades dinámicas, los tipos de ensayo y el volumen de cálculos de los parámetros de dinámica y resistencia.

De los títulos y del ámbito de aplicación de las Normas rusas se deduce que existe un tratamiento conjunto de los requisitos dinámicos y de resistencia estructural, por lo que obliga a valorar y analizar dicha relación. Con lo que también es necesario tener en cuenta lo establecido por las normas europeas en cuanto a requisitos estructurales, en concreto la **EN 13749:2011** '*Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie*', que especifica el método a seguir para alcanzar un diseño satisfactorio de los bastidores de bogie e incluye procedimientos de diseño, métodos de evaluación, verificación y requisitos de calidad de fabricación. Se limita a los requisitos estructurales de los bastidores de bogies incluyendo las traviesas y los alojamientos de las cajas de grasa.

Sobre la base de estas normas se desarrolla el presente estudio. Se indica en la bibliografía otras normas que se han tenido en cuenta o se han consultado.

Primeramente se abordará el estudio de los ensayos para posteriormente analizar los parámetros dinámicos y estructurales de ambas reglamentaciones.

4.2. Métodos de ensayo

4.2.1. Enfoque de la normativa europea.

Estructura de los elementos de ensayo, según indica la norma EN 14363:

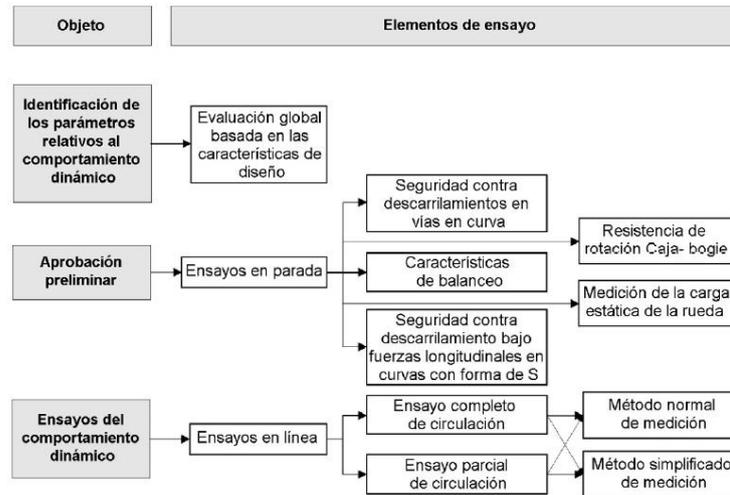


Fig. 1. Estructura de los elementos de ensayo.

4.2.1.1. Tipos de ensayo

La Norma define los diferentes tipos de ensayos:

“Ensayos preliminares de aprobación / Ensayo en parada”.

Ensayos para evaluar la capacidad de los vehículos de operar en condiciones límites de geometría y trazado de la vía.

“Ensayos en línea”.

Ensayos efectuados en tramos de vía seleccionados y relativamente cortos que presentan características de trazado específicas. Los ensayos en línea permiten evaluar el comportamiento dinámico del vehículo en el rango estipulado de velocidad e insuficiencia de peralte.

La Norma define como comportamiento dinámico las características de un vehículo o de unos órganos de rodadura con relación a la interacción del vehículo y la vía. El comportamiento dinámico engloba:

- Seguridad de circulación.
- Solicitación de la vía.
- Características de marcha.

4.2.1.2. Ensayos en línea

Dentro de los ensayos de línea, existen dos tipos de ensayos:

Ensayo completo de línea.

Ensayo de comportamiento dinámico teniendo en cuenta las condiciones de circulación y todos los estados del vehículo

*Ensayo **parcial** en línea.*

Ensayo de comportamiento dinámico realizado para una ampliación de la aceptación que permite la aplicación reducida del ensayo.

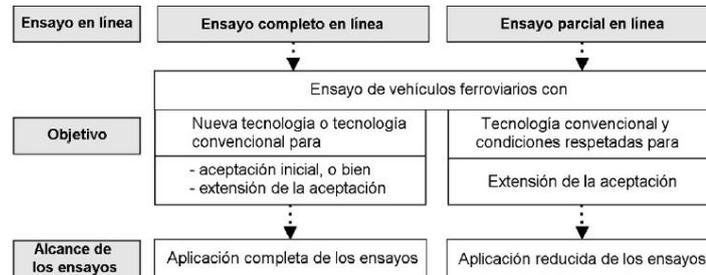


Fig. 2. Características de los ensayos en línea.

Ensayo completo en línea

Para los ensayos completos de línea y vehículos para la explotación internacional, la Norma establece que se deben revisar **todas** las combinaciones de condiciones de ensayo:

- Zonas de ensayo.
Vía recta, curvas de radio grande, curvas de $400\text{m} \leq R \leq 600\text{m}$ y $250\text{m} \leq R \leq 400\text{m}$
- Inclinación de carril (1:40 y 1:20).
- Condición de carga: vacío y cargado.
- Condiciones críticas.
- Condiciones degradadas.

Los ensayos completos en línea son necesarios para la aceptación inicial. Para la aceptación de un vehículo de diseño convencional, se emplea el ensayo completo si no se cumplen las condiciones de aplicación parcial. Los vehículos con velocidades máximas permitidas $V_{adm} \leq 60 \text{ km/h}$ están exentos.

La Norma determina una serie de requisitos para la **exención de los ensayos en línea** para la extensión de la aceptación, siempre que se cumpla que:

- Los ensayos de aceptación inicial se hayan efectuado por el método de medición normal o que se cumplan las condiciones de base para la aplicación del método de medición simplificado.
- En la aceptación inicial debe haberse cumplido con un factor de seguridad $\geq 1,1$.
- La variación de los parámetros del vehículo están dentro de lo establecido por la Norma (ver tablas siguientes).

Revisión y análisis de la normativa de certificación dinámica de la Unión Europea y de Rusia

Parámetro modificado	Exención de ensayos en línea		Aplicación de ensayos parciales en línea	
	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías
Parámetros de explotación				
Aumento de la velocidad máxima admisible	_ ^b	_ ^b	De 0 km/h a +20 km/h	De 0 km/h a +20 km/h
Parámetros del vehículo				
Distancia entre los centros de los bogies	Del -5% al +20%	Del -15% al +A ^a para $2a^* \geq 9 \text{ m}^e$ Del -5% al +A ^a para $2a^* < 9 \text{ m}^e$	Del -10% al +A ^a	Del -30% al +A ^a para $2a^* \geq 9 \text{ m}^e$ Del -10% al +A ^a para $2a^* < 9 \text{ m}^e$
Distancia entre los ejes del vehículo (vehículo de 2 ejes)	No aplicable	Del -15% al +A ^a para $2a^x \geq 8 \text{ m}^e$ Del -5% al +A ^a para $2a^x < 8 \text{ m}^e$	No aplicable	Del -30% al +A ^a para $2a^x \geq 8 \text{ m}^e$ Del -10% al +A ^a para $2a^x < 8 \text{ m}^e$
Altura del centro de gravedad – vehículo vacío	Del -20% al +10%	Del -100% al +20%	Del -40% al +40%	Del -100% al +A ^a
Altura del centro de gravedad – vehículo cargado	Del -20% al +10%	Del -100% al +50%	Del -40% al +40%	Del -100% al +A ^a

Parámetro modificado	Exención de ensayos en línea		Aplicación de ensayos parciales en línea	
	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías
Masa no suspendida	Del -5% al +5%	No aplicable	Del -10% al +10%	No aplicable
Masa suspendida primaria (masa total si el vehículo no tiene nivel de suspensión secundario)	Del -5% al +5%	No aplicable	Del -10% al +10%	No aplicable
Masa suspendida secundaria	Del -10% al +10%	No aplicable	Del -10% al +10%	No aplicable
Momento de inercia de la caja del vehículo (alrededor del eje z)	Del -10% al +10%	Del -100% al +10% ^d	Del -10% al +10%	Del -100% al +20% ^d
Coefficiente de rigidez de torsión $c_{r^x} \leq 3 \times 10^{10} \text{ kNmm}^2/\text{rad}^e$	No aplicable	Del -66% al +200%	No aplicable	Del -66% al +200%
Coefficiente de rigidez de torsión $c_{r^x} > 3 \times 10^{10} \text{ kNmm}^2/\text{rad}^e$	No aplicable	Del -50% al +A ^a	No aplicable	Del -50% al +A ^a
Tara del vehículo para vehículos con masa de tara $\geq 12 \text{ t}$ (vagones de ejes) o 16 t (vagones con bogies) ^f	No aplicable	Del -50% al +A ^a	No aplicable	Del -30% al +A ^a
Carga estática máxima (vehículos con $2Q_0 \leq 225 \text{ kN}$) ^f	No aplicable	Del -100% al +5%	No aplicable	Del -100% al +10%

Parámetros del bogie				
Empate del bogie	Del 0% al +5%	Del 0% al +10%	Del -5% al +20%	Del -10% al +20%
Diámetro nominal de la rueda	Del -10% al +15%	Del -10% al +15%	Del -10% al +15%	Del -10% al +15%
Rigidez de la suspensión vertical primaria (vehículos con dos niveles de suspensión)	Del -20% al +20%	Del 0% al +25%	Del -40% al +40%	Del 0% al +25%
Rigidez de la suspensión vertical secundaria (rigidez total en vehículos con un solo nivel de suspensión)	Del -10% al +10%	Del 0% al +25%	Del -40% al +40%	Del 0% al +25%
Cargas de transición inferiores	No aplicable	Del -5% al 0%	No aplicable	Del -5% al 0%
Guiado de ejes: rigidez	Del 0% al +10%	– ^b	Del -10% al +10%	– ^c
Guiado de ejes: amortiguación, holguras, etc.	Del -10% al +10%	– ^b	Del -10% al +10%	– ^c
Par de rotación del bogie	Del -10% al +10%	Del -20% al +20%	Del -20% al +20%	Del -20% al +20%
Momento de rotación de todo el bogie (alrededor del eje z)	Del -100% al +5%	Del -100% al +10%	Del -100% al +10%	Del -100% al +20%
Suspensión transversal secundaria (rigidez, amortiguación, holguras, etc.)	Del -10% al +10%	– ^b	Del -10% al +10%	– ^c
^a Este documento no impone limitaciones. Otras normas pueden establecer restricciones. ^b Sin exención de ensayos en línea. ^c Ensayos completos en línea necesarios. ^d Sólo vehículos de ejes. ^e Valor inicial. ^f Valor final.				

Tabla 1. Condiciones para la exención de ensayos y aplicación de los ensayos parciales de línea ($\lambda \geq 1,1$).

Ensayo parcial en línea

Los ensayos parciales de línea para ampliación de la aceptación se aplican según lo establecido para la elección del tipo de ensayo (tecnología nueva o convencional, aceptación inicial o extensión de la aceptación). La extensión de los ensayos puede reducirse a las combinaciones indicadas en las siguientes tablas:

Parámetro modificado	Rango de modificación		Zona de ensayo		
	Locomotoras Trenes automotores Coche de viajeros	Vehículos de mercancías	Vía recta y curvas muy abiertas ($I \leq 40$ mm) (1)	Curvas de radio grande (2)	Curvas de radio pequeño (3 y 4)
Parámetros de explotación					
Aumento de la velocidad máxima admisible	De 0 km/h a +10 km/h	—	vacio	vacio	—
	De +10 km/h a +20 km/h	De 0 km/h a +10 km/h	vacio cargado	vacio cargado	—

Parámetros del vehículo					
Distancia entre los centros de los bogies	Del -10% al +A ^a	Del -30% al -15% para $2a^* \geq 9$ m ^c Del -10% al -5% para $2a^* < 9$ m ^c	vacio	—	—
Distancia entre los ejes del vehículo (vehículo de 2 ejes)	No aplicable	Del -30% al -15% para $2a^* \geq 8$ m ^c Del -10% al -5% para $2a^* < 8$ m ^c	vacio	—	—
Altura del centro de gravedad – vehículo vacio	Del -40% al +40%	Del +20% al +A ^a	vacio cargado	vacio cargado	—
Altura del centro de gravedad – vehículo cargado	Del -40% al +40%	Del +50% al +A ^a	vacio cargado	vacio cargado	—
Masa no suspendida	Del -10% al +10%	No aplicable	vacio cargado	vacio cargado	—
Masa suspendida primaria (masa total si el vehículo no tiene nivel de suspensión secundario)	Del -10% al +10%	No aplicable	vacio cargado	vacio cargado	—
Masa suspendida secundaria	— ^b	No aplicable	—	—	—
Momento de inercia de la caja del vehículo (alrededor del eje z)	— ^b	Del +10% al +20% ^e	vacio	—	—
Coefficiente de rigidez de torsión $c_t^s \leq 3 \times 10^{10}$ kNmm ² /rad ^c	No aplicable	— ^b	—	—	—
Coefficiente de rigidez de torsión $c_t^s > 3 \times 10^{10}$ kNmm ² /rad ^c	No aplicable	— ^b	—	—	—
Tara para vehículos con masa de vacio ≥ 12 t (vagones a ejes) o 16 t (vagones con bogies) ^d	No aplicable	Del -30% al -15%	vacio	—	—
Carga máxima de eje (vehículos con $2Q_0 \leq 225$ kN) ^d	No aplicable	Del +5% al +10%	—	—	cargado

Parámetros del bogie					
Empate del bogie	Del -5% al 0%	Del -10% al 0%	vacio	vacio	—
	Del +5% al +20%	Del +10% al +20%	—	—	cargado
Diámetro nominal de la rueda	— ^b	— ^b	—	—	—

Parámetro modificado	Rango de modificación		Zona de ensayo		
	Locomotoras Trenes automotores Coche de viajeros	Vehículos de mercancías	Vía recta y curvas muy abiertas ($I \leq 40$ mm) (1)	Curvas de radio grande (2)	Curvas de radio pequeño (3 y 4)
Rigidez de la suspensión vertical primaria (vehículos con dos niveles de suspensión)	Del -40% al +40%	— ^b	vacio	vacio	—
Rigidez de la suspensión vertical secundaria (rigidez total en vehículos con un solo nivel de suspensión)	Del -40% al +40%	— ^b	vacio	vacio	—
Cargas de transición inferiores	No aplicable	— ^b	—	—	—
Guiado de los ejes: rigidez	Del -10% al 0%	— ^b	vacio	vacio	—
Guiado de los ejes: amortiguación, holguras, etc.	— ^b	— ^b			
Par de rotación del bogie	Del -20% al -10%	— ^b	vacio	vacio	—
	Del +10% al +20%	— ^b	—	—	cargado
Momento de inercia del bogie (alrededor del eje z)	Del +5% al +10%	Del +10% al +20%	vacio	vacio	—
Suspensión transversal secundaria (rigidez, amortiguación, holguras, etc.)	— ^b	— ^b	—	—	—

^a Esta norma no impone limitaciones. Otras normas pueden establecer restricciones.
^b No se aplican los ensayos parciales en línea.
^c Valor inicial.
^d Valor final.
^e Sólo para vehículos a ejes.

Tabla 2. Extensión de los ensayos parciales.

Los ensayos se efectúan con una inclinación de carril.

4.2.1.3. Métodos de medición.

La norma EN 14363 establece dos métodos de medición, entendiéndose como métodos de medición el tipo y el número de mediciones empleadas durante los **ensayos en línea**. Según las características del vehículo y el objeto del ensayo, se utilizan dos métodos:

*Ensayo en línea con el método de **medición normal**.*

Evalúa el comportamiento dinámico según los siguientes aspectos:

- Seguridad de circulación.
- Solicitación de vía.
- Características de marcha del vehículo.

Sobre la base de una **medición directa de las fuerzas de interacción rueda carril y aceleraciones de los órganos de rodadura y en la caja del vehículo**.

*Ensayo de línea con el método de **medición simplificado**.*

Verifica el comportamiento dinámico para la evaluación de:

- Seguridad de circulación.

- Características de marcha del vehículo.

Sobre la base de una **medición de esfuerzos transversales a las cajas de grasa y/o las aceleraciones en el bastidor del boige y en el interior de la caja del vehículo.**

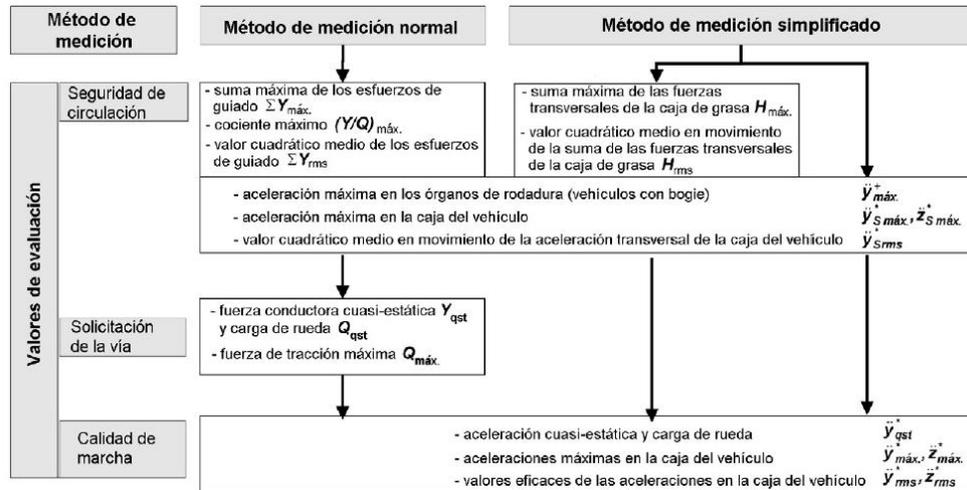


Fig. 3. Métodos de medición y valores de evaluación.

El método de medición debe establecerse a partir del diagrama de operaciones lógicas:

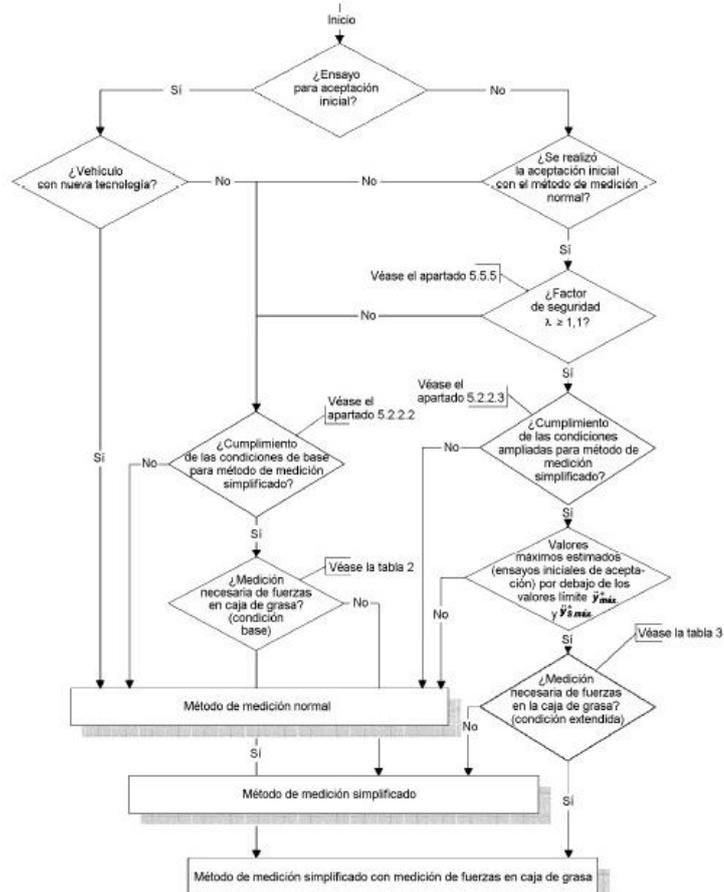


Fig. 4. Selección del método de medición.

Condiciones para el uso del **método simplificado de medida**:

- a) Carga estática de la rueda Q_0 (carga normal).
 Unidades motrices, coches de viajeros y vagones de mercancías $2Q_0 \leq 200\text{kN}$.
 Vehículos especiales $2Q_0 \leq 225\text{kN}$.
- b) Velocidad máxima admisible del vehículo.
 Locomotoras y automotores con bogies $V_{adm} \leq 160\text{km/h}$.
 Locomotoras de un solo eje $V_{adm} \leq 100\text{km/h}$.
 Unidades automotrices con masa del bogie $m^+ > 10\text{t}$, $V_{adm} \leq 160\text{km/h}$.
 Unidades automotrices con masa del bogie $m \leq 10\text{t}$, $V_{adm} \leq 200\text{km/h}$.
 Coches de viajeros (vehículos de bogies de 4 ejes) $V_{adm} \leq 200\text{km/h}$.
 Coches de viajeros trenes automotrices $V_{adm} \leq 120\text{km/h}$.
 Vagones de mercancías, vehículos especiales $V_{adm} \leq 120\text{km/h}$.
- c) Insuficiencia de peralte.
 Locomotoras, automotores, unidades automotrices, coches de viajeros $I_{adm} \leq 150\text{mm}$.
 Vagones de mercancías, vehículos especiales $I_{adm} \leq 130\text{mm}$.
 Trenes automotrices con características especiales $I_{adm} \leq 165\text{mm}$.
- d) Órganos de rodadura.
 Sólo ejes.
 Bogies con dos ejes.
 Bogies con tres ejes.

Se aplica la *medición de las fuerzas transversales de la caja de grasa* si se cumple las siguientes **condiciones base**:

Categoría de vehículo	Características de diseño	Velocidad máxima admisible del vehículo
Locomotoras	Bogies con dos ejes	$120\text{ km/h} < V_{adm} \leq 160\text{ km/h}$
	Bogies con tres ejes	$V_{adm} \leq 160\text{ km/h}$
Trenes automotrices	Masa del bogie $m^+ > 10\text{ t}$	$120\text{ km/h} < V_{adm} \leq 160\text{ km/h}$
Vehículos de mercancías	Bogie con tres ejes	$V_{adm} \leq 120\text{ km/h}$
Vehículos especiales	Bogie con más de tres ejes	$V_{adm} \leq 120\text{ km/h}$

Tabla 3. Condiciones base en las que es necesario medir las fuerzas transversales en la caja de grasa.

La Norma determina una serie de **condiciones ampliadas** en las que, siendo posible aplicar el método simplificado de medición, es necesario realizar la medición de fuerzas en las cajas de grasa en la aplicación de los **ensayos parciales** de línea para la **extensión de la aceptación** (tabla 4).

Parámetro modificado	Aplicación del método de medición simplificado		Medición de las fuerzas de la caja de grasa	
	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías
Parámetros operativos				
Aumento de la velocidad máxima admisible	De 0 km/h a +20 km/h	De 0 km/h a +20 km/h	De +10 km/h a +20 km/h	De +10 km/h a +20 km/h
Parámetros del vehículo				
Distancia entre los centros de los bogies	Del -10% al +A ^a	Del -30% al +A ^a para $2a^* \geq 9 \text{ m}^d$ Del -10% al +A ^a para $2a^* < 9 \text{ m}^d$		
Distancia entre ejes del vehículo (vehículo de 2 ejes)	No aplicable	Del -30% al +A ^a para $2a^* \geq 8 \text{ m}^d$ Del -10% al +A ^a para $2a^* < 8 \text{ m}^d$		

Parámetro modificado	Aplicación del método de medición simplificado		Medición de las fuerzas de la caja de grasa	
	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías	Locomotoras Unidades automotrices Coche de viajeros	Vehículos de mercancías
Altura del centro de gravedad – vehículo vacío	Del -40% al +40%	Del -100% al +A ^a		
Altura del centro de gravedad – vehículo cargado	Del -40% al +40%	Del -100% al +A ^a		
Masa no suspendida	Del -10% al +10%	No aplicable		
Masa suspendida primaria (masa total si el vehículo no tiene nivel de suspensión secundaria)	Del -10% al +10%	No aplicable		
Masa suspendida secundaria	Del -10% al +10%	No aplicable		
Momento de inercia de la caja del vehículo (alrededor del eje z) ^c	Del -10% al +10%	Del -100% al +20%		Del +10% al +20%
Coefficiente de rigidez de torsión $c_t^x \leq 3 \times 10^{10} \text{ kNmm}^2/\text{rad}^d$	No aplicable	Del -66% al +200%		
Coefficiente de rigidez de torsión $c_t^x > 3 \times 10^{10} \text{ kNmm}^2/\text{rad}^d$	No aplicable	Del -50% al +A ^a		
Tara del vehículo para vehículos con masa de tara $\geq 12 \text{ t}$ (vagones sin bogie) o 16 t (vagones con bogies) ^e	No aplicable	Del -30% al +A ^a		
Carga estática máxima de ruedas (vehículos con $2Q_0 \leq 225 \text{ kN}$) ^e	No aplicable	Del -100% al +10%		Del +5% al +10%

Parámetros del bogie				
Empate del bogie	Del -5% al +20%	Del -10% al +20%	Del +5% al +20%	
Diámetro nominal de la rueda	Del -10% al +15%	Del -10% al +15%		
Rigidez de la suspensión vertical primaria (vehículos con dos niveles de suspensión)	Del -40% al +40%	Del 0% al +25%		
Rigidez de la suspensión vertical secundaria (rigidez total en vehículos con un solo nivel de suspensión)	Del -40% al +40%	Del 0% al +25%		
Cargas de transición inferiores	No aplicable	Del -5% al 0%		
Guiado de los ejes: rigidez	Del -10% al +10%	- ^b		
Guiado de los ejes: amortiguación, holguras, etc.	Del -10% al +10%	- ^b		
Par de rotación del bogie	Del -20% al +20%	Del -20% al +20%	Del +10% al +20%	
Momento de rotación de todo el bogie (alrededor del eje z)	Del -100% al +10%	Del -100% al +20%		
Suspensión transversal secundaria (rigidez, amortiguación, holguras, etc.)	Del -10% al +10%	- ^b		
^a Este documento no impone limitaciones. Otras normas pueden establecer restricciones. ^b El uso del método de medición simplificado no está permitido. ^c Sólo vehículos a ejes. ^d Valor inicial. ^e Valor final.				

Tabla 4. Condiciones ampliadas para el uso del método de medición simplificado y medición de las fuerzas de la caja de grasa durante el ensayo parcial en línea.

Por lo que se establecen tres niveles de medición: Método de medición normal, método de medición simplificado y método de medición simplificado con medición de las fuerzas en las cajas de grasa (por condiciones de base o por condiciones ampliadas).

4.2.1.4. Condiciones para la ejecución de los ensayos

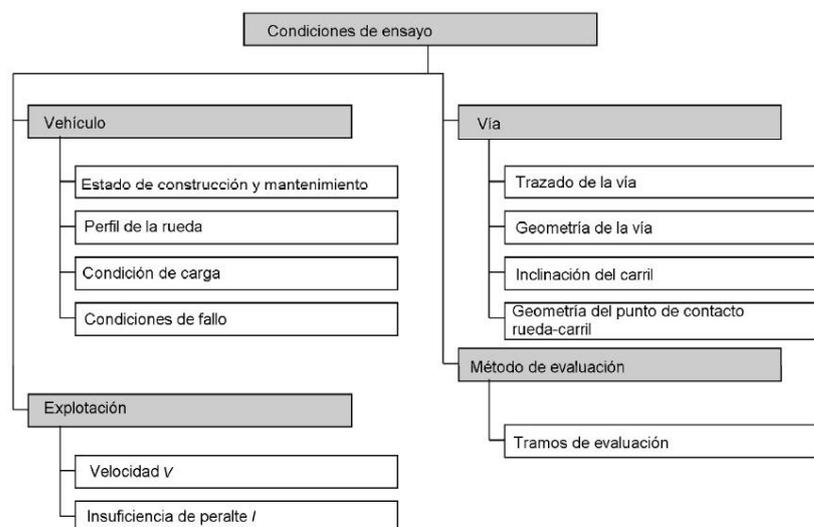


Fig. 5. Condiciones de ensayo.

La Norma establece condiciones de ensayo para:

- Vehículo.
- Vía.
- Método de evaluación.
- Explotación.

En concreto, establece requisitos para:

Zonas de ensayo.

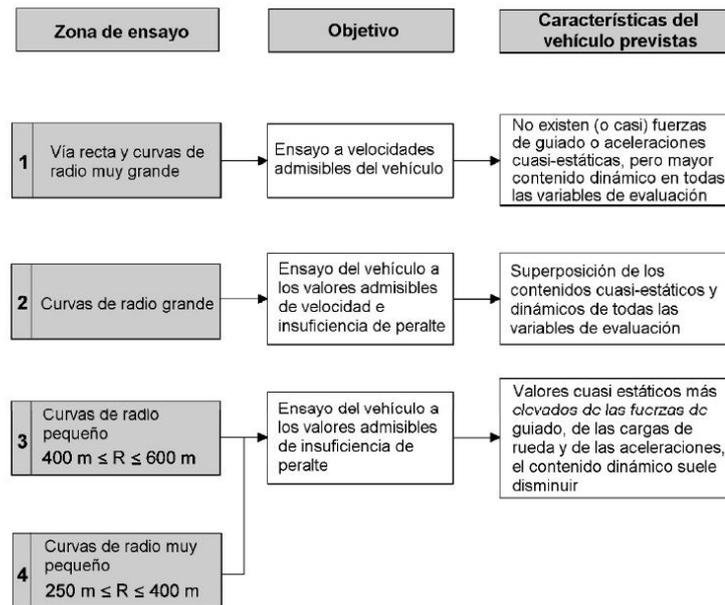


Fig. 6. Zonas de ensayo.

Vehículo ensayado.

- Elección del vehículo ensayado (aleatorio, características específicas del vehículo).
- Condiciones reales del vehículo ensayado (representatividad de la serie).
- Perfil de rueda. Conicidad.
- Condiciones de fallo.
- Condiciones de carga. Carga admisible. También ocupación parcial con distribución asimétrica.

Vías de ensayo.

- Estado real de las vías.
- Trazado de vía, respetando las zonas de ensayo.
- Inclinación de los carriles (1:20 y 1:40).
- Perfil de carril. Conicidad equivalente.
- Geometría de las vías. Desviaciones de medidas de la geometría y niveles de calidad de la geometría.
- Estado de carril. Condiciones de tiempo seco.

Tramos de vía.

Un tramo de vía es una parte de una vía de ensayo.

- Trazado.
- Longitud.
- Velocidad máxima admisible para el vehículo V_{adm} .
- Insuficiencia de peralte. Determina la velocidad en las zonas de ensayo.

Ensayo (parámetros).

- Velocidad significativa del ensayo es la velocidad máxima admisible del vehículo.
- Insuficiencia de peralte.

4.2.2. Enfoque de la normativa rusa

La norma GOST R 55496 define como ensayos en vía *“los ensayos que se realizan en vías magistrales en explotación con realización de velocidades y modos diferentes de movimiento con objetivo de determinar los valores de control.”*

El apéndice A de la Norma especifica la metodología de ensayos en vía del material autopropulsado y de los ensayos estáticos del bogie, en el punto A.2. establece los métodos y condiciones de ensayo.

Los ensayos en vía se realizan en las pruebas del material autopropulsado en vías magistrales de explotación cumpliendo con los requisitos de las condiciones de ensayo (viajes de prueba), en los cuales se registran los procesos dinámicos mediante las sensores para determinar los valores I_{dhor} , I_{d1} , I_{d2} , λ , W_z , W_y . En puntos posteriores se detallará el significado y naturaleza de estos índices.

4.2.2.1. Método de ensayo

Para cada grupo de medición, la Norma establece los siguientes modos y velocidades:

- Circulación en marcha directa y marcha atrás.
- Arranque y aceleración hasta la velocidad máxima (si es posible en un tramo recto) con registro continuo del proceso.
- Circulación con velocidad establecida. Alcance obligatorio de la velocidad máxima.
- Frenado completo utilizando todos los tipos de frenado previstos en la construcción del material autopropulsado.
- Procesos de transición (por ejemplo, tracción – quitar tracción – carrera) para velocidades diferentes.
- Circulación del material autopropulsado en los tramos rectos, en curvas y en tramos con cambio de aguja.

4.2.2.2. Condiciones para la ejecución de los ensayos

Vías

Los ensayos en vía del material autopropulsado se realizan en las siguientes condiciones:

- En las vías magistrales con longitud no menor de 150 km.
- En las vías con las calificaciones “satisfactorio”, “bien” y “sobresaliente” de acuerdo con la normativa N CP-515 para una velocidad del material autopropulsado $V \leq 200$ km/h.
- En las vías con la calificación “bien” y “sobresaliente” de acuerdo con la normativa N CP-515 y para velocidad del material autopropulsado $V > 200$ km/h. Los ensayos del material autopropulsado con V_k (velocidad máxima de construcción) > 200 km/h no se realizan en las vías con calificación “satisfactorio” si la tarea técnica o la condición técnica del material autopropulsado establece que su explotación es posible sólo en las vías calificadas con “bien” o “sobresaliente”.

La normativa rusa establece una clasificación de calidades de vía en función de los niveles medidas en las mismas en cuanto a:

- Nivelación.
- Alabeo.
- Anchura.
- Alineación.

Clasificando en función del cumplimiento con los parámetros anteriores y defectos encontrados en insatisfactorio, satisfactorio, bien y sobresaliente o excelente según N CP-515 de 14 de octubre de 1997 del Ministerio de Ferrocarriles de Rusia.

Velocidades

- Velocidades del material autopropulsado a ensayar de $V=0$ a $V=V_k$ (velocidad máxima de construcción).
- La determinación de los valores I_{dhor} , I_{d1} , I_{d2} , λ se efectúa en base de los datos de pruebas registrados en movimiento del material autopropulsado con velocidades diferentes de $V=0$ a $V=V_k$.
- La definición de los valores de suavidad de marcha W_z y W_y se realiza para las velocidades con valores determinados a partir de la mitad de la velocidad máxima hasta la velocidad máxima con el paso de 10 a 22 km/h (25 km/h si la velocidad máxima es más de 200 km/h).

Condiciones de ensayo

- Condiciones climáticas según GOST 15150.
- Condiciones de carga: vacío y cargado.

4.2.3. Comparativa de la normativa europea y rusa en ensayos.

A la vista de lo expuesto en los anteriores apartados y a modo de resumen:

GOST R 55496-2013	EN 14363:2005
<p>Método de ensayo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tracción, carrera y frenado. • Circulación en tramos rectos, en curvas y en tramos con cambio de aguja • Circulación en marcha directa y marcha atrás 	<p>Método de ensayo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de parada • Ensayos de vía, utilizando métodos de medida normal y simplificado
<p>Ejecución de ensayos. Vías</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longitud definida ≥ 150km. • Clasificación de vías en función de defectos. 	<p>Ejecución de ensayos. Vías</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zonas de ensayo. • Vías de ensayo. • Tramos de vía (longitudes definidas).
<p>Ejecución de ensayos. Velocidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determina rangos de velocidades para medir los valores indicados. Hasta V_{max} del vehículo 	<p>Ejecución de ensayos. Velocidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Velocidades determinadas por el vehículo y por la insuficiencia de peralte.
<p>Ejecución de ensayos. Condiciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones climáticas según GOST 15150 • Condiciones de carga: vacío y cargado. 	<p>Ejecución de ensayos. Condiciones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones climatológicas brevemente indicadas en estado del carril como ‘‘tiempo seco’’. • Condiciones de carga admisible. • Condición de carga más desfavorable a determinar. (distribución asimétrica). • Condiciones de carga en vacío en ensayos parciales en algunas áreas

Tabla 5. Comparativa de ensayos GOST R-EN.

En la norma EN 14363 se establecen ensayos en parada y ensayos en línea, y dentro de estos últimos, se especifica dos niveles de ensayo, completo y parcial, y dos métodos de medida, medición normal y medición simplificada.

Los ensayos indicados en la norma rusa para la determinación de I_{dhor} , I_{d1} , I_{d2} , λ , W_z y W_y se realizan para estados vacío y cargado, en movimiento marcha directa y marcha atrás. La Norma GOST R busca la realización de los ensayos en todos los estados del vehículo y todas las combinaciones de condiciones de ensayo, por lo que se podrían asemejar o equipararse a los ensayos completos en línea de la Norma EN.

4.3. Seguridad en circulación

Inicialmente se realizarán una serie de consideraciones en cuanto a la seguridad en la circulación, exponiendo los índices o parámetros más habituales en la bibliografía relacionada para, posteriormente, analizar el enfoque de cada una de las normativas que se comparan y la relación entre los parámetros o variables en los que dichas normativas centran su atención para determinar si los vehículos ferroviarios pueden ser considerados seguros en la circulación.

4.3.1. Estabilidad en dinámica ferroviaria

4.3.1.1. Velocidad crítica.

Partiendo de un modelado del eje que incorpore el microdeslizamiento entre rueda y carril para el entendimiento de la inestabilidad y realizando posteriormente el estudio de inestabilidad para el vehículo ferroviario completo, se llega a que la ecuación que define el movimiento es:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0$$

En la matriz C se consideran los amortiguadores dentro del modelo de vehículo ferroviario y la K los resortes, siendo M las masas y momentos de inercia. La solución de ecuación diferencial anterior es del tipo:

$$x = Xe^{\lambda t}$$

Sustituyendo el conjunto de soluciones de la ecuación diferencial:

$$\lambda^2 M + \lambda C + KXe^{\lambda t} = 0$$

Puesto que $e^{\lambda t}$ nunca es cero, X puede que no sea cero, para que se cumpla en todas las ocasiones la ecuación anterior debe verificarse que:

$$\lambda^2 M + \lambda C + K = 0$$

Obteniéndose un conjunto de $2n$ raíces complejas λ_j por parejas conjugadas, siendo n el número de grados de libertad del sistema. Los valores λ_j dependen de la velocidad del vehículo, teniendo cada uno de ellos asociados un modo de vibración X_j . La respuesta del sistema será la combinación lineal de cada una de las soluciones calculadas, es decir:

$$x = \sum_{j=1}^{2n} X_j e^{\lambda t}$$

Según esta expresión, si al menos una raíz λ_j fuera su parte real positiva, la respuesta no convergería a cero, por lo que el sistema sería inestable.

Se pueden calcular, para diferentes valores de la velocidad del vehículo, la ecuación del movimiento y las correspondientes raíces. Uno de los valores propios evoluciona con la velocidad de una forma característica. Corresponde al modo de oscilación cinemática del eje, y su seguimiento permite calcular la velocidad crítica.

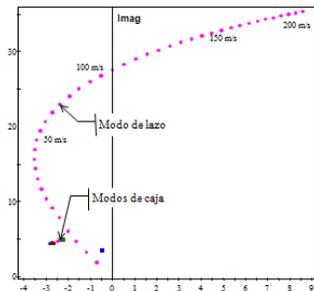


Fig. 7. Evolución del modo de oscilación del eje

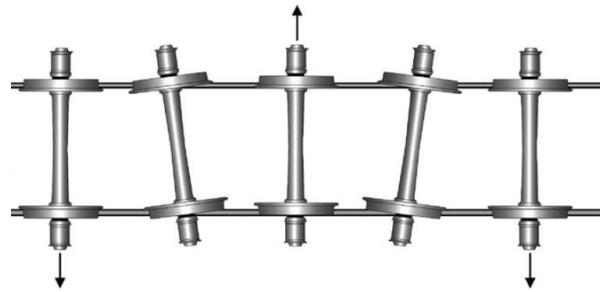


Fig. 8. Oscilación del eje

A baja velocidad la parte real de este valor, así como el resto de raíces, son negativas, por lo que la respuesta se deduce estable. A partir de un valor de la velocidad asociada al modo de lazo se hace positiva y el sistema es inestable. La velocidad para la cual la raíz tiene parte real nula será la velocidad crítica.

4.3.1.2. Influencia de la geometría contacto carril.

La conicidad es uno de los parámetros que más influyen en la estabilidad. Un aumento de conicidad en la rueda, produce un efecto desestabilizante. No obstante, es necesario aclarar que una elevada conicidad proporciona un efecto positivo en el guiado en curva.

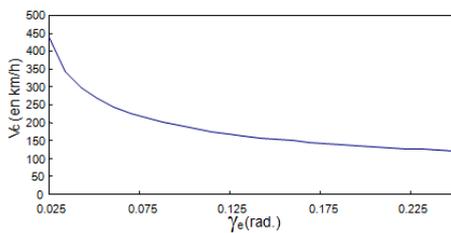


Fig. 9. Influencia de la conicidad sobre la velocidad crítica.

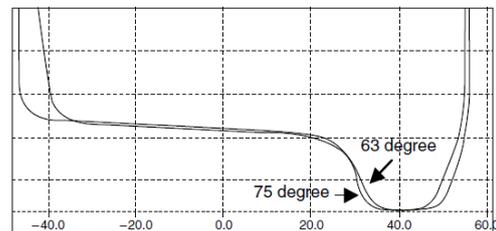


Fig. 10. Conicidad.

Se ha demostrado que las ruedas con baja conicidad tienen un mayor riesgo de descarrilamiento por remonte de pestaña.

4.3.2. **Criterios de seguridad en curva.**

Los criterios fundamentales para el estudio de la seguridad en curva son:

4.3.2.1. Criterio de descarrilo de Nadal.

El riesgo de descarrilo de un vehículo ferroviario viene definido por el criterio de Nadal, que se basa en el establecimiento del equilibrio de fuerzas en el momento en el que se inicia el remonte de pestaña.

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\text{tag } \delta - \mu}{1 + \mu \text{tag} \delta}$$

El ángulo de pestaña y el rozamiento determinan el cociente entre la fuerza de guiado y la carga de rueda (Y/Q).

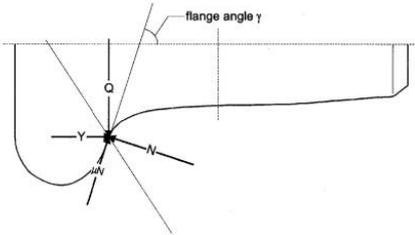


Fig. 11. Fuerzas en la pestaña.

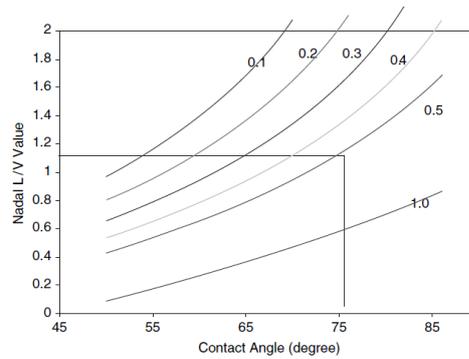


Fig. 12. Relación límite L/V con el ángulo de contacto.

El criterio de Nadal es una buena aproximación para ángulos positivos elevados de ataque ($\alpha \geq 0,5^\circ$), es decir, con una fuerza de direccionamiento elevada. Sin embargo, para ángulos pequeños o negativos de ataque, el criterio de Nadal es muy conservador.

4.3.2.2. Criterio de descarrilo de Weinstock.

Este criterio predice descarrilamiento incipiente sumando los valores absolutos de Y/Q en las dos ruedas en el mismo eje, conocida como la relación de "suma eje Y/Q". La relación Y/Q en la rueda, la que se inicia el remonte de pestaña, se evalúa usando el Ecuación Nadal, y para la relación Y/Q de la rueda contraria se utiliza, para su evaluación, el coeficiente de fricción entre la rueda y el carril.

$$\left(\sum \frac{Y}{Q}\right) \leq \left(\frac{Y}{Q}\right)_{lim} + \mu = \frac{\text{tan} \delta - \mu}{1 + \mu \text{tan} \delta} + \mu = \frac{\text{tan} \delta (1 + \mu^2)}{1 + \mu \text{tan} \delta}$$

Si el coeficiente de fricción en la rueda interior se aproxima a cero, el criterio de Weinstock converge con el de Nadal, ya que no hay contribución de valor Y/Q de la rueda interior en ese caso.

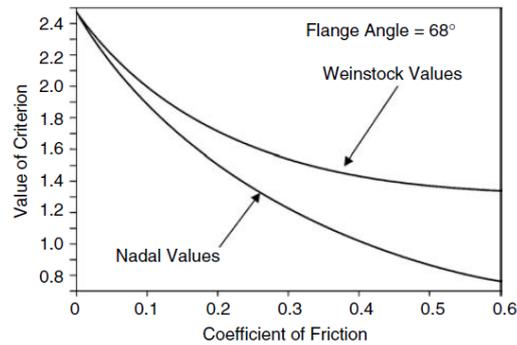


Fig. 13. Comparativa criterio de Nadal y Weinstock.

El criterio de Weinstock es más preciso que el criterio de Nadal y es menos sensible a errores o variaciones en el coeficiente de fricción, como se ve en la figura anterior, que compara ambos criterios en función de la variación del coeficiente de fricción en la rueda - carril.

4.3.2.3. Criterio de descarrilo basado en la duración del valor admisible de Y/Q para el remonte de pestaña.

Diversas investigaciones sugirieron que con una duración de empuje lateral de menos de 50 msec, el valor permisible del criterio de Y/Q puede aumentarse, como puede verse en el ejemplo siguiente:

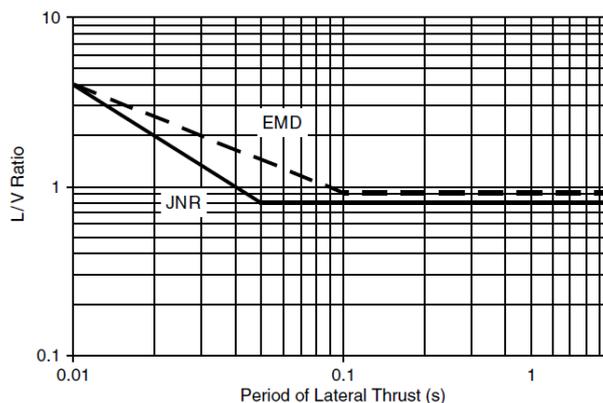


Fig. 14. Criterio de duración.

*EMD: Criterio propuesto por Electromotive Division of General Motors.

*JNR: Criterio propuesto por Japanese National Railway.

4.3.2.4. Criterio de descarrilo basado en la distancia recorrida con un valor admisible de L/V para el remonte de pestaña.

Se basa en la distancia máxima que el límite Y/Q puede ser excedido sin riesgo de descarrilamiento por remonte de pestaña. Los criterios desarrollados se basan en ensayos. Estos criterios tienen en cuenta el ángulo de ataque, como se indica en el siguiente ejemplo:

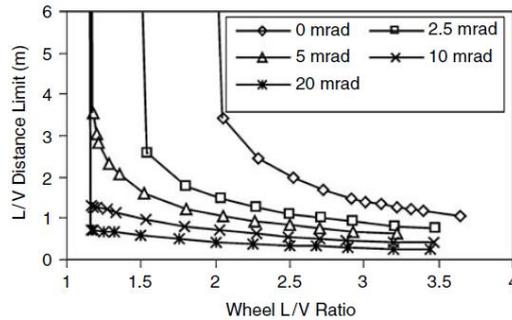


Fig. 15. Criterio por distancia.

4.3.2.5. Criterio de descarga de rueda.

Partiendo del criterio de Nadal se establece otro criterio de descarrilamiento basado en la descarga máxima admisible de las ruedas. La situación más desfavorable para este criterio consiste en una curva con exceso de peralte y al mismo tiempo alabeo de la vía, lo que puede descargar la rueda de ataque del vehículo.

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{1 - \mu^2 \tan \delta - 2\mu + 2\theta + \mu \tan \delta}{1 + \mu^2 \tan \delta}$$

4.3.2.6. Límite de ripado.

Las fuerzas laterales pueden producir un desplazamiento lateral de la vía permanente. Este fenómeno se puede dar en recta cuando el vehículo alcanza su velocidad crítica o en curva por efecto de la fuerza centrífuga. El ripado se produce al superar el límite de Prud'homme.

$$Y_{lim} = k \left(10 + \frac{2Q_0}{3} \right)$$

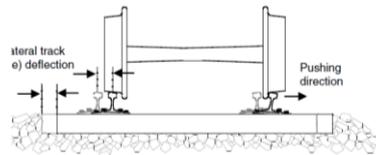


Fig. 16. Fuerza lateral. Ripado de vía.

Siendo k un factor que depende del tipo de vehículo ferroviario (locomotora, automotor, etc.).

4.3.3. **EN 14363. Seguridad en circulación.**

Conocidos los aspectos fundamentales para la seguridad en circulación, este punto se centra en el análisis del enfoque que realiza la EN 14363:2005. La Norma establece una estructura de los elementos de ensayo (ver fig. 1).

Ensayos de aprobación preliminar o ensayos en parada.

Los ensayos de aprobación preliminar tienen por objeto evaluar la capacidad de los vehículos de operar en condiciones límites de geometría y trazado de vía. Por lo general, los ensayos preliminares de homologación son estáticos y/o cuasiestáticos. Estos ensayos deberían efectuarse con anterioridad a los ensayos de línea.

El punto 4 de la norma EN 14363 describe los ensayos de parada, éstos incluyen aspectos relacionados con la seguridad en circulación:

4.3.3.1. Seguridad contra el descarrilamiento en vehículos ferroviarios que circulan por vías en curva.

Los ensayos de este tipo tienen por objeto garantizar que los vehículos pueden circular con seguridad por vías en curva. En estos ensayos se tienen en cuenta las deformaciones en vías de ferrocarril que provienen de las transiciones entre vía horizontal y vía inclinada o defectos de nivelación transversal. Existen tres métodos de ensayo, para los cuales se definen unos valores límite.

I) Vía de ensayo con curvas.

Se realiza la medición de la resistencia contra el descarrilamiento durante el funcionamiento en una vía de ensayo con curvas. Los valores límite que se establecen son:

Se considera que un vehículo es resistente al descarrilamiento si se cumple

$$(Y/Q)_{a,max} \leq \left(\frac{Y}{Q}\right)_{lim} = 1,2$$

Este valor es válido para 70° de ángulo de pestaña y $\mu=0,36$. En caso de que los valores no sean estos, se aplica:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\text{tag } \delta - \mu}{1 + \mu \text{tag } \delta}$$

Se toma $\mu=0,36$ (coeficiente de rozamiento).

En caso de que se supere el límite establecido se permite revisar la condición:

$$\Delta z_{max} \leq \Delta z_{lim} = 5mm$$

Si se cumple con la expresión anterior, significa que el vehículo no ha descarrilado, aunque deben cumplirse las siguientes condiciones:

- El ángulo de pestaña δ no es superior a 70° en ningún punto del perfil.
- La pestaña exterior está seca y no tiene lubricación residual.
- El ensayo se repite tres veces y se tiene que cumplir la condición.

Como se puede ver en estos ensayos preliminares, se basan claramente en criterios de descarrilo.

II) Banco para ensayos de deformación y vía de ensayo sin desniveles

Los valores límites en este método son los mismos que en el caso anterior.

III) Ensayo en banco de ensayo de deformación y de guiñada.

En este método se combina el ensayo en laboratorio de descarga de la rueda y de rotación del bogie. Este ensayo se puede aplicar a vehículos de tecnología convencional con dos bogies con dos ejes, por vehículo y ángulos de pestaña de las ruedas entre 68° y 70°.

Los valores límite son:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} \leq 0,6$$

Q_0 es la carga media de la rueda para el eje sometido a ensayo en vía horizontal.

ΔQ es la variación de Q_0 en la condición de deformación máxima.

Se define el factor X de resistencia de rotación del bogie como:

$$X = \frac{M_{z,Rmin}}{2a^+ + 2Q_0}$$

$M_{z,Rmin}$ es el par necesario para girar el bogie en relación a la caja.

$2a^+$ es el empate del bogie.

Q_0 es la carga media de la rueda para el eje sometido a ensayo en vía horizontal.

$X \leq 0,1$ en vehículos de viajeros y locomotoras.

Ensayos en línea.

Los ensayos en línea se efectúan en tramos de vía seleccionados y cortos, que presentan características de trazado específicas. Permiten evaluar el *comportamiento dinámico del vehículo* en el rango estipulado de velocidad e insuficiencia de peralte.

Los parámetros que se emplean en la evaluación del comportamiento dinámico son:

- Fuerzas de interacción entre rueda y carril, o bien:
- Fuerzas transversales entre el eje y la caja de grasa (fuerzas transversales de la caja de grasa).
- Aceleraciones.

Los índices o parámetros establecidos en los ensayos en línea relativos a seguridad de circulación, son los siguientes:

4.3.3.2. Suma de las fuerzas directrices de guiado.

La suma de fuerzas directrices de guiado se representa como $\sum Y_{max}$

El valor límite crítico de seguridad contra el ripado de vía es:

$$\sum Y_{max,lim} = k_1 \left(10 + \frac{2Q_0}{3} \right)$$

k_1 es un factor que depende del tipo de vehículo ferroviario (locomotora, automotor, etc.)

4.3.3.3. Coeficiente entre la fuerza de guiado y la carga de rueda.

El límite crítico de seguridad para el coeficiente de una rueda de guiado conductora es el siguiente:

$$(Y/Q)_{max,lim} = 0,8$$

4.3.3.4. Suma de las fuerzas transversales de la caja de grasa.

Este valor límite sólo se emplea en el método de medición simplificado.

$$H_{max,lim} = k_1 \left(10 + 2 \frac{Q_0}{3} \right)$$

k_1 es un factor que depende del tipo de vehículo ferroviario (locomotora, automotor, etc.)

4.3.3.5. Aceleración máxima del bogie.

La aplicación de esta variable de evaluación sólo es de aplicación en el método de medición simplificado cuando se realiza la medición de las fuerzas transversales de la caja de grasa.

$$\ddot{y}_{max,lim}^+ = 12 - \frac{m^+}{5}$$

m^+ masa del bogie (incluyendo todas las partes, ejes, etc.)

Para los **ensayos parciales** con el método de medición simplificado, el valor límite se calcula como:

$$\ddot{y}_{max,lim,simp}^+ = \max(Y(PA)_{max,normal}) + \frac{\ddot{y}_{max,lim}^+ - \max(Y(PA)_{max,normal})}{3}$$

Donde $\max(Y(PA)_{max,normal})$ es el mayor valor máximo previsto de todas las condiciones de ensayo durante el ensayo inicial completo.

4.3.3.6. Aceleraciones máximas en la caja del vehículo.

Medida de las aceleraciones máximas en la caja del vehículo $\ddot{y}_S^*_{max,lim}$ y $\ddot{z}_S^*_{max,lim}$

En los ensayos parciales con el método de medición simplificado:

$$\ddot{y}_{S,max,lim,simp}^* = \max(Y(PA)_{max,normal}) + \frac{\ddot{y}_{S,max,lim}^* - \max(Y(PA)_{max,normal})}{3}$$

Donde $\max(Y(PA)_{max,normal})$ es el mayor valor máximo previsto de todas las condiciones de ensayo durante el ensayo inicial completo.

Vehículo, condiciones de ensayo		Valores límite para aceleraciones en la caja de vehículo en m/s ²	
		$\ddot{y}_{S,max,lim}^*$	$\ddot{z}_{S,max,lim}^*$
Locomotoras, automotores, trenes automotrices y coches de viajeros	Nivel de suspensión simple o condición de suspensión neumática desinflada		5
	Nivel de suspensión doble		3
	Zonas de ensayo 1 y 2	3	
	Vía recta, curvas de radio amplio		
	Zona de ensayo 3	2,8	
	Curvas de radio pequeño		
Zona 4	2,6		
Curvas de radio muy pequeño			
Vagones de mercancías cargados y vehículos especiales			5
Vagones de mercancías vacíos			5 ^b
Vagones de mercancías, vehículos especiales con bogies		3	
Vagones de mercancías, vehículos especiales a ejes	$2 Q_0 < 60 \text{ kN}$	4	
	$60 \text{ kN} \leq 2 Q_0 \leq 200 \text{ kN}$	$4,43 - 2Q_0 / 140^a$	
	$20 Q_0 > 200 \text{ kN}$	3	

^a Fuerza estática del eje $2 Q_0$ en kN.

^b Se sabe que este valor límite supone un problema para vehículos de mercancías vacíos en las zonas de ensayo 1 y 2. En la actualidad, la UIC está revisándolo. Se pueden permitir desviaciones de este valor límite bajo mutuo acuerdo.

Tabla 6. Valores límite para aceleraciones máximas en la caja del vehículo.

4.3.3.7. Criterio de inestabilidad.

Vehículos a ejes.

- *Método de medición normal.*

$$\text{Suma de fuerzas de guiado } \Sigma Y_{rms,lim} = \frac{\Sigma Y_{max,lim}}{2}$$

Método de medición simplificado.

$$\text{Suma de fuerzas transversales de la caja de grasa } H_{rms,lim} = \frac{H_{max,lim}}{2}$$

- *Método de medición simplificado.*

Sin medición de fuerzas transversales de la caja de grasa, aceleración en el eje

$$\ddot{y}_{rms,lim} = 5m/s^2$$

Vehículos con bogies

- *Método de medición normal.*

$$\text{Suma de fuerzas de guiado } \Sigma Y_{rms,lim} = \frac{\Sigma Y_{max,lim}}{2}$$

- *Método de medición simplificado.*

$$\text{Suma de fuerzas transversales de la caja de grasa } H_{rms,lim} = \frac{H_{max,lim}}{2}$$

- *Método de medición simplificado.*

Sin medición de fuerzas transversales de la caja de grasa, aceleraciones en el bastidor del bogie

$$\ddot{y}_{rms,lim}^+ = \frac{\ddot{y}_{max,lim}^+}{2}$$

En función de los casos anteriores, los criterios de inestabilidad se basan en:

- valores cuadráticos medios (rms) de fuerzas de guiado.
- valores cuadráticos medios de las fuerzas aplicadas en las cajas de grasa.
- valores cuadráticos medios de las aceleraciones que se producen en el eje o en el bogie.

4.3.4. Conclusiones relativas a la seguridad en circulación de la Norma EN 14363.

Los aspectos relativos a la seguridad en circulación abordados por la Norma son:

Estabilidad en dinámica ferroviaria	EN 14363
Estabilidad	Valores de fuerzas de guiado transversal (Y) o suma de fuerzas transversales en las cajas de grasa H_j

Tabla 7. Principales aspectos tratados en cuanto a estabilidad dinámica por la EN.

Criterios de seguridad en curva	EN 14363
Criterio de descarrilo.	Coeficiente entre la fuerza de guiado y la carga de rueda. (Y/Q). Criterio de Nadal.
Límite de ripado.	Suma de fuerzas directrices de guiado (Límite de Prud'homme). Suma de fuerzas transversales en la caja de grasa. (Método simplificado).
Criterio de descarga de rueda	Ratio de descarga $\Delta Q/Q_0$.

Tabla 8. Principales aspectos tratados en cuanto seguridad en curva de la Norma EN.

En las tablas anteriores se ha mostrado un resumen de los aspectos tratados de la norma EN 14363 en cuanto a seguridad en circulación en las vertientes de estabilidad dinámica y criterios de seguridad en curva.

4.3.5. GOST R 55496 / GOST R 55495. Seguridad en circulación.

En ambas normas se tratan los diferentes indicadores de dinámica para determinar la seguridad en circulación:

I_{dhor} : Indicador de dinámica horizontal.

λ : Factor de seguridad de estabilidad contra el descarrilamiento.

4.3.5.1. Indicador de dinámica horizontal I_{dhor} .

A continuación se describe lo que establecen las normas rusas sobre este indicador dinámico para conocer cuál es su naturaleza y relacionarlo con los conceptos básicos de seguridad en la circulación.

4.3.5.1.1. Método de cálculo.

El método de cálculo del I_{dhor} queda establecido en la norma GOST R 55495, se define como *la relación de la componente dinámica de la fuerza lateral en el bastidor del bogie Y_b^{din} y el valor de la carga estática vertical máxima axial $P_{est_ax_bruto}$*

$$I_{dhor} = \frac{Y_b^{din}}{P_{est_ax_bruto}}$$

El valor de la componente dinámica de la fuerza del bastidor se determina excluyendo la componente cuasiestática del proceso dinámico de las fuerzas laterales en el bastidor Y_b mediante un filtro matemático. La frecuencia que separa la componente cuasiestática de la componente dinámica no podrá superar el 80% de la menor frecuencia propia de las oscilaciones del coche con suspensión de resorte.

Para obtener el valor se toma la media aritmética de tres amplitudes máximas, exceptuando las amplitudes obtenidas de la circulación del coche por los tramos con cambios de agujas. Las amplitudes máximas de las componentes dinámicas de las fuerzas laterales en el bastidor se determinan como la mitad del valor del rango que se obtiene procesando los procesos dinámicos con el método Rainflow o con el método de los ciclos completos conforme con la GOST 25.101.

El valor se determina para el coche en vacío y con carga. En la etapa de diseño, para hallar $P_{est_ax_bruto}$, en el cálculo se consideran las cargas de diseño y durante los ensayos se consideran las cargas estáticas reales del coche en vacío, es decir, las que se obtienen en el proceso de pesaje por rueda.

En el proceso de diseño, el cálculo y la evaluación del I_{dhor} se realizan para todos los ejes del coche.

4.3.5.1.2. Método de ensayo.

En el apéndice A, el punto A.2.4.1 de la norma GOST R 55496, establece la metodología de ensayo para determinar el indicador I_{dhor} . En los ensayos en vía, para determinar el valor I_{dhor} , se registra el proceso dinámico del parámetro que sirve como base para la transición al valor de la fuerza lateral del bastidor (Y_b). Este parámetro es el desplazamiento de la caja de grasa del par de rueda respecto al bastidor del bogie en dirección horizontal transversal (Δy) o la tensión en el elemento de construcción en la rodadura σ (por ejemplo, en la rueda de un par de ruedas).

La transición del parámetro Δy o σ al valor de la fuerza de bastidor Y , se efectúa utilizando la relación $Y_b = f(\Delta y)$ o $Y_b = f(\sigma)$. Para determinar esta relación se utilizan los datos (de cálculos o de prueba) del fabricante. El sensor para la determinación de las fuerzas de bastidor se instala en los elementos del bastidor, de tal manera que se excluye la influencia de las fuerzas verticales y longitudinales.

El punto A.2.8. describe el procedimiento para determinar la relación $Y_b = f(\Delta y)$ o $Y_b = f(\sigma)$. El método consiste en aplicar una carga lateral mientras se registra el valor de tal carga (mediante un sensor de fuerza) y de los Δy y σ (mediante sensor de deformación). El valor máximo de la carga lateral aplicada no tiene que superar 30% de $P_{est_ax_bruto}$ (calculado por un eje). Los ciclos de la aplicación al bogie lateral se repiten tres veces. Como relación $Y_b = f(\Delta y)$ o $Y_b = f(\sigma)$ utilizada para determinar la fuerza lateral del bastidor se recoge el valor obtenido en base de las medias aritméticas de los valores de los tres ciclos de carga del bogie.

La norma GOST R 55495-2013 establece el valor límite para I_{dhor} de 0,30.

4.3.5.2. Factor de seguridad contra el descarrilamiento λ .

$$\lambda = \frac{C_1}{Y_b l + C_2 \mu^{ID} (1 + 0.5 \mu^{ED} \sin 2\beta) + C_1 \mu^{ED} \cos^2 \beta} * \frac{1}{ctg \beta + \mu^{ED}}$$

$$C_1 = 2Q(b - a_2) - P_{Z1-ED}(l + a_1) + P_{Z1-ID}a_2 + Y_b r + q_{NS}(b - a_2)$$

$$C_2 = 2Q(b - a_1) - P_{Z1-ID}(l + a_2) + P_{Z1-ED}a_1 + Y_b r + q_{NS}(b - a_1)$$

μ^{ED} es el coeficiente de fricción entre la pestaña de la rueda exterior delantera y el carril.

μ^{IR} es el coeficiente de fricción entre la banda de rodadura de la rueda interior delantera y el carril.

β , ángulo de inclinación de la generatriz de la pestaña de la rueda en relación al plano horizontal.

Y_b , fuerza en el bastidor (teniendo en cuenta la componente cuasiestática) que actúa sobre el eje montado del lado de las masas suspendidas, kN.

Q , peso de la parte suspendida del coche (contando con el estado correspondiente de la carga del coche) que actúa sobre la mangueta del eje montado, kN.

Q_{NS} , peso de las partes no suspendidas del coche que actúa sobre el eje montado, kN.

P_{Z1-ED} y P_{Z1-ID} , fuerzas dinámicas verticales de la suspensión primaria (considerando las componentes cuasiestáticas) en la rueda exterior delantera y la rueda interior delantera, respectivamente, kN. En caso de disminuir la carga sobre la mangueta del eje del par montado respecto a la estática, P_{Z1-ED} y P_{Z1-ID} se considerarán positivas.

$2b$, distancia entre los puntos de aplicación de las cargas verticales a las manguetas del eje del par montado, m.

a_1 , distancia transversal entre el punto de aplicación de la carga vertical a la mangueta del eje de la rueda exterior delantera y el punto de contacto en la pestaña de la rueda, m.

a_2 , distancia transversal entre el punto de aplicación de la carga vertical a la mangueta del eje de la rueda delantera interior y el punto de contacto en la banda de rodadura de la rueda, m.

r , radio de la rueda, medido por el círculo de rodadura, m.

l , distancia entre los puntos de contacto con los carriles de la rueda exterior delantera y la rueda interior delantera, m.

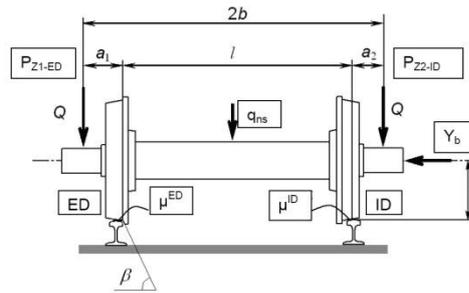


Fig. 17. Fuerzas sobre el eje.

4.3.5.2.1. Método de cálculo.

El procesamiento de los datos que determinan los valores P_{Z1-ED} , P_{Z1-ID} y Y_b utilizados para calcular el coeficiente λ , se realiza con los **valores instantáneos** tomados en un momento de tiempo.

Para establecer el valor de λ se toma **el menor de los valores calculados** (para cada eje montado sometido al control y para cada uno de los estados de carga del coche). Debe ser $\lambda \geq 1,40$ para garantizar la seguridad.

En el proceso de diseño la evaluación del índice se realiza para todos los ejes montados del coche.

4.3.5.2.2. Método de ensayo

En los ensayos de vía para establecer λ , en el par de ruedas controlado, se registran los procesos para determinar las fuerzas P_{Z1-ED} , P_{Z1-ID} y Y_b , tal y como se describen para I_{dhor} e I_{d1} .

Este factor de seguridad tiene en cuenta: las fuerzas (dinámicas y estáticas, horizontales y verticales), los coeficientes de fricción y la geometría de la rueda.

El control del índice λ se realiza para el estado del coche en vacío y con carga.

4.3.6. Conclusiones relativas a la seguridad de circulación de las Normas GOST R 55495 y GOST R 55496

Estabilidad en dinámica ferroviaria	GOST R 55495	GOST R 55496
Estabilidad.	I_{dhor}	I_{dhor}

Tabla 9. Principales aspectos tratados en cuanto a estabilidad dinámica por GOST R.

Criterios de seguridad en curva	GOST R 55495	GOST R 55496
Criterio de descarrilo	λ	λ
Límite de ripado.	I_{dhor}	I_{dhor}
Criterio de descarga de rueda	No tratado	No tratado

Tabla 10. Principales aspectos tratados en cuanto seguridad en curva por GOST R.

Las normas rusas establecen criterios de estabilidad, descarrilo y límites de ripado al igual que la norma EN. A diferencia de la norma EN, no abordan criterios de descarga de la rueda.

4.3.7. Seguridad en circulación. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.

En ambas Normas se aplican criterios de inestabilidad, ripado de vía y descarrilo:

4.3.7.1. Criterios de inestabilidad.

Según lo indicado anteriormente, los criterios relativos a inestabilidad de la norma EN, en función del tipo de ensayo y el método de medición utilizado, se basan en lo siguiente:

- Suma de los valores cuadráticos medios de las fuerzas de guiado en la dirección transversal $\sum Y_{rms}$,
- Suma de los valores cuadráticos medios de las fuerzas transversales en las cajas de grasa H_{rms} ,
- Valor cuadrático medio de las aceleraciones en el bastidor del bogie \ddot{y}_{rms}^+ ,
- Valor cuadrático medio de las aceleraciones en el eje \ddot{y}_{rms}

El parámetro o índice de las normas GOST R que puede ser comparable a los dos primeros, $\sum Y_{rms}$ y H_{rms} , sería el I_{dhor} , ya que se basa en la medida de la componente dinámica transversal Y_b^{din} .

Realizando la comparativa para la estabilidad en recta, se cumple que $Y_b^{din} = H$, ya que la componente cuasi-estática es nula en recta. Por lo que aplicando la definición del índice de dinámica horizontal de la Norma GOST R:

$$I_{dhor} = \frac{Y_b^{din}}{2Q_0} = \frac{H}{2Q_0} = \frac{1,4H_{rms}}{2Q_0}$$

Teniendo en cuenta el límite establecido para el valor de $H_{max,lim} = k_2 \left(10 + 2\frac{Q_0}{3}\right)$ y que el criterio de inestabilidad establece un valor límite de $H_{rms,lim} = \frac{H_{max,lim}}{2}$ cuando se utiliza el método simplificado con medición de las fuerzas transversales en las cajas de grasa, para vehículos con bogies o ejes. Con estas dos expresiones y dando un valor a k_2 de 0,9 propio de trenes automotrices y coches de viajeros, se tiene que:

$$H_{rms} < \frac{0,9}{2} \left(10 + 2\frac{Q_0}{3}\right)$$

Por lo que, dado que $Y_b^{din} = H$, la expresión queda de la siguiente forma:

$$I_{dhor} < \frac{1,4}{2Q_0} \frac{0,9}{2} \left(10 + 2\frac{Q_0}{3}\right)$$

Para un valor Q_0 de 90 kN, el resultado obtenido es $I_{dhor} < 0,245$ que es menor que el límite establecido en la Norma GOST R, $I_{dhor} < 0,3$ por lo que en este caso el criterio de la Norma EN es más conservador que el de la Norma GOST R, ya que éste último puede llegar a 0,3 y el aplicando el valor de $H_{rms,lim}$ quedaría en el 0,245 indicado.

Considerando que, según la Norma rusa, para determinar el valor I_{dhor} en los ensayos se utiliza la evolución del desplazamiento de las cajas de grasa o la tensión en los elementos de rodadura, para este

último, también sería posible establecer la comparativa con el criterio de inestabilidad de la Norma europea para vehículos con bogies (también válido para vehículos de ejes) empleando el método de medición normal, tomando un valor para $K_2 = 1$ (trenes automotrices y coches de viajeros), dando como resultado $I_{dhor} < 0,27$, obteniéndose idénticas conclusiones a las anteriores.

Como resumen de este apartado se determina que la norma EN es más conservadora que la GOST R, por lo que un vehículo ferroviario que cumpla con los requisitos europeos, también cumpliría con los rusos. De manera inversa puede no cumplirse, como se ha demostrado enfrentando los parámetros de ambas normas que son comparables en cuanto a criterios de inestabilidad.

4.3.7.2. Criterios de ripado de vía.

Los parámetros que resultan comparables de las dos normas son la suma de fuerzas transversales en las cajas de grasas H de la norma EN 14363 y el índice de dinámica horizontal I_{dhor} de las normas rusas (GOST R 55495 y 55496 de 2013) en cuanto a criterios de *ripado de vía* se refiere.

Aunque también sería comparable con los esfuerzos de guiado en la medición normal de la Norma EN si el ensayo según Norma GOST R se realiza en los elementos de rodadura, algo que también se contempla en las normas rusas. En adelante se adopta H como valor comparativo, lo que presupone que el parámetro ruso se ha medido en la caja de grasa y no en el elemento de rodadura.

La comparativa de estos dos parámetros consiste en estudiar la relación entre los valores que adopta el I_{dhor} (que tiene en cuenta la componente dinámica de la fuerza lateral) para distintas aceleraciones no compensadas y el valor de H (que tiene en cuenta las componentes estática y dinámica).

Dados los siguientes valores:

Q_0 : carga estática por rueda (kN),

K : factor de ripado,

a_{nc} : aceleración no compensada (m/s^2),

H_{max} : límite de la suma de fuerzas laterales en la caja de grasa (componentes estática y dinámica) (kN).

Se puede determinar, para cada valor de H y para cada valor aceleración no compensada, el valor de la componente dinámica de la fuerza lateral (Y_{din}), necesaria para determinar el valor de I_{dhor} .

Para cada valor dado de aceleración no compensada, se podrá determinar la componente estática de la fuerza lateral (Y_{est}):

$$Y_{est} = \frac{2Q_0}{g} * a_{nc}$$

Conocida la Y_{est} para cada valor de a_{nc} , se puede determinar la Y_{din} para cada H dada:

$$Y_{din} = H - \frac{2Q_0}{g} * a_{nc}$$

es decir:

$$Y_{din} = H - Y_{est}$$

Conocido el valor de Y_{din} se puede calcular el valor I_{dhor} para cada valor de H dado:

$$I_{dhor} = \frac{Y_{din}}{2 * Q_0}$$

Como ejemplo, se establecen una serie de valores numéricos:

$$Q_0 = 90 \text{ kN.}$$

$K = 1$ (locomotoras, automotores, trenes automotrices y coches de viajeros).

$$a_{nc} = 0,8 \text{ a } 1,2 \text{ m/s}^2.$$

$$H = 60 \text{ a } 77 \text{ kN}$$

$$H_{max} = 70 \text{ kN}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Aplicando las expresiones anteriores y representando gráficamente los valores obtenidos, se puede realizar una comparativa entre ambos criterios (UNE-EN y GOST R).

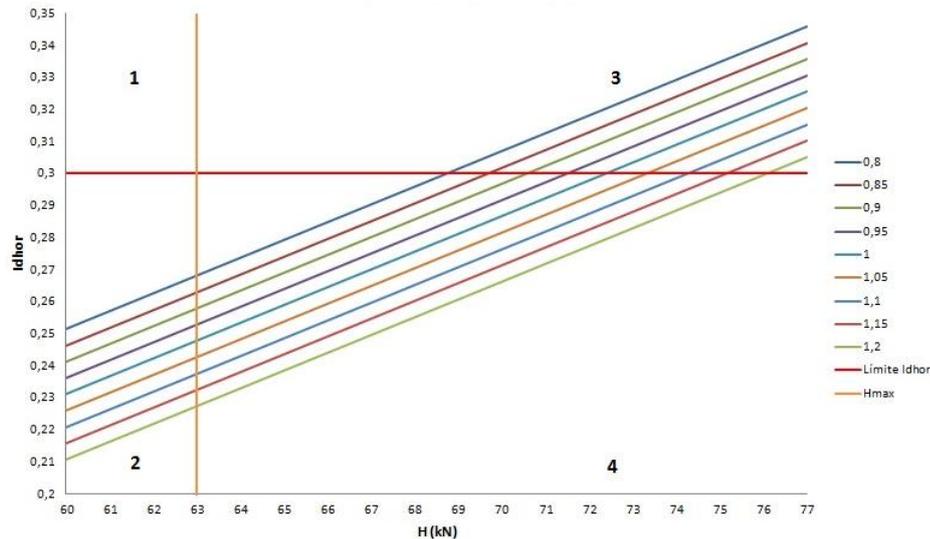


Fig. 18. Comparativa $H - I_{dhor}$

Como se puede apreciar, los valores límite I_{dhor} y H_{max} dividen en cuatro cuadrantes el gráfico, numerados del 1 al 4.

El cuadrante 1 es el área donde, para unos valores de H por debajo del H_{max} , no se cumple el criterio establecido para I_{dhor} , por lo que el vehículo ferroviario cumpliría con la normativa EN pero no con la GOST R. No obstante como se puede observar, no hay valores en este caso.

En el caso del cuadrante 2, se trata de un área del gráfico en el que se cumplen los dos criterios.

La zona marcada como 3 representa un área en el que no se cumplen ninguno de los dos criterios.

Finalmente, el área 4 determina una zona en la que no se cumple el criterio establecido por la Norma europea, pero sí se cumple lo indicado en la Norma rusa, por lo que a medida que aumenta la aceleración lateral no compensada para un valor H, disminuye la componente dinámica lateral, lo que hace que el índice I_{dhor} no alcance valores tan altos en relación a la componente estática. Esto no sucede con el valor H al tener en cuenta tanto la componente dinámica como la estática.

Para un valor dado de H, a medida que aumenta la aceleración no compensada, aumenta la componente estática de la fuerza lateral y disminuye la componente dinámica y el valor de I_{dhor} , haciendo que el criterio europeo sea más conservador.

De manera general, el criterio europeo es más conservador que el ruso, ya que como, se puede observar en el cuadrante 4, existe una gama significativa de valores H para una serie de aceleraciones no compensadas que cumplen con lo indicado en la GOST R y no con lo establecido en la EN.

Como conclusión, en términos de criterio de ripado de vía, es más conservador el criterio europeo que el ruso, lo que indica que un vehículo ferroviario que cumpla con los requisitos europeos también cumplirá con los requisitos rusos.

Los valores límites aproximados, según el gráfico anterior, para el ejemplo son:

H (kN)	63	63	63	63	63	63	63	63	63
I_{dhor}	0,269	0,263	0,258	0,253	0,248	0,243	0,238	0,232	0,228
$A_{no\ compensada}$ (m/s²)	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2

Tabla 11. Valores límite del gráfico de la figura 18.

En el caso de que la medida se realice en los elementos de rodadura:

Gráficamente:

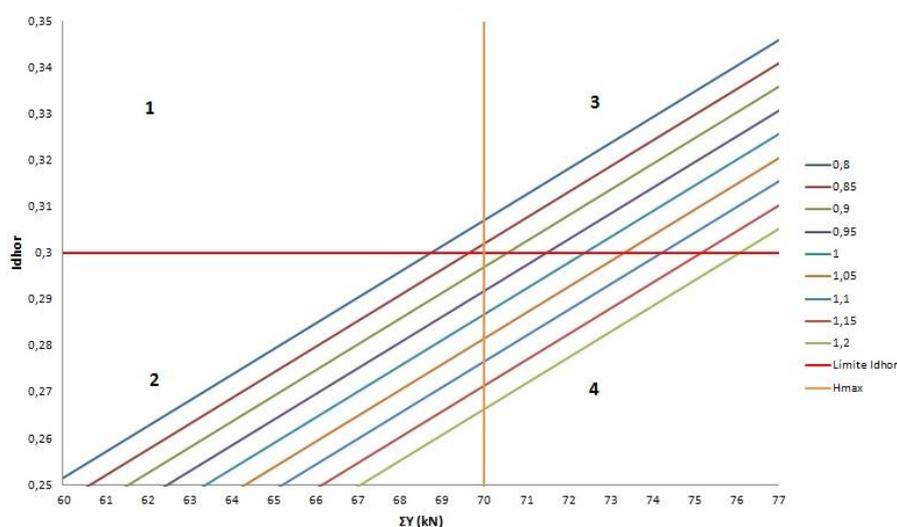


Fig. 19. Comparativa $\Sigma Y - I_{dhor}$

Los valores límites aproximados, según el gráfico anterior, para el ejemplo son:

ΣY (kN)	68.5	69.5	70	70	70	70	70	70	70
I_{dhor}	0,3	0,3	0,3	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27
$A_{no\ compensada}$ (m/s ²)	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2

Tabla 12. Valores límite del gráfico de la figura 19.

Las conclusiones son análogas a lo indicado anteriormente.

4.3.7.3. Criterio de descarrilamiento

El criterio de descarrilo de la Norma GOST R es el coeficiente contra el descarrilamiento λ , siendo su homólogo en la norma EN el cociente Y/Q (L/V), aplicando la expresión de Nadal para establecer el valor límite.

Dando valores a:

μ^{ED} coeficiente de fricción entre la pestaña de la rueda exterior delantera y el carril.

μ^{IR} coeficiente de fricción entre la banda de rodadura de la rueda interior delantera y el carril.

β ángulo de inclinación de la generatriz de la pestaña de la rueda en relación al plano horizontal.

Nota aclaratoria, el subíndice 1 corresponde a la rueda exterior, que inicia el remonte del carril y el subíndice 2 corresponde a la rueda interior.

$$\lambda = \frac{C_1}{Y_b l + C_2 \mu^{ID} (1 + 0.5 \mu^{ED} \sin 2\beta) + C_1 \mu^{ED} \cos^2 \beta} * \frac{1}{ctg \beta + \mu^{ED}}$$

Y teniendo en cuenta que C_1 y C_2 de la expresión anterior representan el momento de las fuerzas verticales respecto de los puntos de contacto de las ruedas:

$$\sum M_2 = V_1 l = C_1 = 2Q(b - a_2) - P_{Z1-ED}(l + a_1) + P_{Z1-ID}a_2 + Y_b r + q_{NS}(b - a_2)$$

$$\sum M_1 = V_2 l = C_2 = 2Q(b - a_1) - P_{Z1-ID}(l + a_2) + P_{Z1-ED}a_1 + Y_b r + q_{NS}(b - a_1)$$

Por lo que asignando unos valores determinados a V_1 y V_2 (fuerzas verticales aplicadas en cada uno de los puntos de contacto de las ruedas) se pueden calcular los coeficientes C_1 y C_2 , y con el resto de parámetros conocidos indicados anteriormente se puede determinar λ para cada valor L_1 , ya que:

$$Y_b - \mu V_2 \leq L_1 \leq Y_b + \mu V_2$$

Siendo el caso más desfavorable o de mayor valor de L_1 :

$$L_1 = Y_b + \mu V_2$$

Para una serie de valores dados de Y_b , se calculan los diferentes L_1 y los valores que adopta el parámetro λ .

De esta forma se puede realizar la comparativa con el criterio de descarrilamiento de la Norma EN (Y/Q o L_1/V_1), ya que a cada valor le corresponde un L_1 para un determinado V_1 dado.

Para unos valores concretos:

$$\mu^{ED} = \mu^{IR} = 0,25$$

$$\beta = 70^\circ$$

Realizando el estudio para:

$$V_1 = 100 \text{ kN}$$

$$V_2 = 80 \text{ kN}$$

Con unos rangos de

$$Y_b = 40 \text{ a } 100 \text{ kN}$$

Aplicando las expresiones anteriores y representando gráficamente el análisis comparativo, se obtiene:

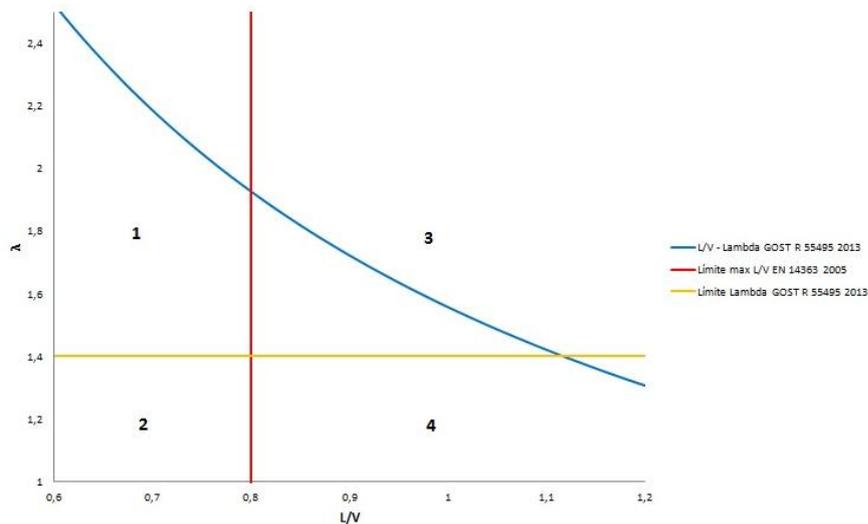


Fig. 20. Comparativa $L/V - \lambda$.

De la representación anterior se deduce lo siguiente:

El cuadrante 1 representa el área dónde se cumplen los requisitos de ambas normas.

El cuadrante 2 representa la zona en la que se da cumplimiento a la Norma EN pero no a la Norma GOST R, en esta zona no hay ningún valor, por lo tanto este caso no se da para los valores del análisis.

El cuadrante 3 representa la zona en la que se cumple la Norma rusa pero no la europea, siendo destacable que hay un número significativo de puntos en los que se da esta circunstancia.

Por último el cuadrante 4 representa la zona en la que no se cumplen los requisitos de ninguna de las dos Normas.

De lo anterior se puede deducir que los criterios europeos son más conservadores que los rusos, algo que en principio podría venir dado por la utilización del criterio de Nadal por parte de la EN, siendo este criterio de por sí conservador. En el ejemplo para un $L_1/V_1 = 0,8$, le corresponde un $\lambda = 1,93$.

Por lo que un vehículo ferroviario que cumpla con lo establecido en la Norma europea también cumpliría los requisitos rusos.

Adicionalmente, se puede realizar un análisis de la tendencia de esta comparativa en función de los valores de descarga de la rueda interior:

V_1 (kN)	V_2 (kN)	$\Delta Q/Q$
100	80	0,11
120	60	0,33
140	40	0,55

Tabla 13. Valores de descarga.

Gráficamente

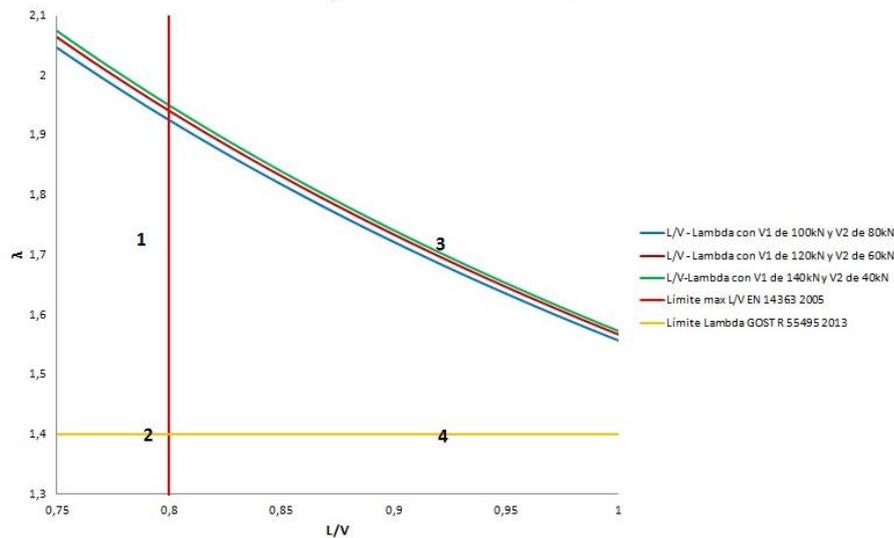


Fig. 21. Comparativa $L/V - \lambda$ para distintos valores de cargas sobre las ruedas.

El valor L_1/V_1 de la rueda exterior disminuye a medida que crece V_1 con lo que cuanto más se descarga la rueda interior, parece mayor el cumplimiento con los criterios de descarrilo. Sin embargo esto no es así en cuanto a la seguridad, ya que a medida que se descarga la rueda interior, el valor de L_1 se acerca al valor de Y_b . En el caso extremo V_2 es cero y $L_1 = Y_b$, lo que indicaría que el vehículo inicia el levantamiento de la rueda interior, algo que no es probable, ya que antes se darían otros fenómenos como el del ripado de la vía. Podemos concluir que la tendencia resulta engañosa si no se tiene en cuenta el ripado de vía, cuyo límite es 70 kN para las fuerzas directrices de guiado o 63 kN para las fuerzas transversales en la caja de grasa.

4.4. Solicitud a la vía.

4.4.1. EN 14363. Solicitud a la vía.

La Norma establece tres parámetros fundamentales para la evaluación de la solicitud de vía para el método normal de medición:

- Y_{qst} : Fuerza de guiado cuasi-estática.
- Q_{qst} : Carga de la rueda cuasi-estática.

- Q_{max} : Carga de rueda máxima.

Los valores dados son de aplicación para vehículos cuya fuerza estática en la rueda es inferior a 112,5 kN:

$Y_{qst, lim} = 60$ kN (zonas de ensayo 2, 3 y 4). No se incluyen los tramos de transición.

$Q_{qst, lim} = 145$ kN (zonas de ensayo 2, 3 y 4). No se incluyen los tramos de transición.

$Q_{max, lim} = 90 + Q_0$ (kN). El valor queda limitado en función de la velocidad del vehículo ferroviario:

$V_{adm} \leq 160$ km/h	$Q_{max, lim} \leq 200$ kN
160 km/h < $V_{adm} \leq 200$ km/h	$Q_{max, lim} \leq 190$ kN
200 km/h < $V_{adm} \leq 250$ km/h	$Q_{max, lim} \leq 180$ kN
250 km/h < $V_{adm} \leq 300$ km/h	$Q_{max, lim} \leq 170$ kN
$V_{adm} > 300$ km/h	$Q_{max, lim} \leq 160$ kN

Estos valores son para carriles de más de 46 kg por metro y un valor mínimo de resistencia de 700 N/mm²

4.4.2. GOST R 55496 / GOST R 55495. Solicitación a vía.

4.4.2.1. Indicador de la dinámica vertical de la suspensión primaria I_{d1} .

4.4.2.1.1. Método de cálculo.

Según la norma GOST R 55495 (punto 6.2.2.), el índice I_{d1} se determina como la relación entre el valor de la componente dinámica de la fuerza vertical en la suspensión primaria P_{z1}^{din} y el valor de la carga estática máxima en la suspensión primaria P_{est1_bruto} .

$$I_{d1} = \frac{P_{z1}^{din}}{P_{est1_bruto}}$$

La componente dinámica de la fuerza vertical de la suspensión primaria se determinará de manera análoga a como se ha realizado la componente dinámica de la fuerza en bastidor Y_b^{din} para el I_{dhor} .

El valor se halla para el coche en vacío y con carga. Además, en el cálculo se tendrán en cuenta los valores de las fuerzas (cargas) que actúan sobre los conjuntos concretos de la suspensión primaria.

En el proceso de diseño se lleva a cabo la evaluación del índice para todos los conjuntos de la suspensión primaria del coche.

4.4.2.1.2. Método de ensayo.

En los ensayos de vía para determinar el valor I_{d1} es necesario registrar el proceso dinámico del parámetro que sirve como base para efectuar la transición a la fuerza vertical dinámica en el conjunto de la suspensión primaria de muelles P_{z1} . Dicho parámetro es la deformación vertical del conjunto de la suspensión primaria de muelles ΔZ_1 o la tensión σ en el elemento de construcción de la rodadura (por ejemplo, en los muelles de la suspensión primaria).

La transición del parámetro ΔZ_1 o σ al valor de la fuerza P_{z1} se realiza utilizando la ecuación $P_{z1}=f(\Delta Z_1)$ o $P_{z1}=f(\sigma)$. La relación se determina o se utilizan los datos del fabricante (de cálculo o de prueba).

En caso de utilización del parámetro ΔZ_1 para una suspensión de muelles con características lineales de rigidez vertical de la suspensión primaria, el valor P_{z1} se calcula:

$$P_{z1} = C_{z1}\Delta Z_1$$

Donde:

P_{z1} : Fuerza dinámica vertical en la suspensión primaria de muelles, N;

C_{z1} : Rigidez vertical de la suspensión primaria de muelles, N/mm;

ΔZ_1 : Deformación vertical de la suspensión primaria de muelles, mm.

C_{z1} : Valor de la rigidez nominal (presentado por el fabricante).

Los sensores de valores I_{d1} se establece en los elementos del bogie de tal manera que se excluye la influencia de las fuerzas horizontales.

El valor de I_{d1} no puede superar 0,30, según GOST R 55495 (punto 4.1.).

4.4.3. Solicitación a la vía. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.

La relación entre los parámetros I_{d1} (GOST R) y la carga de la rueda Q (EN) se establece por medio de la componente dinámica de la variación de la carga de la rueda ΔQ_{din} . Dado que:

$$I_{d1} = \frac{P_{z1}^{din}}{P_{est1_bruto}} = \frac{\Delta Q_{din}}{2Q_0}$$

se tiene que:

$$Q = \Delta Q_{din} + \Delta Q_{qst} + Q_0$$

P_{z1} : Fuerza dinámica vertical en la suspensión primaria.

P_{est1_bruto} : Carga estática máxima de la suspensión primaria.

ΔQ_{din} : Variación dinámica de la carga de la rueda.

ΔQ_{qst} : Variación cuasi-estática de la carga de la rueda.

Q_0 : Carga estática sobre la rueda.

A cada valor de aceleración no compensada le corresponde un valor de variación cuasi-estática de la carga de la rueda ΔQ_{qst} , por lo que, para un rango dado de la variación dinámica de la carga de la rueda ΔQ_{din} , se puede calcular la carga total en la rueda Q y el índice de dinámica vertical de la suspensión primaria I_{d1} .

Previamente es necesario calcular la variación cuasi-estática de la carga de la rueda ΔQ_{qst} conocidos los siguientes datos:

$h_{c.d.g.}$: Altura del centro de gravedad.

l : Distancia entre los puntos de contacto con los carriles.

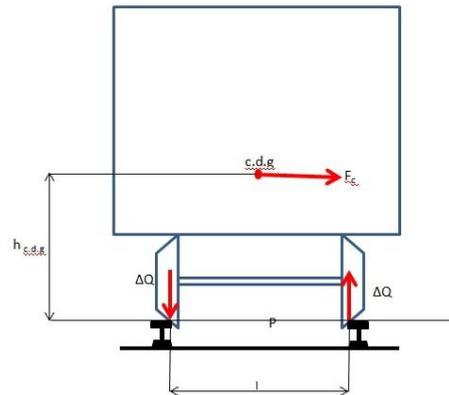


Fig. 22. Esquema de fuerzas.

F_c es la fuerza centrífuga $F_c = \frac{2Q_0}{g} a_{nc}$

a_{nc} es la aceleración no compensada

g es la aceleración de la gravedad.

Si se toma momentos en el punto de contacto:

$$\Delta Q_{qst} l - h_{c.d.g.} \frac{2Q_0}{g} a_{nc} = 0$$

Despejando de la anterior expresión, se calcula:

$$\Delta Q_{qst} = \frac{2Q_0 a_{nc} h_{c.d.g.}}{gl}$$

Y para unos valores determinados ΔQ_{din} se conoce Q :

$$Q = \Delta Q_{din} + \Delta Q_{qst} + Q_0$$

Aplicando lo anteriormente explicado para unos datos concretos, como por ejemplo:

$$Q_0 = 90 \text{ kN}$$

$$h_{c.d.g.} = 1,5 \text{ m.}$$

$$l = 1,5 \text{ m.}$$

$$a_{nc} = 0,8 \text{ a } 1,2 \text{ m/s}^2.$$

$$\Delta Q_{din} = 15 \text{ a } 80 \text{ kN}$$

Representando gráficamente el análisis comparativo:

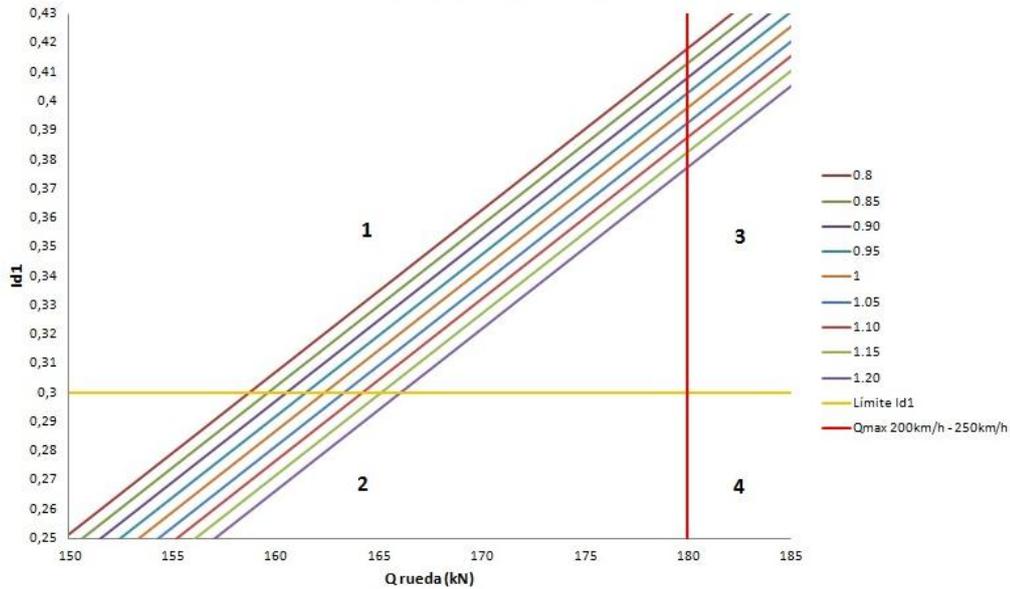


Fig. 23. Comparativa $Q - I_{d1}$.

El gráfico anterior queda dividido en cuatro cuadrantes definidos por los valores límite establecidos en las reglamentaciones, $I_{d1} \leq 0,30$ para el índice de la dinámica vertical según establece la GOST R 55495 y $Q_{max, lim} = 180$ kN para la EN 14363.

El cuadrante número 1 determina la zona en la que se dan los valores que cumplen el requisito de la Norma europea, pero no la Norma rusa.

En el caso del área 2, los valores cumplen ambas Normas. El cuadrante 3 representa la zona en la que no se cumple ninguna de las dos normativas. Finalmente el área 4 no da cumplimiento a la EN pero sí a la GOST R, pero no se da ningún punto para los valores establecidos en el ejemplo.

Como consecuencia el índice de dinámica vertical de la suspensión primaria es más conservador que el límite de carga, es decir, el grado permitido de sollicitación a la vía es más conservador en la reglamentación rusa que en la europea.

Por lo tanto, un vehículo ferroviario que cumpla con los requisitos GOST también cumplirá con los requisitos EN, pero en sentido inverso no se dará en todos los casos, siendo necesario el estudio de cada caso en concreto. Según los datos del ejemplo, el vehículo ferroviario analizado cumpliría ambas Normas en el rango de aceleraciones no compensadas de 0,8 a 1,2 m/s^2 , para un rango de cargas en la rueda Q de 158,68 kN a 166,02 kN, se obtiene:

I_{d1}	Q (kN)									
0,3	158,68	159,60	160,51	161,43	162,35	163,27	164,18	165,10	166,02	
A no compensada (m/s^2)	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2	

Tabla 14. Valores límite del gráfico de la figura 23.

4.5. Comodidad (comfort).

La EN 12299: 2009 define los siguientes aspectos de confort o comodidad:

Comodidad media: nivel de comodidad percibida, ajustado continuamente, tal como se evalúa por medición durante un intervalo de tiempo largo (al menos algunos minutos).

Comodidad continua: nivel de aceleraciones, ponderado en frecuencia ISO, evaluado continuamente como un conjunto de valores rms (valor cuadrático medio) en dirección vertical, transversal y longitudinal sobre un intervalo de tiempo corto (normalmente 5 s).

Comodidad en curva de transición: falta de comodidad, debida a una curva de transición.

Comodidad en un evento discreto: falta de comodidad, debida a la percepción de una oscilación transitoria.

Existen diferentes documentos que tratan los distintos aspectos de confort o comodidad:

- Comodidad media.
 - Índice de Sperling (método no normalizado).
 - Norma EN 12299.
- Calidad de marcha.
 - Norma EN 14363.
- Comodidad continua.
 - Norma EN 12299.
- Comodidad en curva de transición.
 - Norma EN 12299.
- Comodidad en los eventos discretos.
 - Norma EN 12299

Adicionalmente la norma ISO 2631 trabaja con los límites de la vibración del cuerpo humano, confort e incidencias de mareo, y se expresa como un límite temporal que indica la duración admisible a un cierto nivel de vibración sin riesgos para la salud.

4.5.1. **Calidad de marcha según EN 14363.**

La Norma establece como parámetros para la evaluación de la calidad de marcha:

- a) Aceleraciones cuasiestáticas en la caja del vehículo \ddot{y}_{qst}^*
- b) Aceleraciones máximas en la caja del vehículo \ddot{y}_{max}^* y \ddot{z}_{max}^*
- c) Valor cuadrático medio de las aceleraciones de la caja del vehículo \ddot{y}_{rms}^* y \ddot{z}_{rms}^*

Valores límite de calidad de marcha según la Norma:

Evaluación, vehículo, condiciones de ensayo	Valores límite para aceleraciones en la caja del vehículo m/s ²				
	$\ddot{y}_{qst.lím}^*$ ^a	$\ddot{y}_{máx.lím}^*$	$\ddot{z}_{máx.lím}^*$	$\ddot{y}_{rms.lím}^*$	$\ddot{z}_{rms.lím}^*$
°1 Locomotoras, automotores	1,5	2,5	2,5	0,5	1,0
Trenes automotores, coches de viajeros	1,5	2,5	2,5	0,5	0,75
Vagones de mercancías, vehículos especiales con bogies	1,3	3,0	5,0	1,3	2,0
Vagones de mercancías, vehículos especiales a ejes	1,3	4,0	5,0	1,5	2,0

^a Sólo aplicable en las zonas de ensayo 2, 3 y 4 (curvas).

Tabla 15. Valores límite de la calidad de marcha.

La Norma EN se centra en el análisis de indicadores de **calidad de marcha**.

4.5.2. Suavidad de marcha (comodidad media) GOST R 55495 / GOST R 55496.

Las Normas rusas establecen dos parámetros de suavidad de marcha, uno en sentido vertical y otro en sentido horizontal. Los índices de suavidad de marcha son los siguientes:

Vibraciones en sentido horizontal:

$$W_k = 4.676 * \tilde{a}_k^{0,3}$$

Vibraciones en sentido vertical:

$$W_k = 4.346 * \tilde{a}_k^{0,3}$$

Siendo \tilde{a}_k el valor medio cuadrático de aceleración corregida de vibración en el rango k de velocidad de circulación, m/s².

$$\tilde{a}_k = \sqrt{2 \int_{f_{inf}}^{f_s} q_n^2(f) S_k(f) df}$$

f_{inf} es el valor de la frecuencia límite inferior del rango de medición de suavidad de la marcha, se toma como $f_{inf} = 0,5$ Hz;

f_s es el valor de la frecuencia límite superior del rango de medición de suavidad de la marcha. Se toma igual a la frecuencia de rotación de la rueda a la velocidad de circulación de diseño, no inferior a 20 Hz;

$q_n(f)$ son los valores de la característica normalizada de amplitud y frecuencia del filtro corrector. Es la función de ponderación de la frecuencia;

$S_k(f)$ es la función de densidad espectral de la aceleración de vibración en el rango k de velocidad de circulación, m²/s⁴/ Hz;

f es la frecuencia de oscilaciones, Hz.

Siendo: $q_n(f) = 1,15f \sqrt{\frac{(1+0,1f^2)}{(1+4,04f^2)((1-0,0364f^2)^2+0,45f^2)}}$

Por lo que las Normas rusas centran el análisis en indicadores de **comodidad media**.

4.5.3. Confort o comodidad. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.

No es posible realizar una comparación de los parámetros establecidos en ambas Normas, ya que su naturaleza y tratamiento es muy diferente. La Norma europea realiza mediciones de aceleraciones cuasiestáticas, máximas y valor cuadrático medio de aceleraciones en la caja del vehículo ferroviario, lo que lleva a un análisis de **calidad de marcha**, mientras que la Norma GOST R establece unos índices de suavidad basados en el valor medio cuadrático de las aceleraciones aplicando un filtro matemático y una función de densidad espectral, lo que persigue determinar la **comodidad media**.

No obstante, se puede observar que el método utilizado por la GOST R tiene analogías con el propuesto por **Sperling**, por lo que se realiza una comparación con este último, aunque no tenga un carácter normativo.

El índice de Sperling se determina como:

$$W_z = (100B(f)a_0)^{0,3}$$

Siendo:

a_0 es la amplitud de la aceleración (m/s^2).

$B(f)$ es la función de ponderación de la frecuencia.

Para vibraciones verticales:

$$B_s = 0.588 \sqrt{\frac{1,911f^2 + (0,25f^2)^2}{(1 - 0,277f^2)^2 + (1,563f - 0,0368f^3)^2}}$$

Para vibraciones laterales:

$$B_w = 0.737 \sqrt{\frac{1,911f^2 + (0,25f^2)^2}{(1 - 0,277f^2)^2 + (1,563f - 0,0368f^3)^2}}$$

Los valores límite de Sperling están definidos según la tabla:

W_z	Nivel de vibración	Nivel de comodidad
1	Perceptible	Muy buena
2	Claramente perceptible	Buena
2,5	Pronunciado, pero no desagradable	-
3	Fuerte, pero tolerable	Tolerable
3,5	Muy fuerte y desagradable	-
4	Extremadamente y desagradable	No tolerable
5	-	Peligroso

Tabla 16. Valores límite del índice de Sperling.

Para realizar el análisis comparativo entre el índice de Sperling y el índice de suavidad de marcha de la normativa GOST R, se parte de una serie de valores dados que simplifican los cálculos con el fin de determinar las diferencias entre los índices:

Para los índices de Sperling se considera $a_0 = 1 \text{ m/s}^2$ y para los índices definidos en la Norma GOST R $S_k(f) = 1 \text{ m}^2/\text{s}^4/\text{Hz}$. Con estos valores se puede apreciar claramente la diferencia entre índices y entre las funciones de ponderación que utiliza Sperling y GOST R. Representando gráficamente el valor de los índices de ambas Normas tanto para aceleraciones verticales como laterales para un rango de frecuencia de 0,5 Hz a 20 Hz:

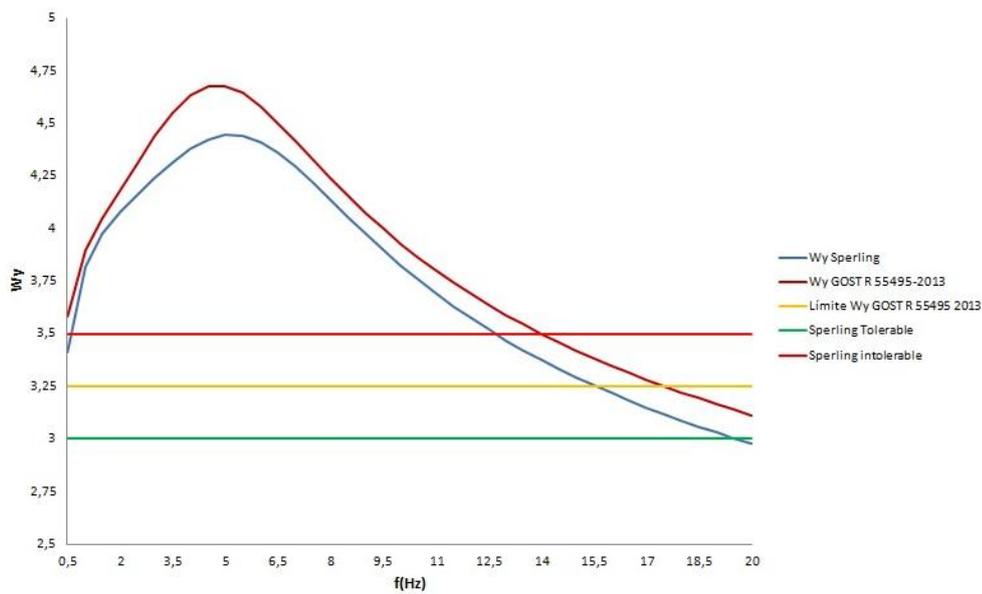


Fig. 24. Comparativa W_y Sperling – GOST R 55495-2013.

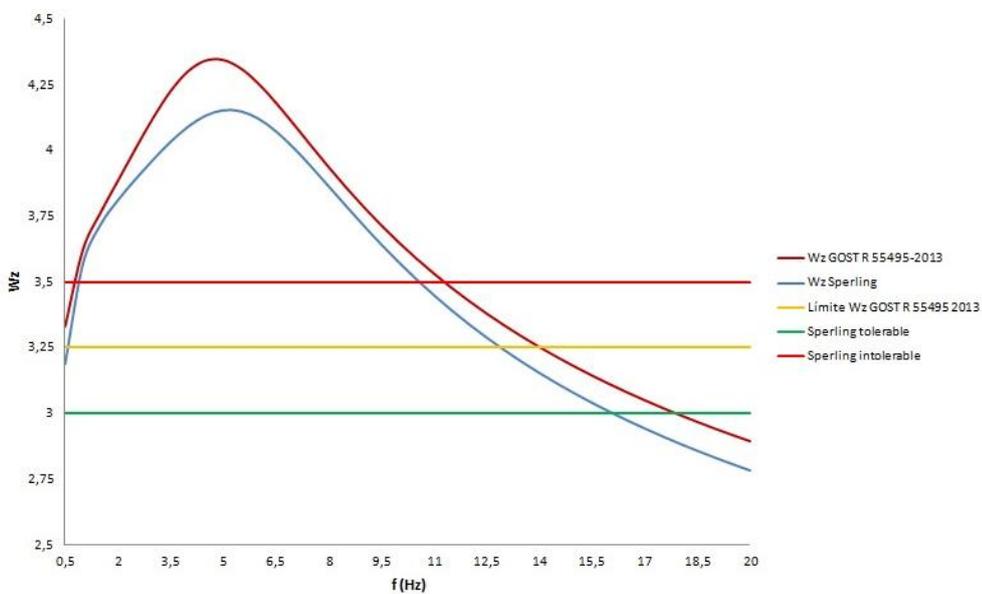


Fig. 25. Comparativa W_z Sperling - GOST R 55495-2013.

De las gráficas anteriores se deduce que el método ruso es similar a Sperling para la determinación de los índices relacionados con el confort. La función de ponderación no es la misma, habiendo una diferencia del 1% - 6% superior para los valores rusos, por lo que se puede decir que el índice establecido por la GOST R es equivalente al método Sperling, teniendo en cuenta la diferencia porcentual.

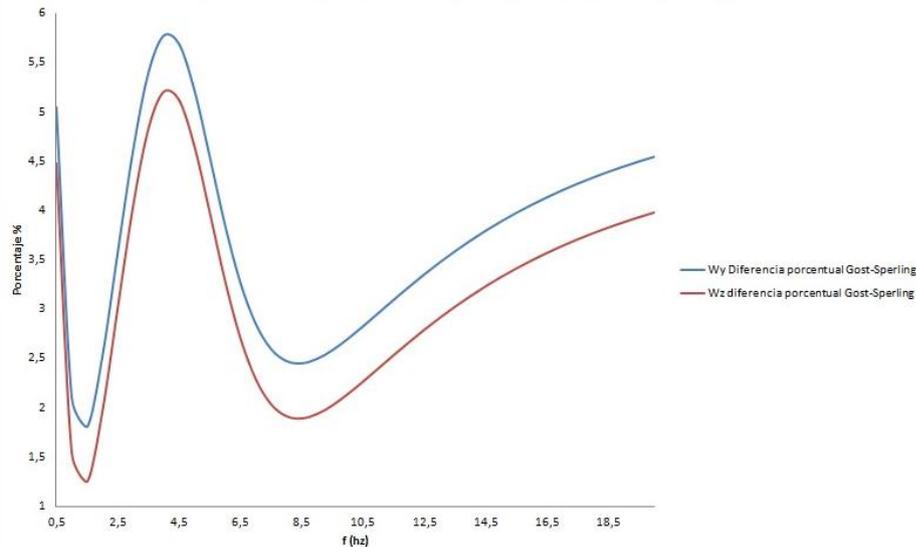


Fig. 26. Comparativa porcentual índices de confort GOST R-Sperling.

Concretando en los valores límite, para el valor $W_y = 3,25$ de la GOST, le corresponde un índice de Sperling de $W_y = 3,12$, lo que supone un 4,27% más en la Norma rusa por el filtrado matemático utilizado. De igual manera para el índice $W_z = 3,25$ en la Norma rusa equivale a 3,15 según Sperling, lo que supone un 3,13% menos.

	Índice Sperling	GOST R	%GOST
Wy	3,12	3,25	4,27
Wz	3,15	3,25	3,13

Tabla 17. Valores límite del gráfico de la figura 24 y 25.

4.6. Parámetros no comparables.

En este apartado se tratan los parámetros de las Normas rusas que por su naturaleza no tienen comparación o equivalencia posible con los de las Normas EN.

4.6.1. Indicador de la dinámica vertical de la suspensión secundaria I_{d2} .

Se trata de un parámetro análogo al indicador de dinámica vertical de la suspensión primaria I_{d1} pero para la suspensión secundaria.

4.6.1.1. Método de cálculo.

El índice I_{d2} se determinará como la relación entre el valor de la componente dinámica de la fuerza vertical en la suspensión secundaria P_{z2}^{din} y el valor de la carga estática máxima en la suspensión secundaria P_{est2_bruto} .

$$I_{d2} = \frac{P_{z2}^{din}}{P_{est2_bruto}}$$

La componente dinámica de la fuerza vertical de la suspensión secundaria se determinará de manera análoga a como se ha realizado la componente dinámica de la fuerza en el bastidor Y_b^{din} para el I_{dhor} .

En el proceso de diseño se lleva a cabo la evaluación del índice de todos los conjuntos de la suspensión secundaria del coche.

4.6.1.2. Método de ensayo

En las pruebas de vía para determinar el valor I_{d2} se registra el proceso dinámico del parámetro que sirve de base para la transición a la fuerza dinámica vertical en la unión de la suspensión secundaria de muelles (P_{z2}). Tal parámetro es la deformación vertical de la unión de la suspensión secundaria ΔZ_2 o la tensión σ en un elemento de construcción de la rodadura (por ejemplo, en los muelles de la suspensión secundaria).

La transición del parámetro ΔZ_2 o σ al valor de la fuerza P_{z2} se realiza utilizando la relación $P_{z2}=f(\Delta Z_2)$ o $P_{z2}=f(\sigma)$. Si es necesario, la relación se determina o se utilizan los datos del fabricante (de cálculo o de prueba).

Si se utiliza el parámetro ΔZ_2 de la suspensión secundaria con características lineales de rigidez vertical, se establece el valor P_{z2} como:

$$P_{z2} = C_{z2}\Delta Z_2$$

Donde:

P_{z2} Fuerza dinámica vertical en la suspensión primaria de muelles, N;

C_{z2} Rigidez vertical de la suspensión primaria de muelles, N/mm;

ΔZ_2 Deformación vertical de la suspensión primaria de muelles, mm.

C_{z2} Valor de la rigidez nominal (presentado por el fabricante).

El sensor de captación del valor I_{d2} se instala en los elementos de rodadura de tal manera que se excluye la influencia de las fuerzas horizontales. Valor límite $I_{d2} \leq 0,2$.

4.7. Cálculo y ensayo estructural de los componentes de rodadura.

En este apartado se van a tratar los requisitos estructurales relacionados con las sollicitaciones al bastidor del bogie. El estudio se centrará en los parámetros que estén relacionados con los índices dinámicos anteriormente tratados.

4.7.1. EN 14749. Aspectos generales de los requisitos estructurales. Bastidor de bogie.

En los anexos C y D de la Norma se indican las cargas del bogie circulando y las cargas debidas a los componentes unidos al bastidor del bogie (también llamadas cargas externas y cargas internas respectivamente). El anexo F indica unos ejemplos de programas de ensayos estáticos.

- Casos de carga del bogie circulando o cargas externas:
 - Debidas a la circulación por la vía (fuerzas verticales que provienen de la carga transportada, fuerzas transversales en curvas o al atravesar aparatos de vía, alabeos en el bastidor del vehículo, pasar por una vía con alabeo, etc.).
 - Arranques o paradas y aceleraciones asociadas del vehículo.
 - Ciclos de carga y descarga del vehículo.
 - Elevación o empuje.
- Casos de cargas debidas a los componentes unidos al bastidor del bogie o cargas internas:
 - Debidas a la presencia y operación de componentes montados en el bogie (muelles, frenos, barras estabilizadoras, motores, fuerzas unidas al bastidor del bogie).

Cada uno de los casos de carga anteriores pueden incluir tres componentes: estática, cuasi-estática y dinámica.

Adicionalmente, para cada caso de cargas se realizan dos tipos de ensayos:

- Ensayos con solicitaciones excepcionales.
- Ensayos con cargas en servicio normal.

Los ejemplos de programas de ensayo estático indicados en la Norma en su anexo F son para:

- Bogies de material rodante de transporte de viajeros con caja soportada directamente en los laterales del bastidor.
- Bogies con pivote central y soportes laterales.
- Bogies de locomotoras.
- Bogie de vehículos de carril ligero y tranvías.

Para comparar la Norma EN con la GOST R se centra la atención en los ensayos definidos en el anexo F, en concreto *‘el programa de ensayo estático para bogies de material rodante de transporte de viajeros con carga soportada directamente en los laterales del bastidor’* y, dentro de este programa de ensayos, para las *cargas en servicio normal*. A continuación se describe este programa de ensayos.

Las cargas provienen de las fuerzas en servicio normal y de la vía deformada, por lo que se tendrán F_{zi} , F_{yi} , F_{xi} y el momento de torsión. El cabeceo y los saltos inducen *variaciones cuasi-estáticas y dinámicas de las fuerzas verticales* y se representan por los coeficientes α y β . Los valores de estos

coeficientes pueden modificarse en función de las condiciones de explotación, aunque suelen adoptar los valores de $\alpha = 0,1$ y $\beta = 0,2$.

El ensayo estático consiste en la combinación de fuerzas vertical y transversal dando lugar a **nueve casos de carga**:

Caso de carga	F_{z1}	F_{z2}	F_y
1	$F_z/2$	$F_z/2$	0
2	$(1+\alpha-\beta) F_z/2$	$(1-\alpha-\beta) F_z/2$	0
3	$(1+\alpha-\beta) F_z/2$	$(1-\alpha-\beta) F_z/2$	$+F_y$
4	$(1+\alpha+\beta) F_z/2$	$(1-\alpha+\beta) F_z/2$	0
5	$(1+\alpha+\beta) F_z/2$	$(1-\alpha+\beta) F_z/2$	$+F_y$
6	$(1-\alpha-\beta) F_z/2$	$(1+\alpha-\beta) F_z/2$	0
7	$(1-\alpha-\beta) F_z/2$	$(1+\alpha-\beta) F_z/2$	$-F_y$
8	$(1-\alpha+\beta) F_z/2$	$(1+\alpha+\beta) F_z/2$	0
9	$(1-\alpha+\beta) F_z/2$	$(1+\alpha+\beta) F_z/2$	$-F_y$

Tabla 18. Casos de carga EN.

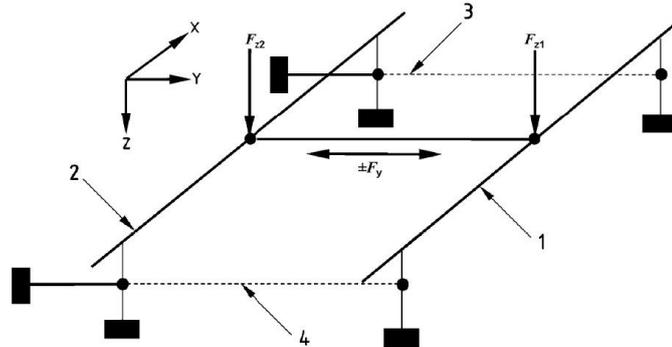


Fig. 27. Disposición de cargas en los laterales del bastidor del bogie.

Este ensayo estático se completa con la superposición de la torsión en ambas direcciones y para los casos de carga 3, 5, 7 y 9 de la tabla aplicando las cargas resultantes por torsión de la vía del 0,5%.

Las tensiones obtenidas en el ensayo se analizan para cada estado de carga comparándolas con los valores límite de **fatiga del material**, estos últimos se determinan por límite de fatiga o, como opción alternativa, por daños acumulados. Adicionalmente también se compara con el **límite elástico**, todo ello según establece el anexo E de la EN 13749.

4.7.2. GOST R 55495. Aspectos generales de los requisitos estructurales. Bastidor de bogie.

La Norma rusa establece una serie de casos de carga o combinación de fuerzas para diferentes regímenes de carga del bogie:

FUERZAS DE CÁLCULO	Combinación de fuerzas para el sistema de cálculo					
	Ib	IIa	IIb	IIc	III	IV
Fuerzas de peso.	X	X	X	X	X	X
Fuerzas verticales dinámicas durante la circulación.	-	X	-	-	X	-
Fuerzas verticales adicionales en los apoyos de la caja debidas a la acción de la fuerza longitudinal de inercia de la caja.	X	-	-	-	-	-
Fuerzas verticales adicionales en los apoyos de la caja durante el arranque.	-	-	X	-	-	-
Fuerzas adicionales en los apoyos del motor eléctrico de tracción del reductor de tracción durante el arranque.	-	-	X	-	-	-
Fuerzas de inercia verticales del lado de las masas del motor eléctrico de tracción.	-	X	-	-	X	-
Fuerzas verticales adicionales en los apoyos de la caja durante el frenado.	-	-	-	X	-	-
Fuerzas que actúan del lado del sistema de freno.	-	-	-	X	-	-
Fuerzas de tracción	-	-	X	-	-	-
Fuerzas de inercia longitudinales	X	-	-	X	-	-
Fuerza centrífuga	-	X	-	-	-	-
Fuerzas del bastidor	-	X	-	-	X	-
Fuerzas asimétricas del lado de las cajas de grasa	-	X	-	-	-	-

Tabla 19. Casos de carga GOST R.

Sistemas de cálculo:

Para la evaluación de la resistencia con las tensiones admisibles *respecto al límite de fluencia*, esta Norma establece tres sistemas de cálculo (**I**, **II** y **IV**) para las *fuerzas estáticas*.

Para el sistema **III** que considera la acción de las *fuerzas estáticas y dinámicas*, el cálculo de resistencia se realiza tanto según las *tensiones admisibles* como para la *resistencia a fatiga*.

- El sistema I incluye los sistemas Ia y Ib.
- El sistema II incluye los sistemas IIa, IIb y IIc.
 - El sistema IIa considera las fuerzas que actúan durante el paso por los tramos curvos de las vías, con la aceleración lateral máxima no compensada admisible.
 - El sistema IIb considera las fuerzas que actúan durante el arranque.

- El sistema IIc considera las fuerzas que actúan durante el frenado de emergencia.
- El sistema III considera las fuerzas que actúan durante la circulación a diferentes velocidades hasta la de diseño, para un tramo recto del trayecto.
- El sistema IV considera las fuerzas condicionadas por la tecnología de mantenimiento y por la realización de los trabajos de recuperación de averías, incluye los sistemas IVa y IVb.
 - IVa: elevación de la caja con tres gatos.
 - IVb: elevación de la caja por el sistema de acoplamiento.

La Norma define los esfuerzos o hipótesis de cálculo que considera dentro de cada una de las *fuerzas de cálculo* indicadas en la tabla anterior.

Adicionalmente, aunque no son objeto del presente estudio, la GOST R 55495 establece las fuerzas de cálculo longitudinales aplicables a los sistemas de acoplamiento de la caja y las combinaciones de fuerzas para diferentes regímenes de carga de la caja.

4.7.3. Requisitos estructurales. Análisis cualitativo y comparativo de las Normas.

La comparativa se establece entre cada fuerza definida en la Norma rusa relacionada con los índices dinámicos y sus homólogas en la Norma europea, por lo que se centra la atención en los sistemas de cálculo de IIa y III de la Norma GOST R.

4.7.3.1. *Fuerzas verticales dinámicas durante la circulación.*

La norma EN 13749 determina las variaciones dinámicas de la fuerza vertical sobre el bastidor con el coeficiente β , estableciendo como valor para este coeficiente en condiciones de servicio normal de 0,2 de manera que:

$$\Delta F_{z\ din} = \beta F_z$$

siendo F_z la carga aplicada sobre el bogie.

La norma GOST R 55495 establece que la fuerza vertical dinámica para la caja y de la suspensión secundaria se calcula mediante la multiplicación de la fuerza de peso de la caja por el valor máximo del índice I_{d2} .

$$P_{zz}^{din} = I_{d2} * P_{est2_bruto}$$

siendo P_{est2_bruto} el valor de la carga estática sobre la suspensión secundaria y teniendo en cuenta que el valor I_{d2} obtenido del modelado matemático de la circulación del tren autopropulsado se toma incrementado en un 20%, pero nunca será superior al valor máximo permisible, es decir, $I_{d2} = 1,2$
 $I_{d2\ calculado} \leq 0,20$.

En este último párrafo se pone de manifiesto la relación de I_{d2} y el cálculo de resistencia estructural, ya que el resultado del modelado matemático del índice dinámico sirve como base para el cálculo de las

fuerzas verticales dinámicas, por lo que cuanto más bajo sea el índice, menor será la fuerza vertical dinámica y por lo tanto el requisito estructural será más fácil de cumplir, es decir, los resultados dinámicos se utilizan en el cálculo de fuerzas para determinar la resistencia estructural.

Por lo que el cálculo de las fuerzas verticales dinámicas es equivalente en ambas normas si se toman los valores $\beta = 0,2$ y $I_{d2} = 0,2$.

$$\frac{\Delta F_z^{din}}{P_z^{din}} = 1$$

4.7.3.2. Fuerzas horizontales en el bastidor.

En cuanto a las fuerzas transversales aplicadas en el bastidor, la norma EN 13749 establece como carga en servicio normal para bogies de material rodante para viajeros:

$$F_y = \frac{F_z + m^+ g}{4} = 0,25(F_z + m^+ g)$$

F_y : Carga aplicada al bogie.

F_z : Carga aplicada al bogie.

m^+ : Masas del bogie sin ninguna masa de la suspensión secundaria.

La norma GOST R 55495 indica que las fuerzas del bastidor que actúan desde el eje montado sobre el bastidor del bogie se calculan multiplicando la carga vertical estática máxima del eje por el valor del índice I_{dhor} .

$$Y_b^{din} = I_{dhor} P_{est_ax_bruto}$$

$P_{est_ax_bruto}$: Carga estática vertical máxima axial

Como valor del índice I_{dhor} se toma el obtenido en el modelado matemático del movimiento del tren autopropulsado incrementado en un 20%, teniendo en cuenta que no puede superar el valor máximo admisible, es decir, $I_{dhor} = 1,2 I_{dhor_calculado} \leq 0,3$.

El valor calculado para el índice dinámico I_{dhor} determina el cálculo de las fuerzas en el bastidor y, por lo tanto, el cumplimiento con los requisitos de resistencia estructural del bastidor. A mejor cumplimiento de los índices dinámicos, mayor margen obtenido para el cumplimiento de los requisitos de resistencia estructural.

Tomando el valor límite de I_{dhor} (0,3), la relación entre ambas expresiones es:

$$\frac{Y_b^{din}}{F_y} = \frac{I_{dhor} P_{est_ax_bruto}}{0,25(F_z + m^+ g)} = \frac{0,3}{0,25} = 1,2$$

4.8. Tratamiento de datos.

El tratamiento de los datos obtenidos durante los ensayos puede resultar determinante en cuanto a la comparativa anteriormente realizada de los distintos índices y parámetros de las normas, por lo que en

este punto se pone de manifiesto las diferencias fundamentales entre las Normas EN y GOST R estudiadas.

4.8.1. Tratamiento de datos. Norma GOST R 55495.

El procesado de los datos que darán lugar a los índices I_{dhor} , I_{d1} e I_{d2} se realiza utilizando el método Rainflow o el método de los ciclos completos, conforme a la GOST 25.101-83. Ambos métodos son semejantes llegando a resultados similares. El método Rainflow consiste en lo siguiente:

1. Se reduce el historial de tiempo a una secuencia de picos y depresiones.
2. Se emula que la evolución temporal es una pagoda.
3. Se gira el gráfico en el sentido de las agujas del reloj 90 °.
4. Cada pico de tensión es como una fuente de agua que "gotea" bajo la pagoda.
5. Se cuenta el número de ciclos de media mediante la búsqueda de las terminaciones en el flujo que ocurren cuando:
 - a. Llega al final de la evolución temporal.
 - b. Se combina con un flujo que se inició a un pico anterior.
 - c. Se encuentra un canal de mayor magnitud.
6. Se asigna una magnitud de cada medio ciclo igual a la diferencia entre el estrés de su inicio y terminación.
7. Se emparejan los medios ciclos de magnitud idéntica (pero sentido contrario) **para contar el número de ciclos completos**. Generalmente, hay algunos medios ciclos residuales.

Ejemplo:

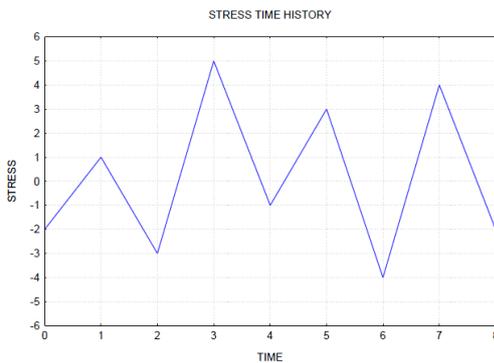


Fig. 28. Gráfica original.

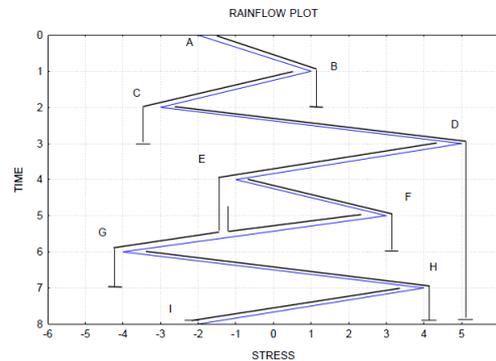


Fig. 29. Gráfico Rainflow.

Path	Cycles	Stress Range
A-B	0.5	3
B-C	0.5	4
C-D	0.5	8
D-G	0.5	9
E-F	1.0	4
G-H	0.5	8
H-I	0.5	6

Stress Range	Total Cycles	Path
10	0	-
9	0.5	D-G
8	1.0	C-D, G-H
7	0	-
6	0.5	H-I
5	0	-
4	1.5	B-C, E-F
3	0.5	A-B
2	0	-
1	0	-

Tabla 20. Ciclos Rainflow.

Tabla 21. Contabilización de ciclos Rainflow.

El método de los ciclos completos conforme a la GOST 25.101-83 se resume gráficamente, según dicha Norma:

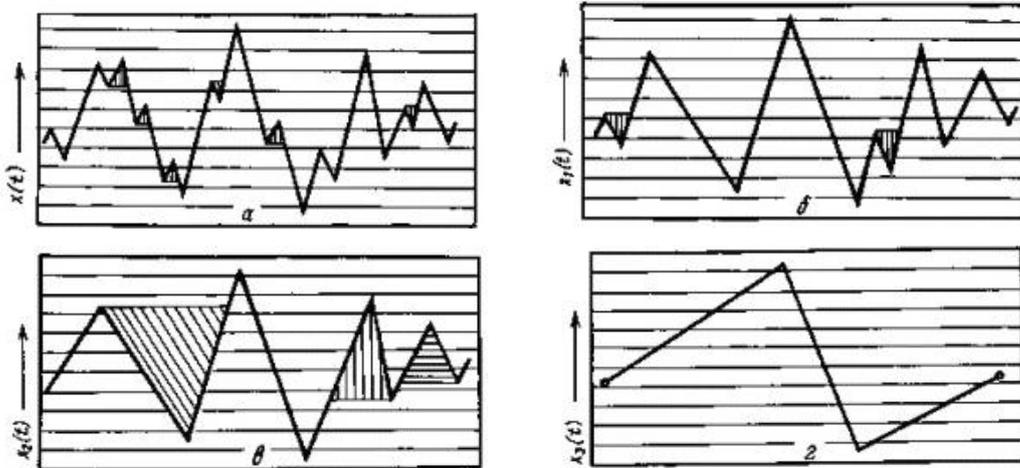


Fig. 30. Proceso de ciclos completos.

Conviene recordar, como se ha indicado anteriormente, que cuando se aplican estos métodos, el valor de la componente dinámica de la fuerza que se desea calcular se determina excluyendo la componente cuasiestática del proceso dinámico.

La exclusión de la componente cuasiestática del proceso dinámico se realiza por medio de un filtro matemático. La frecuencia que separa la componente cuasiestática de la componente dinámica no podrá superar el 80% de la menor frecuencia propia de las oscilaciones del coche con la suspensión de resorte.

Para el valor de la fuerza a determinar **se toma la media aritmética de tres amplitudes máximas**, exceptuando las amplitudes obtenidas de la circulación del coche por los tramos con cambios de agujas.

Las amplitudes máximas de las componentes dinámicas de las fuerzas se determinan como la mitad del valor del rango que se obtiene tratando los datos de los procesos dinámicos con el método Rainflow o con el método de los ciclos completos conforme con la norma GOST 25.101. Esto se aplica para los indicadores I_{dhor} , I_{d1} e I_{d2} , como se ha explicado anteriormente.

Adicionalmente, también se recuerda que el tratamiento de datos para la determinación del factor de seguridad contra el descarrilamiento λ , se realiza tomando **valores instantáneos** de P_{z1} (fuerzas verticales) y de la Y_b (fuerza sobre el bastidor, incluyendo la componente cuasiestática).

4.8.2. Tratamiento de datos. Norma EN 14363.

La Norma EN realiza dos tipos de tratamiento estadístico de los datos, análisis unidimensional y análisis bidimensional.

En los análisis unidimensionales los valores máximos estimados se calculan a partir del valor medio y la desviación típica:

$$Y(PA)_{max} = \bar{y} + kS_y$$

Para seguridad en circulación k toma un valor de 3 y para solicitud a la vía y calidad de marcha k adquiere un valor de 2,2.

Los análisis bidimensionales se aplican cuando existe una relación lineal entre el parámetro de influencia, la insuficiencia de peralte, y la variable dependiente, cualquiera de los valores de evaluación. Este tipo de análisis se da cuando no todos los tramos tienen una insuficiencia de peralte determinada, es decir, que la insuficiencia de peralte al no mantener el nivel definido en la Norma se considera influyente, por lo que se debe realizar un tratamiento bidimensional. Si más del 20% de los tramos cuentan con una insuficiencia de peralte de $1,10 * I_{adm}$ se realiza un análisis unidimensional. Si la condición se cumple para el $20 \pm 5\%$ de todos los tramos de vía, se aplica el análisis estadístico bidimensional.

4.8.3. Tratamiento de datos. Comparativa de las Normas.

Según lo indicado en la Norma rusa, no se contempla la posibilidad de un análisis bidimensional. Por otro lado, si se contraponen el método ruso con el análisis unidimensional, se puede llegar a la conclusión de que este último es más conservador al multiplicar por 3 o por 2,2 la desviación típica, mientras que el tratamiento dado por la Norma rusa consiste en tomar la media aritmética de las tres amplitudes máximas, siendo estas amplitudes máximas la mitad del valor del rango obtenido por Rainflow o ciclos completos.

Tomando como ejemplo los datos que sirvieron para explicar el método Rainflow, se obtendría, aplicando dicho método, un ciclo completo de valor 8 y otro de valor 4, lo que da un valor de 3 al calcular la media aritmética de las amplitudes máximas.

Si para estos datos se calcula la media y la desviación típica y se aplica la expresión $Y(PA)_{max} = \bar{y} + kS_y$ para $k=3$, se obtiene un valor máximo estimado de 8,85. Si se aplica $K=2,2$, se obtiene 6,52. Con estos sencillos valores numéricos se demuestra que el método estadístico de la Norma EN es más conservador que el GOST R al maximizar los valores de manera sustancial.

Datos	-2	1	-3	5	-1	3	-4	4	-2
--------------	----	---	----	---	----	---	----	---	----

Tabla 22. Valores según fig. 29.

Tratamiento estadístico	Valor
GOST R. Rainflow	3
EN unidimensional. Seguridad en circulación (k=3)	8,85
EN unidimensional. Solicitación a vía o Calidad de marcha (k=2,2)	6,52

Tabla 23. Valores según los distintos tratamientos.

*Nota: valor medio 0,11 y desviación típica de 2,91.

Como la Norma GOST R establece que se excluye la componente cuasiestática, resulta más adecuado utilizar una serie de datos que tengan de media cero:

Datos	-2	1	-3	5	-1	3	-4	4	-3
-------	----	---	----	---	----	---	----	---	----

Tabla 24. Valores para ejemplo de media cero.

Tratamiento estadístico	Valor
GOST R. Rainflow	3
EN unidimensional. Seguridad en circulación (k=3)	9
EN unidimensional. Solicitación a vía o Calidad de marcha (k=2,2)	6,6

Tabla 25. Valores según los distintos tratamientos.

*Nota: valor medio 0 y desviación típica de 3.

Como conclusión de este apartado se establece que, aplicando el método Rainflow, el valor calculado está dentro del rango de la muestra estudiada. Sin embargo, el método de tratamiento de datos de la EN que multiplica por 2,2 o por 3 la desviación típica, hace que el valor resultante esté por encima de los valores de la muestra, por lo que lo hace más conservador que el método ruso, ya que mayor los datos obtenidos.

5. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.

5.1. Conclusiones

- En **seguridad en circulación** la Norma europea es más restrictiva que la rusa.
- En **solicitud a la vía** la Norma rusa, a priori, es más restrictiva que la europea, aunque teniendo en cuenta el tratamiento de los valores obtenidos en los ensayos, un vehículo ferroviario que cumpla con la Norma EN también cumple con los requisitos de la Norma GOST R. Adicionalmente, en este apartado existen aspectos en ambas Normas que no son comparables entre sí.
- Los criterios de **confort o comodidad** no son comparables.
- Las Normas GOST R relacionan los valores de los índices dinámicos con los **requisitos estructurales**. La Norma EN trata por separado ambos aspectos, el dinámico y el estructural.
- Los **requisitos de ensayo** indicados en las Normas rusas pueden asemejarse a los ensayos completos de la Norma EN.

5.2. Aportaciones

Seguridad en circulación.

La Norma EN considera para la seguridad en circulación los siguientes aspectos:

- Criterio de inestabilidad. ΣY_{rms} (suma de los valores cuadráticos medios de las fuerzas de guiado) o H_{rms} (suma de los valor cuadráticos medios de las fuerzas transversales en las cajas de grasa).
- Criterio de descarrilo/ Criterio de Nadal (Y/Q o L/V).
- Ripado de vía ΣY (suma de fuerzas directrices de guiado) o H (suma de fuerzas transversales en la caja de grasa).
- Descarga de las ruedas $\Delta Q/Q$.

La Norma GOST R considera para la seguridad en circulación:

- Criterio de inestabilidad I_{dhor} (indicador de dinámica horizontal).
- Criterio de descarrilo λ .
- Ripado de vía I_{dhor} (indicador de dinámica horizontal).

Como se ha visto en los puntos anteriores, el criterio de inestabilidad y el criterio de ripado de vía establecido por la Norma EN son más conservadores que el establecido en la GOST R (I_{dhor}). De igual forma, el criterio de descarrilamiento de la Norma europea (Nadal) es más conservador que el coeficiente de seguridad al descarrilamiento de la Norma rusa (λ). Si a lo indicado anteriormente se le añade el tratamiento estadístico de los datos de la Norma EN frente a la GOST R, en cuanto a que la

primera pondera más a la alza los valores obtenidos que la segunda, se ratifica que **en términos de seguridad en circulación, un vehículo ferroviario que cumpla con los requisitos de la EN 14346 también cumplirá con los requisitos GOST R 55495 y GOST R 55496.**

Solicitud a la vía.

En cuanto a la solicitud a la vía, la Norma rusa establece:

- Índice de dinámica vertical para la suspensión primaria I_{d1} .
- Índice de dinámica vertical para la suspensión secundaria I_{d2} .

La Norma europea tiene como parámetros de referencia:

- Fuerza de guiado cuasi-estática Y_{qst}
- Carga de la rueda cuasi-estática Q_{qst}
- Carga de rueda máxima Q_{max}

En este caso la Norma rusa es más restrictiva que la Norma europea al comparar los parámetros I_{d1} y Q_{max} como se ha demostrado. No obstante, dado el tratamiento estadístico de la Norma rusa, menos conservador que el de la europea, un vehículo ferroviario conforme a la Norma EN, también cumple con la Norma GOST R al comparar los parámetros I_{d1} y Q_{max} .

Los valores de fuerza de guiado cuasi-estática (Y_{qst}) y la carga en la rueda cuasi-estática (Q_{qst}) no se contemplan en la Norma rusa. Adicionalmente, el índice de dinámica vertical para la suspensión secundaria I_{d2} de la Norma GOST R no tiene homólogo o parámetro comparable en la Norma EN.

Por lo que **un vehículo ferroviario bajo Norma europea, debe realizar ensayos y cálculos adicionales para determinar su cumplimiento con las Normas rusas y viceversa.**

Para averiguar si un vehículo que cumpla la Norma EN es también válido según la Norma GOST R, sería necesario valorar los resultados de Q_{total} contra el valor del índice de dinámica vertical de la suspensión primaria I_{d1} y realizar los ensayos y cálculos para establecer el valor del índice dinámico de suspensión secundaria I_{d2} . En el caso de un vehículo ferroviario que cumpliera los requisitos GOST R, sería necesario comparar I_{d1} con Q_{total} y realizar el análisis de Y_{qst} e Q_{qst} para determinar su grado de cumplimiento con la Norma EN.

Calidad de marcha.

Los planteamientos de las Normas estudiadas son muy diferentes, por lo que **no es posible una comparación.** La Norma EN valora el confort analizando la **calidad de marcha** (*Nivel de aceleraciones de caja en el rango de 0,4 a 10 Hz*) y las Normas GOST R realizan un análisis de la **comodidad media** (*nivel de aceleraciones de caja ponderadas*) similar al método de Sperling, por lo que **no es posible realizar una comparativa** e intentar establecer equivalencias.

Cálculo estructural de los componentes de rodadura. Relación con los índices dinámicos.

La principal diferencia en ambas Normas es que **la EN realiza un tratamiento por separado de los requisitos dinámicos y de los requisitos estructurales**, sin embargo **la Norma GOST R relaciona los índices dinámicos I_{dhor} , I_{d1} e I_{d2} con los requisitos estructurales**, de manera que si un vehículo ferroviario tiene un margen de cumplimiento en el apartado de la dinámica, ese margen mejora el cumplimiento del requisito estructural.

Ensayos.

Los ensayos indicados en la Norma rusa para la determinación de I_{dhor} , I_{d1} , I_{d2} , λ , W_z y W_y se realizan para estados vacío y cargado, en movimiento marcha directa y marcha atrás. La Norma GOST R busca la realización de los ensayos en todos los estados del vehículo y todas las combinaciones de condiciones de ensayo, por lo que se podrían asemejar o equipararse a los ensayos completos en línea de la Norma EN.

Para comparar los ensayos de ambas Normas, se ha tenido en cuenta: método, condiciones de vía, velocidad y estados de carga.

El ensayo por el método completo sería comparable a los ensayos y condiciones de la Normativa rusa. No obstante para realizar un análisis concluyente es necesario estudiar cada uno de los parámetros o indicadores utilizados.

BIBLIOGRAFÍA.

UNE-EN 14363:2005. ‘Aplicaciones ferroviarias. Ensayos para la aceptación del comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios. Ensayos en línea y en parada’. Ed. AENOR.

UNE-EN 13749:2006. ‘Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie’. Ed. AENOR.

UNE-EN 12299: 2009. ‘Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación’. Ed. AENOR.

UNE-EN 15827:2011. ‘Aplicaciones ferroviarias. Requisitos para bogies y órganos de rodadura’. Ed. AENOR.

GOST R 55495-2013. Trenes autopropulsados. Requisitos de resistencia y características dinámicas.

GOST R 55496-2013. Trenes autopropulsados. Ensayos dinámicos y de resistencia.

GOST 25.101-83. Cálculo de resistencia y pruebas. Representación de carga aleatoria de elementos y estructuras y evaluación estadística de los resultados.

N CP-515 de 14 de octubre 1997. Evaluación de vía férrea. Ed. Ministerio de Ferrocarriles de Rusia.

EMILIO GARCÍA (2013). ‘Apuntes de la asignatura Dinámica Ferroviaria’. Máster Universitario de Sistemas Ferroviarios de la Universidad Pontificia de Comillas (ICAI).

IWNICKI SIMON (2006) ‘Handbook of Railway Vehicle Dynamics’. Ed. Taylor and Francis Group.

ANDERSSON EVERT; BERG MATS; STICHEL SEBASTIAN. ‘Rail Vehicle Dynamics - Fundamentals and Guidelines’. Ed. BT sites Västerås and Helsingborg in cooperation with the Technical University KTH Stockholm, Division of Railway Technology.

GARG VIJAY K. GARG; DUKKIPATI RAO V. (1984). ‘Dynamics of railway systems’. Ed. Academic Press Canada.

WILSON NICHOLAS; FRIES ROBERT; WITTE MATTHEW, HAIGERMOSER ANDREAS;
WRANG MIKAEL; EVANS JERRY; ORLOVA ANNA. (2011). 'Assessment of safety against
derailment using simulations and vehicle acceptance tests: a worldwide comparison of state-of-art
assessment methods'. Ed. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and
Mobility

WEINSTOCK HERBERT. 'Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety'. Ed.
The American Society of Mechanical Engineers.