Metodología para evaluar infraestructura ferroviaria en Costa Rica basada en el sistema ferroviario de Alemania

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Metodología para evaluar infraestructura ferroviaria en Costa Rica basada en el sistema ferroviario de Alemania

Llevado a cabo por el estudiante:

Fallas Rodríguez Josafath

Carné: 2017083974

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el viernes 29 de noviembre de 2024 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

MANUEL ANTONIO ALLAN ZUÑIGA (FIRMA)

Firmado digitalmente por MANUEL ANTONIO ALLAN ZUÑIGA (FIRMA)
Fecha: 2024.11.29 17:52:55 -06'00'

Ing. Manuel Alán Zúñiga, MGP, MBA
Representante Director de Escuela

GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA)

Firmado digitalmente por GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2024.11.29 09:35:02 -06'00'

Ing. Giannina Ortíz Quesada, MSc.
Profesor Guía

MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)

Firmado digitalmente por MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2024.11.29 09:06:00 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Lector

MAURICIO ESTEBAN ARAYA RODRIGUEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por MAURICIO ESTEBAN ARAYA RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2024.11.29 10:48:10 -06'00'

Ing. Mauricio Araya Rodríguez
Profesor Observador

Resumen

En su momento Costa Rica fue un país pionero en el desarrollo de los ferrocarriles en su región, sin embargo, perdió ese liderazgo con el paso del tiempo, en el continente europeo Alemania fue pionero en su región y todavía hoy continúa siendo uno de los países con más prestigio en la industria, este informa explora el proceso y resultados para desarrollar un sistema de evaluación de la infraestructura del primer país, basado en el sistema del segundo.

El proyecto está enmarcado en una propuesta macro que contempla futuras etapas, para desarrollar un plan piloto y puesta en marcha por parte del operador local. En esta primera etapa se desarrolló una herramienta que permite al operador férreo identificar los parámetros que deben evaluarse en los elementos de la superestructura con el propósito de un adecuado mantenimiento, así como a su vez le permite en la mayoría de los casos conectar esta información con procesos estandarizados para su medición o bien procesos que están desarrollo por investigadores o instituciones de prestigio en el sector.

El proyecto se completó a satisfacción, desarrollando una herramienta con gran potencial para apoyar los ideales costarricenses de progreso social y protección del medio ambiente.

Palabras Clave: *Infraestructura ferroviaria, superestructura ferroviaria, balasto, traviesas o durmientes, rieles, sistemas de evaluación, sistemas de gestión, trenes en Alemania, trenes en Costa Rica.*

Abstract

At the time Costa Rica was a pioneer in the development of railroads in its region, however, it lost that leadership with the passage of time, in the European continent Germany was a pioneer in its region and still today remains one of the most prestigious countries in the industry, this report explores the process and results to develop an infrastructure evaluation system of the first country, based on the system of the second.

The project is framed in a macro proposal that contemplates future stages, to develop a pilot plan and implementation by the local operator. In this first stage, a tool was developed that allows the railway operator to identify the parameters that must be evaluated in the elements of the superstructure for the purpose of adequate maintenance, as well as to connect this information in most cases with standardized processes for its measurement or processes that are developed by researchers or prestigious institutions in the sector.

The project was completed to satisfaction, developing a tool with great potential to support the Costa Rican ideals of social progress and environmental protection.

Keywords: *Railway infrastructure, railway superstructure, ballast, ties or sleepers, rails, evaluation systems, management systems, trains in Germany, trains in Costa Rica.*

Metodología para evaluar infraestructura ferroviaria en Costa Rica basada en el sistema ferroviario de Alemania

JOSAFATH FALLAS RODRÍGUEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre de 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

CONTENIDO ---------- V
AGRADECIMIENTOS ---------- 6
RESUMEN EJECUTIVO ---------- 7
INTRODUCCIÓN ---------- 11
Antecedentes ---------- 11
Objetivos ---------- 12
Alcance y limitaciones ---------- 12
Estructura del informe ---------- 13
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO ---------- 14
1.1 Historia de la Industria ferroviaria en Costa Rica ---------- 14
1.2 Historia de la Industria ferroviaria en Alemania ---------- 21
1.3 Sistema ferroviario ---------- 26
1.4 Mecánica de las vías con Balasto ---------- 33
1.5 Balasto ---------- 36
1.6 Traviesas ---------- 41
1.7 Rieles ---------- 47
1.8 Sistemas de evaluación ---------- 57
1.9 Sistemas de Mantenimiento y/o evaluación ferroviaria ---------- 58
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA ---------- 63
2.1 Recopilación de información ---------- 63
2.2 Gestor de información y referencias ---------- 66
2.3 Análisis de información ---------- 68
CAPÍTULO 3: RESULTADOS ---------- 69
3.1 Propiedades evaluables de los elementos de la infraestructura usadas para determinar su calidad ---------- 69
3.2 Equipos y maquinaria utilizada en procesos de inspección y/o evaluación para determinar la calidad de los elementos estudiados ---------- 73
3.3 Matriz de evaluación (Gestor) ---------- 81
3.4 Manual de procedimientos ---------- 93
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS ---------- 95
4.1 Propiedades evaluables de los elementos de la infraestructura usadas para determinar su calidad ---------- 95
4.2 Equipos y maquinaria utilizada en procesos de inspección y/o evaluación para determinar la calidad de los elementos estudiados ---------- 97
4.3 Matriz de evaluación y manual de procedimientos ---------- 99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ---------- 101
Conclusiones ---------- 101
Recomendaciones ---------- 102
REFERENCIAS ---------- 103
APÉNDICES ---------- 111
Apéndice A. Equipos de inspección usados en Alemania ---------- 112
ANEXOS ---------- 115
Anexo A. EN 13230-1:2016. Anexo F (Informativo) ---------- 116
Anexo B. EN 17397-1:2021. Anexos A y B (Informativos) ---------- 119

Agradecimientos

Agradezco a Dios, quien siempre me sustenta,
agradeciendo su fidelidad para mi vida, a Él dedico este trabajo.

A mis padres, Carlos Fallas y Floribeth Rodríguez, gracias por siempre
apoyar y soportar las locuras de un hijo que deseo soñar fuera de lo común.
A mi hermana Keren Fallas, gracias infinitas por abrir camino para un hermano
pequeño que siempre ha contado con el oído de su hermana para hablar, reír o llorar
¡¡GRACIAS FAMILIA!!

Especial agradecimiento:
a la Mtr.-Ing. Giannina Ortíz, por creer en esta idea,
al Dr.-Ing. Lutz Gaspers y al Mtr.-Ing. Dennis Dreher, por recibirme en Alemania
y haberme facilitado recursos para el desarrollo del proyecto.

Resumen ejecutivo

El informe aborda el desarrollo de una propuesta para ser usada como sistema de evaluación para la infraestructura ferroviaria de Costa Rica, inspirado en el modelo alemán. Se enmarca en una propuesta macro con futuras etapas, para desarrollar un plan piloto y puesta en marcha por parte del operador local. En esta primera etapa se desarrolló una herramienta que permite al operador férreo identificar los parámetros que deben evaluarse en los elementos de la infraestructura férrea. La herramienta conecta estos parámetros con procesos de medición estandarizados o en desarrollo.

El proyecto se completó satisfactoriamente desarrollando una herramienta con gran potencial para apoyar los ideales costarricenses de progreso social y protección del medio ambiente, enmaracados en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

Costa Rica fue un país pionero en el desarrollo férreo en su región, iniciando su historia en el siglo XIX, su mayor crecimiento se dio a finales de este siglo y a inicios del siglo XX, se detuvo su avance debido al cierre técnico del Instituto Costarricense de Ferrocarriles en el año 1995, los servicios de carga se retomaron en el año 1998 y los de pasajeros en el 2005 (Fallas et al., 2017), esto produjo un grave afectación a las labores de mantenimiento, por lo que actualmente la condición de las vías y servicios se considera obsoleta y deficiente

En la Figura 1 se observa la ruta de reactivación de rutas, que a su vez muestra la red actual.

Figura 1. *Esquema de reactivación de vías férreas en Costa Rica al 2017.*

Fuente: Adaptado de: MAPA RUTA REACTIVACIÓN [Mapa] por Fallas et al., 2017d, LA NACIÓN. (https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/tercera_entrega/imgs/mapa_ruta_reactivacion.png?hash=16112017v1).

Entre tanto Alemania fue muy poca la merma que tuvo en el avance de su historia, la industria ferroviaria en Alemania vio sus inicios y tuvo un rápido desarrollo en el siglo XIX y su crecimiento fue exponencial a principio

del siglo XX, luego decayó a partir de la mitad de este siglo, durante el siglo XXI el crecimiento ha sido poco, pero constante; al 2020 se tenía registro de más de 34 000 km de vías operativos en toda la red ferroviaria alemana (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-b; Menius & Matthews, 2020).

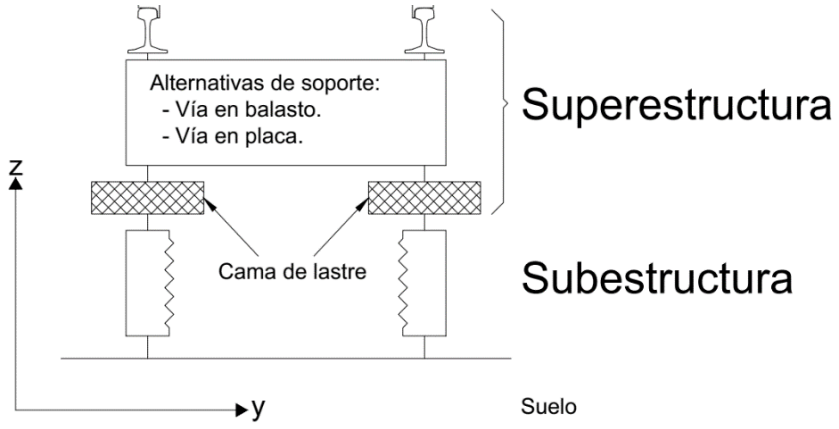
Sistemas de evaluación, mantenimiento y/o gestión

Un sistema de inspección (o evaluación) se define como un conjunto de “Reglas, procedimientos y gestión para realizar la inspección” (Organización Internacional de Normalización, 2012a) de modo que a través de este y de forma imparcial se pueda identificar la conformidad o no de los elementos inspeccionados, entre tanto, la definición que se usa para un sistema de mantenimiento parte y está relaciona con la definición de sistema de gestión de calidad, especificando más en garantizar la seguridad en el tiempo del elemento al que se aplica el sistema, “es un conjunto completo de especificaciones técnicas, organizativas y de otro tipo para el cumplimiento del mantenimiento” (European Committee for Standardization, 2019) (de la infraestructura férrea, en este caso). El proyecto se limita a procesos para evaluar/inspeccionar, no a la completa gestión del mantenimiento, sin embargo, muchos de los conceptos entre mantenimiento y evaluación son compartidos, por lo que es de relevancia que sean consultados por el lector.

Componentes de la infraestructura férrea

Los componentes estructurales de un sistema ferroviaria pueden ser tan variados como en sí mismo lo es el sistema, bajo la óptica del proyecto estos se puedes reducir a los dos presentados en la Figura 2

Figura 2. *Sección transversal típica de una vía ferroviaria.*



Fuente: Adaptado de Lichtberger, p. (2010, p. 21).

El proyecto se enfocó enfocó en los elementos de la superestructura, al estudiarse vías con balasto, se analizaron los elementos de rieles, traviesas y rieles. Para cada uno se realizó una compilación de propiedades que pueden ser evaluadas para determinar su estado, así como las normas y/o reglamentos que le regulan,

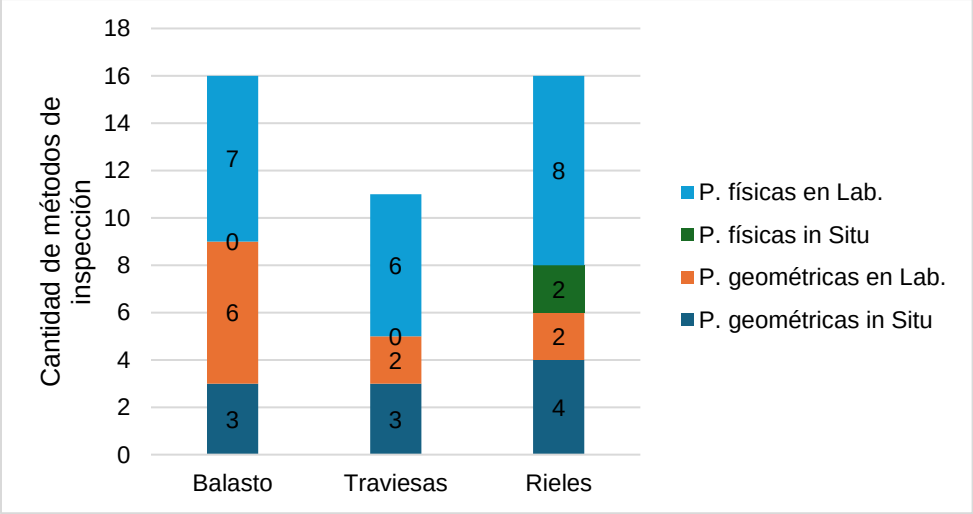
esto fue realizado a través de una amplia investigación bibliográfica compilada en una herramienta dinámica, llamada “Gestor”, misma que fue elaborada en el programa informático Excel.

Con la información aportada por las normas europeas, las normas ISO, las normas y/o reglamentos de la Deutsche Bahn y otras investigaciones asociadas con la temática desarrollada, se generó una base de datos amplia, con esta se realizó inicialmente un análisis individual de los textos para identificar y extraer aquellos datos que efectivamente sean relevantes para la investigación; mediante el método del análisis mecanicista se comprendieron las variaciones que existen entre los diferentes resultados de investigaciones y/o normas, de esta forma se pudo también identificar las maneras para equiparar cuando existen diferencias marcadas entre los datos. Finalmente, con el análisis factorial se consideraron aquellos factores que no se incluyen en las normas o reglamentaciones, pero que sí han sido estudiados por otros investigadores.

A modo de guía de usuario la herramienta se acompañó por explicaciones en prosa y/o diagramas de flujo que establecerán su funcionamiento, los medios para su adaptación y los procesos para realizar cada una de estas actividades, esta guía se llamó Manual de procesos. Dentro del manual se incluyen imágenes e información de referencia extra al gestor, con esto el usuario tiene mayor claridad respecto a la metodología y procedimientos que debe seguir en su implementación.

En la Figura 3 se puede observar un gráfico que resume las propiedades analizadas para cada elemento, en el particular aquellas que se evalúan con métodos de inspección normados.

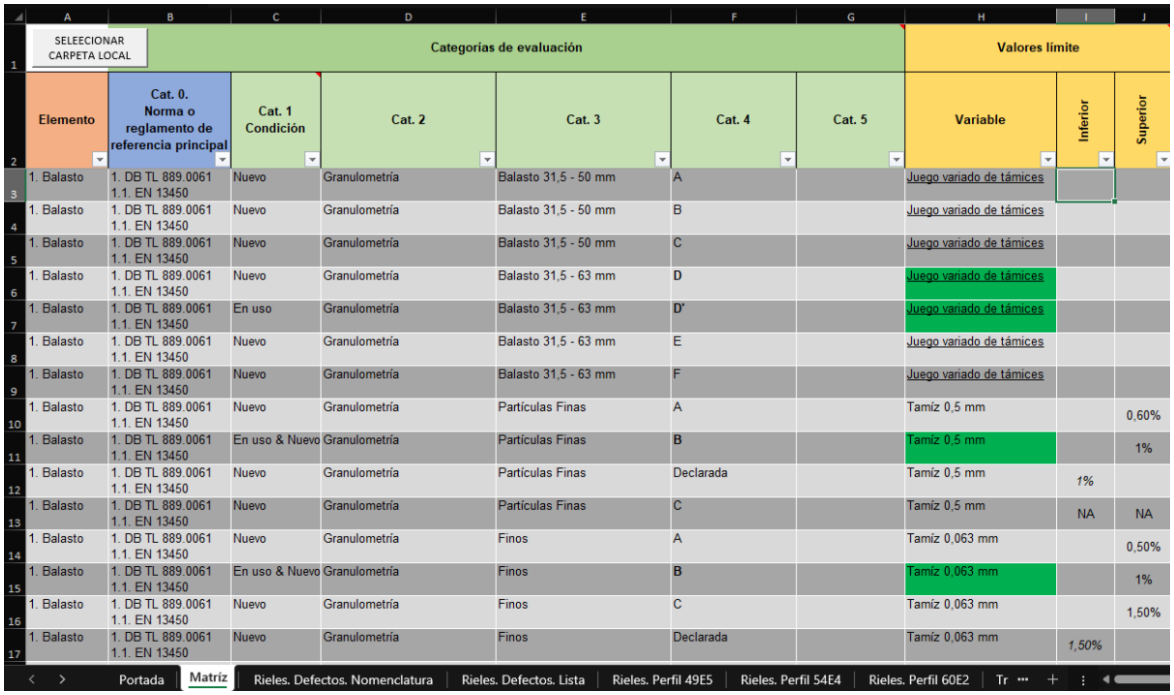
Figura 3. *Métodos de inspección normados que evalúan propiedades de los elementos de la superestructura férrea*



La información de la Figura 3 está ligada directamente con la información que se condensa utilizando en el gestor, para este se utilizó el formato de Tabla de Excel, mediante el cual el usuario puede filtrar según sus requerimientos la información que requiera, el primer filtro corresponde a los elementos incluidos, hasta llegar a la categoría 5 que apunta directamente a las variables que evalúan las propiedades respectivas.

Una sección de la vista de la matriz del gestor elaborado se presenta en la Figura 4. Utilice este enlace para descargar los archivos adjuntos (Matriz de evaluación, Manual de procedimientos y más), correspondientes a los resultados de este proyecto.

Figura 4. *Vista Parcial de la matriz elaborada*



SELEECIONAR CARPETA LOCAL			Categorías de evaluación				Valores límite		
Elemento	Cat. 0. Norma o reglamento de referencia principal	Cat. 1 Condición	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Variable	Inferior	Superior
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 50 mm	A		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 50 mm	B		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 50 mm	C		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	D		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	En uso	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	D'		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	E		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	F		Juego variado de támices		
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	A		Tamíz 0,5 mm		0,60%
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	En uso & Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	B		Tamíz 0,5 mm		1%
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	Declarada		Tamíz 0,5 mm	1%	
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	C		Tamíz 0,5 mm	NA	NA
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Finos	A		Tamíz 0,063 mm		0,50%
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	En uso & Nuevo	Granulometría	Finos	B		Tamíz 0,063 mm		1%
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Finos	C		Tamíz 0,063 mm		1,50%
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Finos	Declarada		Tamíz 0,063 mm	1,50%	

Portada | Matríz | Rieles. Defectos. Nomenclatura | Rieles. Defectos. Lista | Rieles. Perfil 49E5 | Rieles. Perfil 54E4 | Rieles. Perfil 60E2 | Tr

Dentro del gestor se alcanzó un alto nivel de detalle para el balasto y traviesas, para los rieles no fue posible desarrollar todos los procesos que tipifican sus defectos.

Considerando que este proyecto desarrolló una primera fase de un posible macroproyecto y a pesar de los inconvenientes que representó no tener acceso a ciertos reglamentos de la DB, fue posible desarrollar una herramienta robusta que guía al operador férreo costarricense en las propiedades que debe evaluar, las normas/reglamentos y las investigaciones que debe consultar para poder realizar una evaluación eficiente de su red.

Cuando se vaya a implementar la herramienta desarrollada, se recomienda encarecidamente que contacte al autor de este trabajo para participar en el proceso y beneficiar no sólo al operador con su sistema, sino también continuar aportando a la sociedad con investigación desde la academia.

Introducción

El presente informe es el reflejo de la labor realizada para crear una metodología de evaluación para infraestructura férrea en Costa Rica basándose en el sistema alemán, a pesar de en Costa Rica no contar con un sistema de las magnitudes como el alemán, se buscó tomar de referencia a uno de los países que ha sido referente a nivel global para que en el futuro Costa Rica pueda ser pionero nuevamente en su región.

Antecedentes

La red ferroviaria en Alemania vio sus inicios y tuvo un rápido desarrollo en el siglo XIX y su crecimiento fue exponencial a principio del siglo XX, luego decayó a partir de la mitad de este siglo, durante el siglo XXI el crecimiento ha sido poco, pero constante; al 2020 se tenía registro de más de 34 000 km de vías operativos en toda la red ferroviaria alemana (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-b; Menius & Matthews, 2020).

La industria ferroviaria en Costa Rica tuvo su inicio en el siglo XIX, su mayor crecimiento se dio a finales de este siglo y a inicios del siglo XX, se detuvo su avance debido al cierre técnico del Instituto Costarricense de Ferrocarriles en el año 1995, los servicios de carga se retomaron en el año 1998 y los de pasajeros en el 2005 (Fallas et al., 2017), esto produjo un grave afectación a las labores de mantenimiento, por lo que actualmente la condición de las vías y servicios se considera obsoleta y deficiente .

Investigadores tales como F. Chen et al. (2000) y M. Chen et al. (2012) han propuesto en el pasado algunos modelos de gestión ferroviaria, por su parte, en la investigación de Wilk & Li (2023) se analizan diferentes sistemas usados para medir propiedades del balasto. Existe una gran cantidad de sistemas e investigaciones realizadas de previo enfocadas en elementos particulares del sistema ferroviario, sin embargo, no se ha encontrado una herramienta que condense esto para más de uno o dos elementos de forma simultánea.

En el Capítulo 1: se exponen los antecedentes históricos del ferrocarril en ambas naciones, así como también el estado del arte respecto al funcionamiento de los sistemas ferroviarios, sus sistemas de evaluación y normativa aplicable a los elementos de infraestructura cubiertos en este proyecto.

Es importante entender desde el inicio que la industria del transporte es responsable de aproximadamente el 30% de las emisiones globales de CO_2 (ONU, 2022). Por lo tanto, desarrollar una metodología para evaluar la infraestructura ferroviaria puede ayudar a reducir estas emisiones, ya que un sistema ferroviario operando en condiciones óptimas tiende a generar menos contaminantes ambientales.

También tener sistemas de transporte más eficientes conlleva a reducir costos, así como a mejorar la comodidad y calidad de los servicios. Esto, a su vez, contribuye al progreso de algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (ONU, s/f). Se ven beneficiados profundamente aquellos ODS relacionados con la calidad de vida de las personas y la consideración ambiental, aunque el mayor de todos es el ODS 9, en Costa Rica se requiere innovar y llevar la infraestructura al siguiente nivel, para esto es necesario mirar y aprender de aquellos países que han tenido gran progreso en estas tareas, tal el caso de Alemania.

Objetivos

En función de los antecedentes y la relevancia del proyecto para la industria se definió como objetivo general: Desarrollar una metodología de evaluación para infraestructura ferroviaria en Costa Rica, mediante un análisis multicriterio de las variables que le inciden basado en el sistema ferroviario de Alemania.

De manera estratégica para alcanzar a satisfacción el producto esperado de este proyecto se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las propiedades que determinan la calidad de elementos de la infraestructura ferroviaria, mediante un estudio bibliográfico.
- Identificar los medios utilizados para la evaluación de las propiedades que determinan la calidad de elementos de la infraestructura ferroviaria, mediante un análisis bibliográfico.
- Elaborar una matriz multicriterio que permita evaluar las propiedades que determinan la calidad de los elementos de la infraestructura ferroviaria utilizando los medios seleccionados para este fin.
- Proponer los procesos para la correcta aplicación de la matriz de evaluación de la calidad de infraestructura desarrollada, completando así la metodología de evaluación.

Alcance y limitaciones

El proyecto se aborda desde una perspectiva teórica y práctica, más adelante en el Capítulo 2: se aborda a detalle la metodología desarrollada durante el proyecto. El abordaje teórico se realiza mediante la revisión de literatura alemana, mientras que el acercamiento práctico se realiza gracias a la colaboración de INCOFER, que es la compañía encargada de la construcción y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria en CR.

La investigación condensa normativa costarricense, alemana e internacional, así como resultados obtenidos en investigaciones previas; con esta información se propone de forma teórica la metodología de evaluación objeto del proyecto.

Un sistema ferroviario se compone de una gran cantidad de elementos, aun cuando estos se reducen a la infraestructura solamente, es por esto por lo que en este proyecto se limita el alcance primeramente a infraestructura (no se consideran los servicios de transporte públicos o privados) y en concordancia, se abordan

únicamente tres elementos de esta: el *balasto*, las *traviesas* y los *rieles*, no se incluyen los elementos de fijación entre los rieles y las traviesas. Dentro de cada uno de estos elementos se limita el alcance del proyecto a su comportamiento mecánico; abordando de forma superficial la interacción entre estos entre sí mismos y/o con su entorno.

Respecto de los sistemas, mecanismos y equipos utilizados para evaluar las estructuras definidas se consideran únicamente aquellos que permitan generar resultados de forma cuantitativa, no se consideran representativos aquellos que dependan de forma directa de una interpretación cualitativa. Durante la ejecución del proyecto no se ejecutó ninguna prueba de campo ni recopiló datos de campo de forma directa, por lo que todos los datos utilizados provienen de las fuentes citadas correspondientemente.

De forma general, este proyecto se considera una primera etapa, ya que los resultados obtenidos deben ser probados para verificar la funcionalidad de la herramienta propuesta, lo que podrá ser desarrollado por otros proyectos o bien, etapas de expansión del proyecto por el autor.

Estructura del informe

El informe está redactado de manera que el lector pueda pasar de lo general a lo específico, esto se procura en cada uno de los cuatro capítulos principales, en el Marco Teórico se empieza desde la historia de los ferrocarriles en ambas naciones, pasando luego por lo relativo a cada elemento en estudio y cerrando con la teoría de sistemas de gestión y mantenimiento.

En el Capítulo 2, se expone la metodología utilizada para alcanzar los objetivos de este proyecto, misma que está basada en un sistema especializado para investigaciones bibliográficas.

Los Capítulos 3 y 4, siguen una estructura similar entre sí, enfocados ambos en el desarrollo de los objetos de estudio, el Cap. 3 aborda los resultados obtenidos y el 4 analiza su relevancia, alcances y posibles consideraciones para el futuro.

Finalmente, se presentan las conclusiones y referencias, para cerrar se incorporan los apéndices y anexos, se recomienda consultar ambos para ampliar conocimiento y una mejor comprensión de los resultados.

Capítulo 1: Marco Teórico

Tal como se indicó de previo en este capítulo se exponen los antecedentes históricos, conceptos básicos respecto a los ferrocarriles, normativa nacional e internacional correspondientes a Costa Rica (cuando existe) y Alemania, así como el estado del arte respecto a sistemas de evaluación para los elementos estudiados.

1.1 Historia de la Industria ferroviaria en Costa Rica

Costa Rica fue país pionero en el desarrollo de los ferrocarriles en su región, según recopila Sáenz (1911) “Costa Rica habría tenido la gloria de ser el primer campo de ensayo para un descubrimiento destinado a transformar las condiciones de existencia de la humanidad entera”, haciendo referencia a las conversaciones que plateaban la posibilidad de construir una ruta férrea desde la capital del país hasta el punto donde el río Sarapiquí es navegable; este dialogo se dio en los años 1822-1827 con el señor Richard Trevithick a quien hoy se le atribuye la invención de la locomotora de vapor.

No fue sino hasta el año 1854 que se construyó la primera línea férrea del país, siendo esta un tranvía que conectó las ciudades de Barranca y Puntarenas, no obstante, este cayo en el abandono (Sáenz, 1911). En el país se implementó un *ancho de la vía* de 1066 mm, el cual es considerado como *vía estrecha* al compararlo con el ancho internacional de 1435 mm; este ancho todavía se conserva en la actualidad.

De seguido se detallan el desarrollo de la industria y la situación actual.

1.1.1 Desarrollo de la industria

La industria ferroviaria costarricense vio sus inicios con el propósito de brindar servicio de transporte de pasajeros, a pesar de esto, fue el transporte de mercancías el combustible que promovió la construcción de las principales líneas del país (Sáenz, 1911). De forma general la industria se organizó por mucho tiempo en tres regiones, en función de las compañías que lo administraron durante finales del siglo XIX e inicios del siglo XX.

1.1.1.1 Sector: Atlántico

El primer ferrocarril a nivel a país, que sería el precursor del hoy llamado ferrocarril al atlántico, inició su construcción en el año 1871, empero, el contrato entre el señor Enrique Meiggs y el Gobierno de Costa Rica fue rescindido en el año 1873 por incumplimientos por parte del primero (Casey, 1976; Sáenz, 1911). Posterior

a esto el Gobierno asumió la tarea de completar las secciones remanentes, construyendo así 104,609 km que conectaron las ciudades de Siquirres con Cartago (43 km) y Cartago con Alajuela (61 km) (Sáenz, 1911).

En este sector mediante decreto el gobierno costarricense contrató la construcción de un *ramal* desde Siquirres hacia Riello, originalmente con una longitud de 53,109 km, de los cuales permanecieron únicamente 32,187 km conectando Siquirres con Guápiles (Sáenz, 1911).

En el año 1884 se concretó la contratación para construir las secciones remanentes, este contrato se celebró entre el Gobierno de Costa Rica y Minor Cooper Keith, la sección se extendió desde Siquirres hasta Cartago, con una longitud de 84 km. Este contrato luego evolucionó a una concesión de construcción, mantenimiento y explotación del sector Atlántico por parte de la Northern Railway Co. (a partir de este punto, referida como Northern) hasta el año 1989 (Costa Rica Railway Company Ltd. and Northern Railway Company, 1954; Sáenz, 1911).

Las obras de la línea principal se completaron en el año 1890 (Costa Rica Railway Company Ltd. and Northern Railway Company, 1954), 19 años después de las primeras obras realizadas con este propósito, dejando un ferrocarril de *vía única* con una longitud total de 188,609 km (Sáenz, 1911).

Dentro del sector Atlántico también se incluyen los ramales del Norte, que en su momento fueron desarrollados y administrados por Northern, su función principal fue la de proveer un medio de transporte para el traslado de banano hacia el puerto caribeño (Costa Rica Railway Company Ltd. and Northern Railway Company, 1954).

Las diferentes fuentes de información divergen respecto a la longitud de los ramales del Norte, basado en lo expuesto en el libro Costa Rica Railway Company Ltd.and Northern Railway Company (1954) y lo dicho por Sáenz (1911) estos ramales superaban los 185 km de extensión, considerando únicamente aquellas rutas explícitamente autorizadas por el gobierno costarricense, sin embargo, según Sáenz (1911) hubo alrededor de 40 km no registrados de forma oficial.

El contrato por el cual se había dado en concesión la explotación de las vías férreas del sector atlántico a la Northern Estaba previsto para finalizar en el año 1989, a pesar de esto, fue rescindido en el año 1972 por el gobierno del expresidente José Figueres Ferrer; trasladando las operaciones y posesiones del ferrocarril a la Junta de Administración y de Desarrollo Económico de la Vertiente Atlántica (JAPDEVA) (Fallas et al., 2017a).

Según Fallas et al. (2017a) “La nacionalización, 18 años antes de lo previsto en el contrato de concesión con la Northern Railway Company, eximió a la empresa de entregar los ferrocarriles en buen estado”. Ya para este punto se había detenido la construcción de nuevas líneas, la Northern se dedicaba principalmente a brindar mantenimiento correctivo a las vías en las secciones donde se requería (Costa Rica Railway Company Ltd. and Northern Railway Company, 1954).

Un tramo de 118 km entre Limón y Río Frio fue electrificado e inaugurado en 1982, esto ya bajo el amparo de la joven empresa estatal Ferrocarriles de Costa Rica S.A. (FECOSA) (Fallas et al., 2017a), este fue el último gran hito positivo para la industria ferroviaria en el país.

1.1.1.2 Sector: Gran Área Metropolitana (GAM)

Durante el apogeo del tren este sector se limitó a los servicios de Tranvía ofrecidos en la capital, más adelante, como se detalla en el subtema 1.1.2 Decaimiento de la industria1.1.3, este servicio desapareció y el sector GAM se combinó con el sector Pacífico.

Este tranvía tuvo una extensión total de 14,326 km, entró en operaciones en el año 1899, este contó con 5 líneas que recorrían la ciudad de San José en diferentes direcciones, brindando conexión a los ciudadanos entre los principales barrios de la capital, así como entre las estaciones de ferrocarril del Atlántico y del Pacífico. (Avendaño-Flores, 2018).

La autora Avendaño-Flores (2018) destaca como en “El año de 1881, vio funcionar al primer tranvía eléctrico en Berlín y en América Latina, en 1890 en México. Un año antes, el nueve de abril de 1899, los josefinos escucharon por primera vez el sonido de la campanilla del tranvía.”, con esto la capital costarricense se ubicó con las grandes ciudades mundiales de la época, no sólo por la tecnología eléctrica implementada en el sistema, sino también por la implementación en sí misma del sistema de transporte ferroviario.

Este servicio de transporte fue suprimido por la llegada de los vehículos de combustión a gran escala en la ciudad capital, así como la implementación del servicio de transporte de pasajeros mediante autobús, (Avendaño-Flores, 2018) recopila como tres meses de previo al cierre del tranvía los usuarios solicitaron a las municipalidades regentes del servicio la permanencia del tranvía en la capital, empero, esta solicitud fue ignorada y el servicio fue finalmente clausurado el año 1950.

1.1.1.3 Sector: Pacífico

La monopolización del transporte de carga por parte de la Northern en el sector provocó que el gobierno de Costa Rica buscará alternativas para el traslado de mercancías, en este caso hacia el puerto pacífico, se dio un luego de un gran esfuerzo político la firma del contrato para construcción del ferrocarril al pacífico con John Stephen Casement, esto en el año 1897 bajo un formato enfocado sólo a la construcción de la línea.

Las obras ya para 1902 habían logrado conectar la ciudad capital con Orotina, con marcados retrasos debidos a la agreste construcción del puente sobre el río grande de Atenas y la caída del precio del café que dificultó el financiamiento de las obras(Agüero, 2020), esto provocó finalmente que se finiquitará el contrato original, las obras se reanudaron mediante un nuevo contrato con Warren Knowlton en 1908 (Sáenz, 1911).

Finalmente, en el año 1910 se completó la sección restante entre Orotina y Puntarenas, con una extensión de 133 km, contemplando la vía principal y los ramales aledaños (Agüero, 2020; Sáenz, 1911). Esta línea férrea operaba con locomotoras de vapor, fue en 1926 cuando se empezaron obras para que este servicio se brindará empleando equipos de propulsión eléctrica, las obras se completaron en 1930 (Agüero, 2020).

La creación de FECOSA unió las operaciones -a nivel legal- del sector Pacífico con el sector Atlántico, empero, a nivel operativo se mantuvo una marcada diferencia. (Agüero, 2020; Fallas et al., 2017a)

1.1.2 Decaimiento de la industria

Con el auge del transporte por carretera, la disminución del aporte financiero del gobierno costarricense, eventos ambientales -que dañaron secciones de las vías- y el mal estado en el que se recibió la infraestructura por parte de la Northern produjo un decaimiento en la industria ferroviaria, mismo que más adelante provocaría el cierre técnico de la empresa estatal (Fallas et al., 2017a).

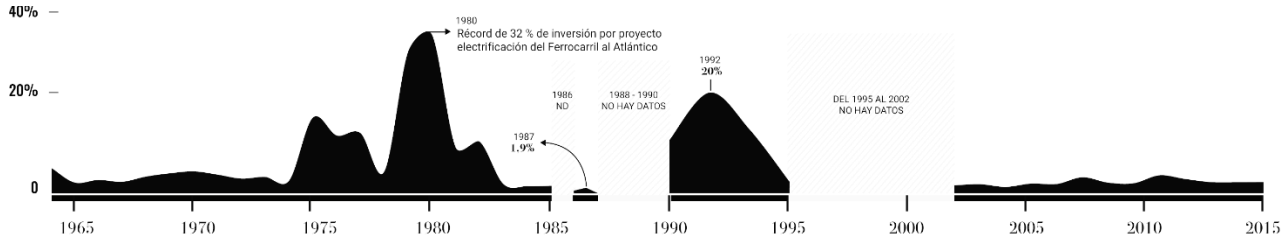
La creación de la empresa FECOSA fue una intervención de **urgencia** efectuada mediante Decreto Ejecutivo 6686 Intervención temporal de Ferrocarril (1977), para ese momento el servicio de tranvía ya había cesado, únicamente se encontraban operativos el Ferrocarril Nacional al Atlántico, operado por JAPDEVA y el Ferrocarril Eléctrico al Pacífico que lo administraba el Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico (INCOP), del primero se lee "… se encuentra próximo a una total paralización debido al deterioro progresivo de sus instalaciones fijas y del material rodante, a tal grado que existe en la actualidad la amenaza de una grave catástrofe" (Decreto Ejecutivo 6686: Intervención temporal de Ferrocarril, 1977) mientras que del segundo se expone que afrontaba problemas similares.

Con FECOSA -como se expuso de previo- se dio la última gran inversión para la industria ferroRielera de Costa Rica, la electrificación de la sección Limón – Río Frio, junto con la compra de 15 locomotoras y 320 vagones cerraron el ciclo de inversión país para el desarrollo del transporte por tren. (Fallas et al., 2017a).

Mediante la Ley 7001: Ley Orgánica Instituto Costarricense Ferrocarriles INCOFER (1985) el gobierno de Costa Rica creó el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), se rescata del artículo 1 que sus responsabilidades eran la regencia de todos los ferrocarriles del país (excepto los que estuvieran bajo alguna concesión privada) debiendo estudiar, ejecutar y administrar la red nacional con el objetivo de rehabilitar, reconstruir, rectificar, electrificar y modernizar el sistema ferroviario del país.

Para completar sus labores el INCOFER requería de una gran inversión económica, sin embargo, el Estado costarricense optó por la construcción de carreteras por sobre las vías férreas, de forma que de acuerdo con los datos recopilados por Fallas et al. (2017a) a partir de la creación FECOSA la inversión económica ferroviaria respecto a la dedicada a carreteras no superó el 20%, al contrario, se dio una marcada disminución.

Figura 5. *Inversión económica ferroviaria en el tiempo representada como porcentaje de la inversión económica en carreteras.*



Fuente: Adaptado de PRIORIDAD SOBRE ASFALTO [Gráfico] por Fallas et al., 2017, LA NACIÓN (https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/primera_entrega/imgs/carreteraYflota.png?hash=16112017v1).

El INCOFER en cumplimiento de sus obligaciones buscó opciones de financiamiento y para 1986 ya se tenía preaprobado el financiamiento para intervenir/modernizar la red nacional, la suma de los créditos superaba los $ 100 000, a pesar de esto, el Gobierno del expresidente Óscar Arias limitó las facultades de endeudamiento que podía tener esta institución y fue así como la modernización quedó fuera del alcance del INCOFER (Fallas et al., 2017a).

Las pérdidas económicas en el INCOFER se agravaron, el gobierno no giraba los fondos que por ley le correspondían, generando así grandes recortes dentro de las labores de la institución, sumado a esto hubo eventos de la naturaleza como deslizamientos que afectaron en sobremanera las líneas, el primero de estos fue el acontecido en 1990 en el tramo entre Cartago y Turrialba, esa sección nunca se rehabilitó; el segundo evento que afectaría este sector fue el terremoto de Limón de 1991, este provocó desplazamientos laterales en las vías al punto de ser incompatibles para el tránsito férreo (Fallas et al., 2017b).

Durante el año 1995 se dieron intentos en vano por parte de los jerarcas del INCOFER para mantener la institución a flote, finalmente no bastaron y el 28 de junio de 1995 el Consejo de Gobierno dirigido por el expresidente José Maria Figueres Ólsen decretó el cierre técnico de la institución (Fallas et al., 2017b)

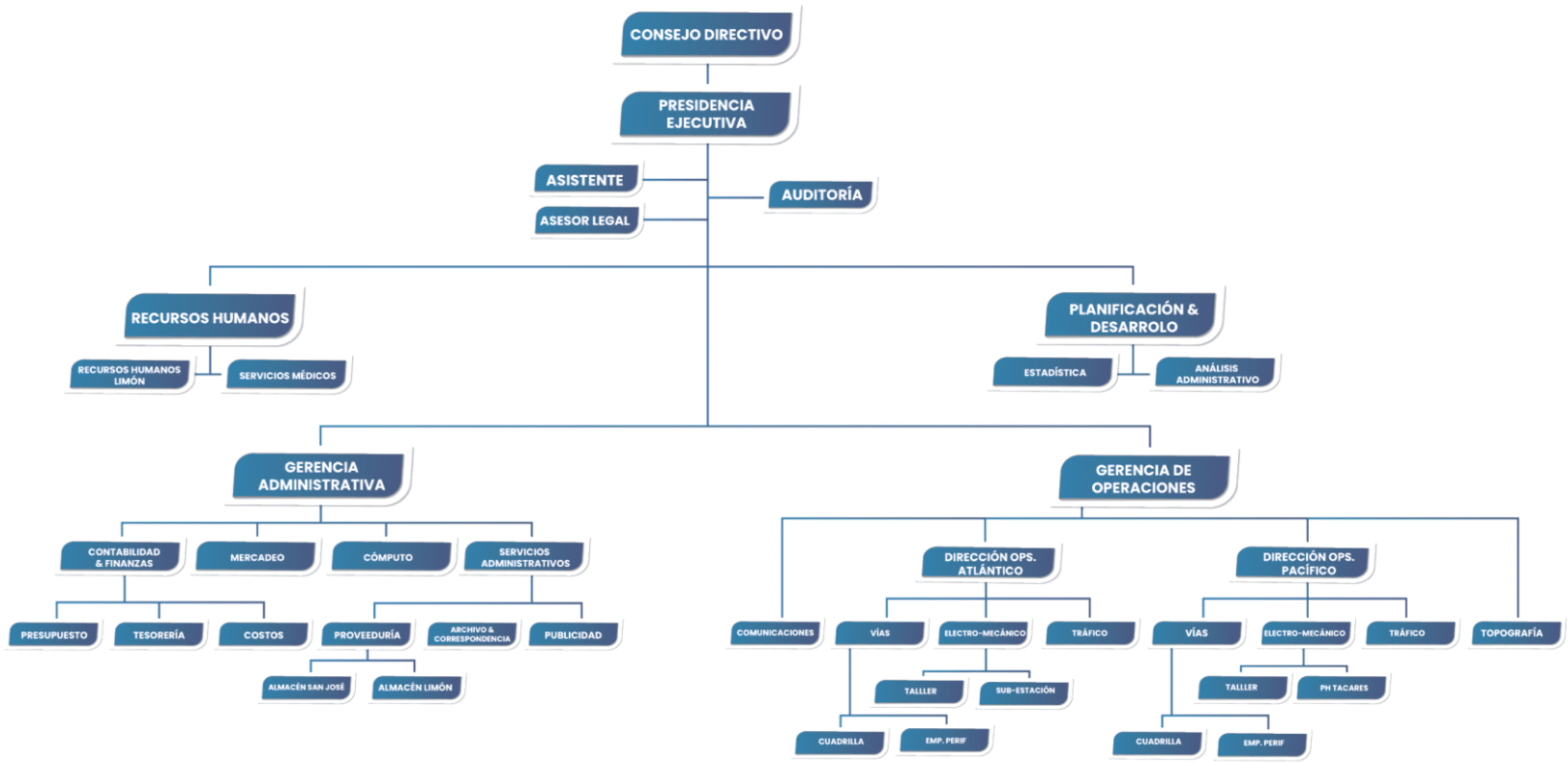
1.1.3 Situación actual

Previo a exponer el estado de la industria costarricense en el presente, se debe considerar el periodo de reactivación que hubo de previo, esto se puede resumir gracias al trabajo realizado por Fallas et al. (2017c), en la Figura 6. Esquema de reactivación de vías férreas en Costa Rica al 2017.Figura 6 se muestra una adaptación de esta información. Recientemente se habilitó una sección no incluida en esta información, la sección es de aprox. 2.5 km y conecta la ciudad de Cartago con el cantón de Paraíso, se resalta que para este tramo se implementó el sistema de Riel Largo Soldado (RLS, del inglés CWR).

Figura 6. *Esquema de reactivación de vías férreas en Costa Rica al 2017.*

Fuente: Adaptado de: MAPA RUTA REACTIVACIÓN [Mapa] por Fallas et al., 2017d, LA NACIÓN. (https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/tercera_entrega/imgs/mapa_ruta_reactivacion.png?hash=16112017v1).

Figura 7. *Organigrama del INCOFER*



Fuente: Tomado de INCOFER (2023).

La reactivación de un sistema que se encontraba y en gran parte aún se encuentra obsoleto no ha sido un reto fácil de afrontar para el INCOFER, a hoy tiene en operación más de 280 km y más de 80 km proyectados a rehabilitar según la última versión del Plan Estratégico Institucional (PEI) (INCOFER, 2018).

El sistema ferroviario de Costa Rica actualmente es regido en su totalidad por el INCOFER, por lo que es importante comprender su sistema organizativo, la Figura 7 presenta el organigrama actual de la institución, en función de este, tal como se comentó de previó la situación actual respecto al manejo operativo se rige por dos sectores, cada uno se expone de seguido.

1.1.3.1 Sector: Atlántico

El sector atlántico se limita actualmente a la gestión de carga en la provincia de Limón, siendo que la sección desde Alajuela hasta Cartago anteriormente formaba parte de este sector, ya no se contempla dentro de este sector como lo era en sus inicios. Las secciones ferroviarias contempladas actualmente son las siguientes:

- Estación Limón km 0.0 – Laminadora km 94 = 94 km
- Estación de Limón km 0.0 – Bananito km 21 = 21 km
- Empalme Monte Verde km 0.0 – Perla 2 km 18 = 18 km

En el PEI INCOFER también se condensan algunas secciones de este sector que se encuentran en proceso de rehabilitación:

- Bananito km 21 – Valle de la Estrella km 56 = 35 km
- Laminadora km 94 – San Cristóbal km 109 = 15 km

Finalmente, el PEI INCOFER detalla las secciones fuera de operación para este sector:

- Estación en Paraíso, Cartago km 140 – Las Juntas de Siquirres km 65 = 75 km
- Ramales: (1) Imperio, Carmen y San Alberto, (2) Río Frío, (3) Santa Clara y (4) Ticabán.

1.1.3.2 Sector: Pacífico y GAM

El sector Pacífico por su parte ha extendido su alcance y actualmente cubre también algunas secciones dentro de la GAM que anteriormente gestionaba el sector Atlántico, las ya mencionadas en la anterior sección. Los tramos gestionados por este sector son:

- Estación Pacífico km 0.0 – San Antonio de Belén km 14.4 = 14.4 km
- Estación Pacífico km 0.0 – Estación Atlántico (San José) = 3 km
- Estación Atlántico (San José) km 167 – Estación Alajuela km 188 = 21 km
- Estación Atlántico (San José) km 167 – Anden de la Basílica, Cartago km 146 = 21 km (*)

(*) Esta sección actualmente se extiende hasta Paraíso de Cartago, sin embargo, no llega a la estación central de esta localidad.

Se tienen también algunos tramos en rehabilitación:

- Anden de la Basílica, Cartago km 146 – Estación en Paraíso, Cartago km 140 = 6 km (*)
- San Antonio de Belén km 14.4 – Estación San Rafael de Alajuela km 18.7 = 4.3 km
- Orotina km 66.2 – Salinas – Puerto Caldera km 93 = 26.8 km

(*) De este tramo se han rehabilitado aprox. 3 km, quedan pendientes alrededor de 2.6 km para completar esta sección hasta a la estación de Paraíso (Pomareda, 2023).

En este sector también se tienen secciones fuera de operación:

- Salinas Km 89.2 – Puntarenas Km 118 = 28.8 Km
- Orotina Km 66.2 – Estación San Rafael de Alajuela Km 18.7 = 47.3 Km (incluye sector de Quebradas y Oeste Pocho Mora)

A modo de conclusión respecto de la situación actual de la industria férrea costarricense, se tienen 151,1 km (más ramales) completamente fuera de operación, se encuentran en proceso de rehabilitación aprox. 160 km y se tienen operaciones en más de 195 km; sin embargo, no hay información clara respecto al estado de estos últimos, es decir, no se especifica las condiciones que estos presentan en ninguno de los informes hasta el momento obtenidos.

1.2 Historia de la Industria ferroviaria en Alemania

La historia del ferrocarril en Alemania se remonta al año 1835 cuando se construyó la primera línea de este tipo, fue una conexión entre las ciudades de Nüremberg y Fürth, en su momento fue esta obra fue desarrollada y operada por una compañía privada llamada “Gesellschaft für die Errichtung einer Eisenbahn mit Dampffahrt zwischen Nürnberg und Fürth” que traducido significa “Empresa para la construcción de un ferrocarril de vapor entre Núremberg y Fürth”, este fue el inicio de dos siglos donde los ferrocarriles se volverían pieza fundamental para la sociedad alemána.

Debido a la magnitud de la industria ferroviaria alemana no es posible ahondar al mismo nivel que se presentó para el sistema costarricense, por lo tanto, el nivel de detalle se limita únicamente a aquellos grandes hitos en la historia que aportan luz respecto de sus sistemas de gestión pasados y actuales.

1.2.1 Desarrollo de la industria

La historia de la industria ferroviaria en Alemania según Deutsche Bahn AG Kommunikation (s/f-a) se puede dividir en 5 grandes periodos, más la etapa de desarrollo actual, cada una de estas etapas trajo consigo retos y a su vez soluciones que a hoy han logrado posicionar a Alemania como país piloto para el desarrollo de

sistemas de movilidad sostenible en proyectos financiados por la Unión Europea (UE) basados en el uso de ferrocarriles.

1.2.1.1 1835-1918 Un siglo a vapor

De acuerdo con Deutsche Bahn AG Kommunikation (s/f-a) cuatro años se destacan en esta época, 1835, 1847, 1886 y 1914; respectivamente, en el primero se inauguró el primer ferrocarril a vapor (para ese momento) en DE, en el segundo se creó la "Asociación de Administraciones Ferroviarias Alemanas" que empezó a estandarizar normativa para el funcionamiento tanto de ferrocarriles privados como estatales, posteriormente se dio una importante nacionalización de las empresas, convirtiéndolas en estatales, finalmente, en 1914 se resalta el uso de los ferrocarriles alemanes durante la I Guerra Mundial (IWW), siendo que le dio una gran ventaja sobre sus oponentes por su capacidad de movilización de soldados e implementos de guerra, sin embargo esto no fue suficiente, al final de la guerra los ferrocarriles estatales independientes se habían terminado.

Se destaca en este periodo el desarrollo de las locomotoras eléctricas, para 1879 durante la exposición industrial de Berlín, la compañía alemana Siemens presentó su prototipo de locomotora eléctrica y ya para 1881 se construyó una sección de tranvía en Berlín completamente electrificada, esta tuvo una longitud de 2,5 km, esto posicionó a Alemania como pionera no sólo en Europa, sino que también a nivel mundial (Hebestreit, s/f).

En este periodo hubo un avance significativo para la industria, a finales del siglo XIX ya se utilizaban métodos de arco eléctrico para soldar rieles y generar rieles de mayor extensión a la de fábrica, sin embargo, estos eran procesos incipientes, de un muy alto costo y una baja eficiencia, fue en 1895 cuando el alemán Hans Goldschmidt inventó la patente de la Termita®, un sistema que más adelante revolucionaría la industria ferroviaria alemana (Keichel, 2021). Esta no fue la única innovación para generar RLS, en Estados Unidos se desarrolló un sistema de fundición que generaba juntas continuas en 1894 ("Cast-Welding Rail Joints", 1894), empero, a hoy la historia no le ha favorecido.

1.2.1.2 1918-1945 Al servicio de la democracia y la dictadura

Durante este periodo destaca la implementación de sistemas de control para la logística de los trenes a través de centrales telefónicas, así como el desarrollo de trenes que para esa época fueron llamados "trenes voladores" (del alemán "fliegenden Züge") y finalmente la politización de los trenes como mecanismo parte del estado nacionalsocialista (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

Hasta este punto cada estado del país alemán era el responsable de gestionar y definir el cómo operaban sus servicios de trenes, fue en 1920 cuando el gobierno alemán empezó la nacionalización de las diferentes compañías, para esta fecha lo que se buscaba era una gestión de activos centralizada, pero separada del gobierno y parlamento, esto se gestionaría sobre la base comercial de la "Deutsche Reichsbahn-Gesellsachaft" (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

Para 1937 la Reichsbahn había sido incorporada dentro de los engranajes del estado nacionalsocialista y fue pieza indispensable para el papel de este gobierno durante la II Guerra Mundial (IIWW), siendo que la actual compañía, mediante Deutsche Bahn AG Kommunikation (s/f-a) dice que “las deportaciones de millones de personas a los campos de concentración y exterminio del régimen nacionalsocialista no habrían sido posibles sin la Reichsbahn” (Traducción del alemán, no oficial).

La “renovada” Deutsche Reichsbahn, se había convertido en una empresa estatal de carácter político, dirigida directamente por los intereses del régimen de ese momento, habiendo perdido su objetivo de los años 1920-1924, donde se buscaba una recuperación económica después de la IWW para el país, convirtiendo a los ferrocarriles en una empresa comercial, propiedad del estado, pero dirigida separada de sus intereses (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

1.2.1.3 1945-1994 Por caminos separados

En 1945 con el fin de la IIWW, las potencias victoriosas de acuerdo con los tratados definidos cada una asumió el poder de los ferrocarriles estatales según las regiones que administraban. Durante este periodo se dio una gran rehabilitación de vías destruidas durante la guerra, así como también construcción y/o ampliación de nuevas rutas, esto a pesar de las dificultades económicas que sufrió la industria férrea, todo esto llevo a plantear reformas al final del periodo (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

Fueron cuatro potencias mundiales las que tomaron el control de DE al finalizar la IIWW: la Unión Soviética, Estados Unidos, Gran Bretaña y Francia, cada una por excepción de Francia invirtieron en las reparaciones en sus respectivas zonas de ocupación. Los mayores cambios se dieron con la estructuración organizacional del año 49 debido a la creación de la República Democrática de Alemania (DDR, del alemán) se generó una división que se extendería hasta finales de este periodo, respecto de la República Federal de Alemania (BDR, del alemán). (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

Tanto para la BDR como para la DDR la administración de los ferrocarriles se realizó mediante empresas estatales, con la diferencia que en la DDR la gestión de los medios de transporte incluidos los ferrocarriles era “tarea de la república” por lo que la gestión operativa de ambas compañías era grandemente, respectivamente, los ferrocarriles fueron administrados por la “Bundesbahn” y la “Reichsbahn”, para la primera la gestión se dio más como si de un ente comercial que debía satisfacer “tareas de servicio público” y aun así ser competente comercialmente; la Reischsbahn al ser gestionada directamente bajo la agenda de la economía socialista altamente planificada esto le permitió mantenerse en constante evolución, contrario a la Reichsbahn que con el paso del tiempo su relevancia en el transporte disminuyó (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

Durante la existencia de ambos gobiernos, a los inicios de la década de los 90 con la unificación de DE mediante la anexión de la DDR a la BDR, las dos compañías existentes fueron instruidas mediante los presidentes de cada una a s coordinar la unificación técnica y organizativamente. Todo esto desencadenaría

más adelante, en el próximo periodo la que seríá la mayor reforma de la industria férrea en DE desde su creación (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

En este período los llamados “trenes voladores” evolucionaron a los trenes “Intercity” (IC) que alcanzaban velocidades cercanas a los 200 km/h, los IC, serían los precursores de los “Intercity Express” (ICE).

1.2.1.4 1994-2000 La implementación de la reforma ferroviaria

Como se viene antecediendo, este corto periodo representa una de las más grandes revoluciones para la industria férrea de Alemania, se creó la Deutsche Bahn AG, se regionalizaron los servicios de transporte y se extiende la segunda etapa de trenes de alta velocidad. (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a)

La fundación de la Deutsche Bahn AG se dio en 1994, este fue la culminación del proceso de fusión de la Reichsbahn y la Bundesbahn que había iniciado en 1989, para cuando se fundó la compañía esta empleaba alrededor de 352 000 personas y una longitud operativa superior a los 40 000 km (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a; Menius & Matthews, 2020).

Se dieron grandes proyectos de restauración, construcción y/o electrificación de vías conectando de forma más eficiente ciudades coco Berlín, Frankfurt, Leipzig y más, esto entre los años 1995 y 1998, destaca que en 1997 empezó a operar la segunda generación de trenes de alta velocidad, los ICE 2, estos en pruebas llegaron a superar los 400 km/h, sin embargo, su velocidad operativa ha sido de 280 km/h en las zonas de las rutas donde se pueden permitir este límite (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a; *Deutsche Bahn trains from ICE to Intercity*, s/f).

El último gran hito de este periodo se dio en 1999 cuando “las antiguas áreas de negocios de larga distancia, cercanías, transporte de mercancías y vías, así como el área de estaciones de pasajeros, …, se escindirán como sociedades anónimas” (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a) de esta forma, oficialmente la Deutsche Bahn pasó a gestionarse como un grupo empresarial (DB, a partir de ahora) de acuerdo al derecho de sociedades holding, donde el grupo posee diferentes sociedades anónimas que en conjunto conforman todo el órgano operativo del grupo económico, el capital social de las empresas creadas en ese momento pertenece en su totalidad al grupo DB, del cual sus acciones son propiedad de la República Federal de Alemania (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

1.2.1.5 2000-2010 Inversiones en infraestructura y logística

Durante este corto periodo de 10 años se desarrolló una estrategia en alemán llamada “Offensive Bahn”, básicamente, se aumentaron las inversiones para renovar la red existente, así como para el mantenimiento de los vagones y equipos de transporte, esto con el soporte financiero del Ministerio de Transportes y de Finanzza que extendieron la financiación (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a)

En el sector de infraestructura se construyeron líneas tales como la conexión entre Karlsruhe-Basilea, en la que resaltó el túnel de Katzenberg por su complejidad constructiva, esto en el año 2005, para el 2007 se

inauguró la nueva y modernizada Estación Central de Berlín, luego de ocho años de arduas labores de construcción.(Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a).

Para el 2010 ya se encontraba en sesiones de arbitraje el proyecto de construcción de Stuttgart 21, que a su vez forma parte del megaproyecto Stuttgart-Ulm, que construye una línea de alta velocidad para conectar estas dos ciudades y a su vez, aumentar la eficiencia en las conexiones de la región sudeste de Alemania (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a; ITS Projekt, 2024).

1.2.2 Situación actual

De acuerdo con Deutsche Bahn AG Kommunikation (s/f-a) para comprender la situación actual hay que remontarse al 2009 que fue cuando se empezaron a incluir políticas de sostenibilidad ambientas en busca de generar una movilidad respetuosa con el medio ambiente tanto en el transporte de personas como de mercancías, todo esto promovido desde la Unión Europea, con miras a hacer del transporte ferroviario el principal medio de transporte dentro de sus países miembros y entre ellos.

Se lanzó en el 2015 un programa que buscó la reducción de emisiones de CO_2 al aumentar la cantidad de pasajeros que utilizan el servicio, en el 2016 se lanzó el plan para el “Ferrocarril del futuro”, enfocándose en el mantenimiento de los trenes en sí mismos, relativo al desarrollo en general se lanzó la nueva generación de trenes de alta velocidad, los ICE 4, estos operan a velocidades de 250 km/h, con longitudes mucho mayores que permiten transportar una mayor cantidad de pasajeros en un mismo viaje (*Deutsche Bahn trains from ICE to Intercity*, s/f).

El 2018 fue la inauguración del proyecto VDE 8, el mayor proyecto ferroviario tras la reunificación hasta el momento, este proyecto conecta las metrópolis de Berlín con Munich, esta ruta se ve reforzada también con la ejecución del proyecto ya mencionado de previo, Stuttgart-Ulm, este todavía reducirá aún más el tiempo de viaje entre las metrópolis del Norte y Sur del país (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-a; ITS Projekt, 2024).

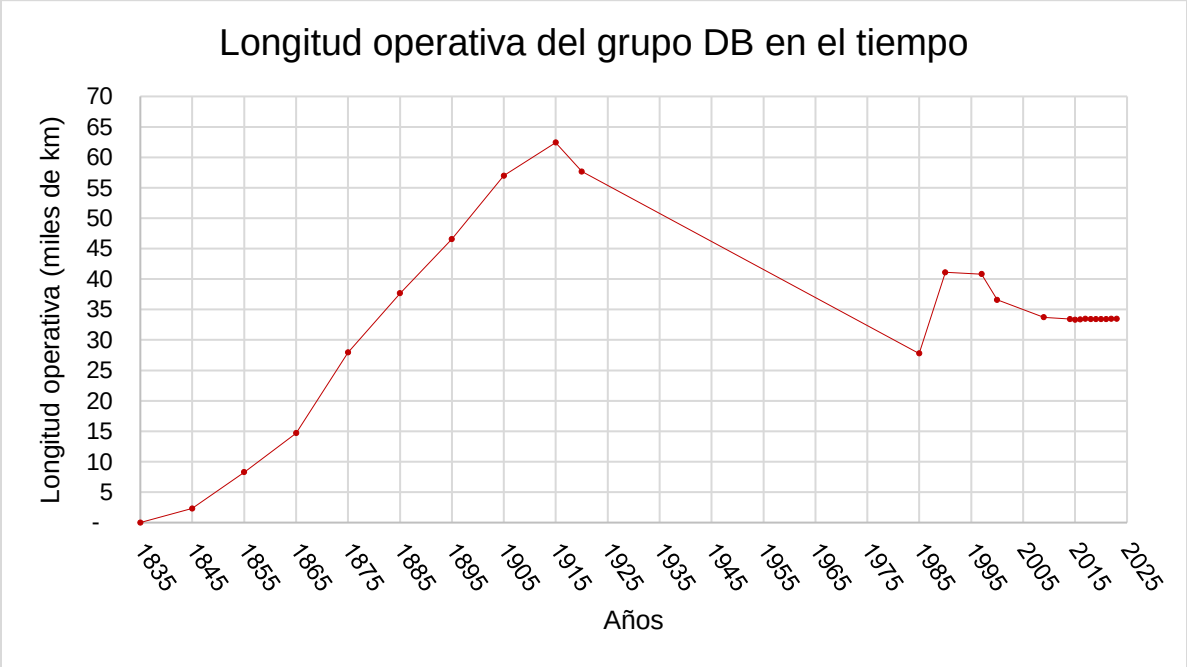
A modo de síntesis para comprender la magnitud de la industria ferroviaria, al 2018 se tenía registro de al menos 61 059 km de vías férreas propiedad de la DB (Deutsche Bahn AG, 2019), este es el último registro disponible que cuantifica la longitud total de vías propiedad de DB, esto no significa que la totalidad de esta red se encuentre en operación, en la actualidad la cantidad de km operativos es de alrededor de un 50% (Deutsche Bahn AG Kommunikation, s/f-b), en la Figura 8 se presenta un histórico que brinda una mayor comprensión de la evolución de la industria en Alemania.

A partir del 2021 se implementaron las “Normas técnicas de construcción específicas para ferrocarriles” (Eisenbahnspezifische Technische Baubestimmungen, EiTB), que establecen las normas, leyes y reglamentos a seguir para los diferentes elementos de la industria férrea alemana.

Actualmente en la Unión Europea existe una gran promoción por la sostenibilidad (Ludewig et al., 2008), cuando la industria ferroviaria utiliza como fuente de energía para sus servicios de transporte energía proveniente de fuentes renovables, esto la convierte en una de las más industrias más sostenibles que existen

a hoy, según Deutsche Bahn AG (s/f) para el 2023, un 68 % de los servicios de transporte de la DB fueron ofrecidos utilizando energías renovables como fuente de alimentación, este dato ha venido aumentando constantemente, respecto del año 2022 esta cantidad aumentó en un 2,6 %, esta ha sido la constante en los últimos años para el grupo DB en Alemania.

Figura 8. *Longitud operativa de la red ferroviaria del grupo DB en el tiempo.*



Fuente: Datos tomados de Deutsche Bahn AG Kommunikation (s/f-b) & Menius & Matthews (2020).

1.3 Sistema ferroviario

El propio término -Sistema-, se define según Real Academia Española (2023) como (1) un “conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí” y (2) un “conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto”, de esta forma debe entenderse que un sistema ferroviario va más allá de sólo la infraestructura que lo conforma, inclusive, dentro de la infraestructura en sí misma se puede definir un sistema. Menius & Matthews (2017) exponen que un medio de transporte cuando es guiado de forma lineal y propulsado haciendo uso de fuerzas tracción y/o aprovechando las fuerzas de fricción con las vías y cumpliendo la función de transportar sea mercancías o pasajeros de un punto a hacia un punto b, se puede denominar ferrocarril (p. 1).

En una misma ruta ferroviaria se pueden manejar grandes flujos de transporte, sin embargo, existe un punto en el que no es posible gestionar la demanda con una única vía y se vuelve necesario establecer rutas

paralelas/alternas y/o auxiliares, respectivamente con los mismos puntos de origen y destino o bien, con puntos de arribo y partida diferentes a los primeros; cuando se tiene más de una ruta se empieza a utilizar el término red ferroviaria (Menius & Matthews, 2020). Finalmente, un sistema ferroviario es “la gestión de una red ferroviaria, considerando sus interacciones, tanto internas como externas”.

Considerando como ejemplo el sistema alemán, en la actualidad el grupo DB agrupa la gestión de las interacciones de su red a través de sus 6 unidades de negocios, la información se presenta en el CUADRO 1.

CUADRO 1. UNIDADES DE NEGOCIOS DE DEUTSCHE BAHN

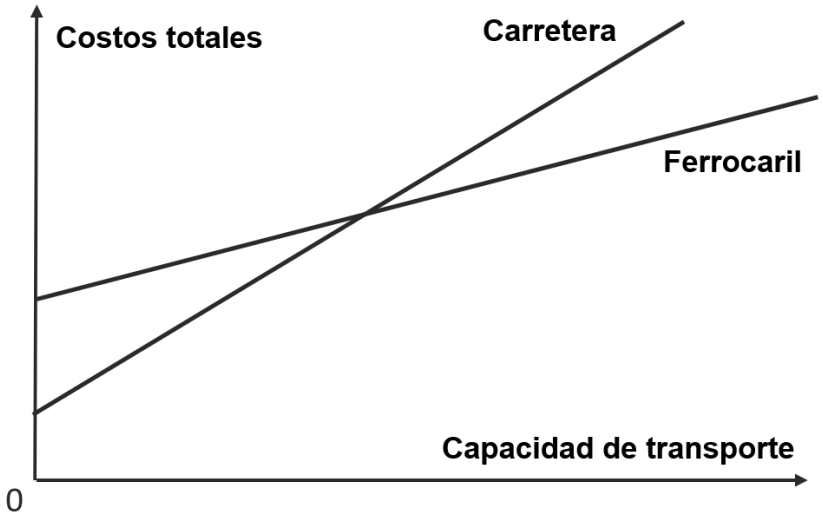
Unidad	Objetivo	Campo de acción en la red
DB Long-Distance	Ofrecer a sus clientes viajes cómodos y respetuosos con el medio ambiente dentro de Alemania y hacia los países vecinos.	Servicio de transporte: Pasajeros, alta velocidad.
DB Regional	Movilizar cada día a su destino a millones de pasajeros en transporte regional de forma puntual, segura, cómoda y respetuosa con el medio ambiente.	Servicio de transporte: Pasajeros.
DB Cargo	Realizar el transporte de mercancías utilizando múltiples modos de transporte dentro de la red europea y su extensión a la nueva ruta de la seda hacia China.	Servicio de transporte: Mercantil, comercial, industrial, …
DB Infrago:	Ser una empresa de infraestructura ferroviaria orientada al bien común.	Infraestructura
DB Netze Track	Gestionar la explotación de la infraestructura, así como para garantizar a largo plazo la calidad y disponibilidad de la infraestructura y el acceso no discriminatorio a las rutas ferroviarias y a las instalaciones de servicio.	Infraestructura: Construcción, mantenimiento y gestión de vías, aparcaderos, puentes, túneles, ...
DB Netze Stations	Gestionar una operación fluida para las conexiones dentro de las estaciones férreas, ofreciendo a su vez servicios que eleven el grado de satisfacción de los usuarios del transporte.	Infraestructura: Construcción, mantenimiento y gestión de estaciones.
DB Energy	Ofrecer productos energéticos estándar para el suministro de energía para tracción y energía estacionaria. La energía para tracción se suministra utilizando distribución eléctrica, diésel, o bien, fuentes alternativas.	Energía/Infraestructura.
DB Schenken	Atender a mercados consolidados y economías nacionales emergentes como proveedor de servicios integrados de transporte y logística con una red mundial.	No interactúa directamente con la red, sin embargo, ejemplifica un ente externo a la red.

Fuente: Adaptado de DB Investor Relations (2024).

1.3.1 Importancia de los sistemas ferroviarios

(Menius & Matthews, 2020) expone como los sistemas ferroviarios tienen una ventaja económica respecto a los costos que se tiene para el transporte por carretera, esto se presenta en la Figura 9; Ahora, los sistemas no sólo aportan beneficios en temas económicos, los ferrocarriles aportan movilidad eficiente y solidaria para el desarrollo de una nación, es por esto que se ha venido promoviendo desde la UE el desarrollo de este tipo de transporte en sus países miembros (Ludewig et al., 2008).

Figura 9. *Comparación cualitativa de los costos totales en función de la capacidad de transporte, Carreteras y Ferrocarriles.*



Fuente: Adaptado de Menius & Matthews (p.20, 2020).

Debe entenderse el concepto de movilización en masa que aportan los ferrocarriles, sea tanto a nivel de transporte de pasajeros como de carga comercial, este concepto es destacable en servicios de larga distancia cuando de transporte de carga se trata, su aplicación a nivel de pasajeros es aplicable en ciudades desarrolladas con altos índices de movilidad internos (Pienaar, 2003).

El transporte ferroviario ha tenido un gran progreso en las últimas tres décadas, cuando se empezaron a desarrollar del *tren de gran velocidad (TGV),* este tipo de trenes han aumentado los beneficios comparables de los sistemas férreos respecto de los sistemas de transporte por carretera, Ćetković et al. (2020) citando a Watson et al. (2017) enumera los beneficios de los TGV:

- Emisión de menos contaminantes respecto al transporte por carretera, aire o barco.
- Los viajes de larga distancia son más económicos que cuando se transporta por carretera, aire o barco.
- El transporte de carga mediante ferrocarril no utiliza combustibles fósiles*.

- El transporte de carga mediante TGV reduciría el número de accidentes en carretera y la congestión en los aeropuertos.
- Los TGV son más fiables y su precisión con los horarios oscila entre el 90% y 99%.

* Debe aclararse que lo expuesto por Ćetković et al. (2020) en este punto no es del todo preciso, ya que esto depende de cada operador de red ferroviaria, tal como ya se ha expuesto de previo; sin embargo, cuando se plantea un proyecto de TGV en la actualidad (tal como el análisis hecho por los autores) se busca que este utilice una matriz energética donde los combustibles fósiles no sean la fuente de alimentación.

Los ferrocarriles han vuelto a cobrar relevancia, gracias a sus beneficios, esto no elimina que también existen algunos contras que pueden ser destacados, principalmente cuando el sistema ferroviario se analiza a corto plazo, empero, cuando se analiza a mediano plazo como lo hacen (Ćetković et al., 2020) y aún más si se es a largo plazo los contras se disipan, como ejemplo el costo de la inversión inicial se puede recuperar en alrededor de cinco años e inclusive duplicar en alrededor de 30 años.

1.3.2 Servicios de transporte ferroviario

Tal como se ha mencionado, los servicios de transporte se pueden categorizar en dos clases primarias: transporte de pasajeros y transporte de mercancías, dentro de las categorías se pueden subcategorizar los servicios ofrecidos. Debe aclararse que existen diversas formas de clasificar los ferrocarriles, en este caso se está utilizando la clasificación por tipo de transporte ofrecido.

1.3.2.1 Servicio de transporte: Pasajeros

Este es el servicio más conocido a nivel popular por la sociedad a causa de uso extendido a inicios del siglo XIX en una mayoría de países a nivel mundial, a modo de referencia se utilizará la clasificación propuesta por Pienaar (2003), que genera una clasificación de los servicios de pasajeros urbanos en función de diferentes variables, dando prioridad al rango de velocidad operativa, esta clasificación evidentemente, no incluye los trenes de alta velocidad, en la CUADRO 2 sí son considerados.

CUADRO 2. SERVICIOS DE PASAJEROS EN FUNCIÓN DE SU VELOCIDAD.

Parámetro	Tranvía	Tranvía / Metro Ligero	Metro	Tren de cercanías	Tren de gran velocidad
Población (miles)	200 - 500	500 - 3000	> 4000	> 3000	NA*
Uso de vías	Combinado	Separado	Combinado / Exclusivo	Exclusivo	Exclusivo
Velocidad operativa (km/h)	10 - 20	30 - 40	30 - 40	45 - 65	> 200
Capacidad máxima (pasajeros/h)	7500	11000	22000	48000	NA*

Fuente: Adaptado de (Cervero, 1998).

No se están considerando subclasificaciones más intensivas, como pueden ser respecto al tipo de propulsión (locomotora, coches autopropulsados), respecto a la fuente de energía, cantidad y tipo de *bogies,* … entre otros, se recomienda al lector tener un base de conocimiento al respecto, para esto puede consultar autores como Lichtberger Bernhard (2010) y Menius & Matthews (2020).

1.3.2.2 Servicio de transporte: Mercantil

Los servicios de transporte de carga por ferrocarril son una de las opciones más utilizadas por grandes empresas para gestionar la movilización de mercancías a través de largas distancias, gracias a su versatilidad respecto a costos.

Dentro de los servicios de carga se pueden extender clasificaciones intensivas, de acuerdo con el tipo de mercancía transportada, que a su vez repercute en el tipo de *vagón* utilizado para este propósito, sin embargo, debido a esta misma razón, establecer una clasificación en la que se puedan abordar todos los diferentes tipos de *coches* utilizados es una labor que debe ser realizada por cada compañía en función de sus clientes y los bienes que estos requieran transportar.

Existen tres formas de clasificar de forma generalizada los servicios de transporte de carga desde una perspectiva de la logística que conlleva su movilización, estos son" (1) *Transporte por vagón/cargas completas,* este consiste en la movilización de volúmenes pequeños de carga, donde los bienes son colocados en uno o más vagones según sea el requerimiento de carga, el tren puede tener diferentes puntos de partida y destino; (2) *Transporte por trenes completos,* la utilización de este mecanismo le permite al cliente transportar sus bienes de forma exclusiva, implicando que la totalidad de mercancías en el tren son de un mismo cliente, con características similares y puntos de partida y destino únicos; el último modo es el (3) *Transporte combinado,* esta modalidad puede utilizar las dos clasificaciones para satisfacer los requerimientos del cliente, se reduce al mínimo el transporte por carretera y se busca que la mayor parte del recorrido de las mercancías sea por ferrocarril o bien, por vía navegable.

Nota: Los términos de previo expuestos son de uso estándar en la industria ferroviaria, las definiciones se adaptan de Unión Internacional de Ferrocarriles (2024).

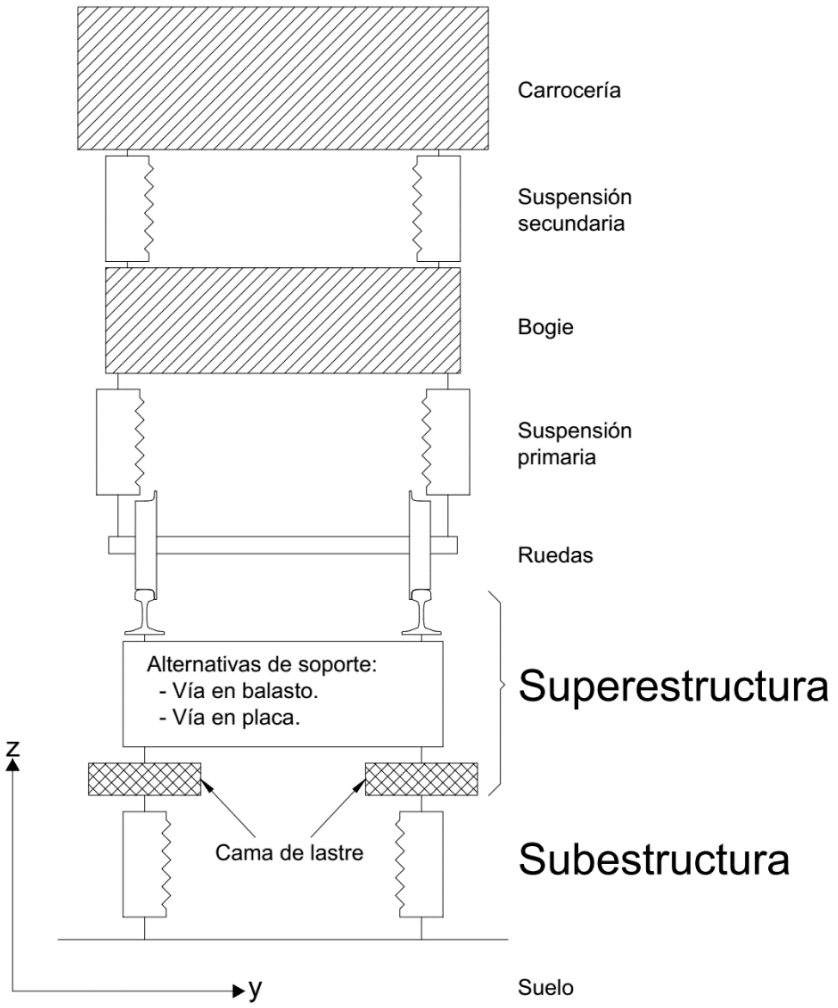
1.3.3 Componentes de la infraestructura ferroviaria

Los componentes estructurales de un sistema ferroviaria pueden ser tan variados como en sí mismo lo es el sistema, existen una infinidad de soluciones por las que se puede optar al construir, restaurar o dar mantenimiento a la infraestructura. En función del alcance de este proyecto el abordaje en esta subsección se enfoca hacia la superestructura, se hace también una breve exposición de las instalaciones auxiliares. La Figura 10 muestra una sección transversal típica de la infraestructura ferroviaria en la que se muestran los

componentes ligados directamente, no se incluye la red eléctrica ya que esta no transmite carga a través de los elementos de estudio.

Los elementos denotados en la Figura 10 como carrocería, suspensión secundaria, *bogie*, suspensión primaria y ruedas no se abordarán, estos son elementos que se deben de considerar ya que transmiten cargas a la superestructura y son toda un área de estudio, el diseño de los vehículos ferroviarios.

Figura 10. *Sección transversal típica de una vía ferroviaria, incluyendo los elementos rodantes.*



Fuente: Adaptado de Lichtberger, p. (2010, p. 21).

1.3.3.1 Subestructura

Las subestructuras deben ser diseñadas y construidas en función de las necesidades mecánicas que deberán soportar para brindar un entorno seguro y eficiente para (1) instalar las vías y posteriormente (2) operar los trenes en estas.

Una clasificación de las subestructuras puede darse en función del área de la ingeniería civil encargada de brindar la solución requerida para la sección de red donde son requeridas. De esta forma se tiene que pueden existir (1) Estructuras de tipo geotécnicas: como pueden ser los túneles, sistemas de reforzamiento de suelos, sistemas de anclajes (superficiales y/o profundos) y afines; se tienen también (2) Estructuras de tipo estructural: incluyendo a los puentes sobre afluentes de agua, los pasos elevados, elementos de soporte para la red eléctrica y similares (Brent D. Ogden Kimley-Horn and Associates Inc. & Chelsey Cooper Kimley-Horn and Associates Inc., 2019). Esta clasificación no implica exclusividad para un área de la ingeniería civil, al diseñar o construir por el contrario se vuelve una solución conjunta entre diferentes especialistas.

1.3.3.2 Superestructura

La superestructura de una vía férrea consiste en varios elementos, previo a entender los elementos deben comprenderse las dos variantes más comunes de superestructura, de acuerdo con Lichtberger (2010) puede darse la construcción de *vías con balasto* (la más conocida) o bien, las *vías en placa* (de concreto); el diseño, construcción, operación y mantenimiento entre ambas variantes es considerablemente diferente.

Las *vías con balasto* son la estructuración más común, sus componentes principales son: el *balasto*, las *traviesas* o *durmientes,* las fijaciones y los *rieles.* Este es el tipo de superestructura cubierto por este proyecto, más adelante, en las secciones 1.5, 1.6 y 1.7 se brinda más información con respecto a cada uno de los elementos de las *vías con balasto*, con excepción de los sujetadores, debido a la gran variedad que pueden encontrarse dentro del mercado, se desarrolla en la sección 1.9 también el estado del arte de sistemas de gestión férrea.

Las *vías en placa* de acuerdo con Lichtberger (2010) son aquellas en las que “el balasto se sustituye como elemento distribuidor de carga por otro material, como el concreto o el asfalto… Debido a la gran rigidez de la capa base de hormigón o asfalto, la elasticidad necesaria debe ser proporcionada en su totalidad por elementos elásticos situados bajo el riel o la traviesa”. Este tipo de vía no se contempla dentro del alcance de este proyecto, por lo que, si el lector desea profundizar más al respecto sobre este tipo de vía, puede consultar el Cap. 10 de Lichtberger (2010), Cap. 12 de Freystein et al. (2015) o bien, Cap. 11 de Menius & Matthews (2020).

1.3.3.3 Instalaciones ferroviarias auxiliares

Un sistema ferroviario no podría operar únicamente con las vías, se requiere de instalaciones auxiliares para el abordaje y desembarque de los pasajeros, la carga y descarga de bienes, así como para la manipulación, mantenimiento y aparcamiento de los trenes. Existe una variedad de estas instalaciones, sin embargo, pueden clasificarse de forma general en dos grupos: las estaciones y otro tipo de instalaciones, este subtema se enfocará las estaciones.

En el libro Handbuch Eisenbahninfrastruktur (2019) se definen las estaciones de acuerdo con el concepto alemán, haciendo una distinción respecto de las líneas abiertas, se lee “En Alemania, una estación se define como una instalación ferroviaria con al menos una aguja donde los trenes pueden iniciar, terminar, desviarse o dar la vuelta” (traducción no oficial). Las estaciones permiten una variedad de operaciones, como el inicio y la parada de trenes, cambios en la formación de los trenes, maniobras y estacionamiento de vehículos (p. 430). A diferencia de las líneas abiertas, las estaciones no tienen un sentido de circulación estándar y las vías pueden equiparse con sistemas de señalización para uno o ambos sentidos de circulación, según sea necesario.

Menius & Matthews (2020) profundizan aún más en el concepto de estación, haciendo una distinción entre las estaciones de pasajeros y las de transporte de mercancías; dice “Las estaciones de transporte de mercancías incluyen las estaciones de mercancías locales y las estaciones de transbordo, donde se gestionan grandes contenedores y el transporte combinado entre tren y carretera” (p. 46). Mencionan también otros tipos de estaciones, entiéndanse: (1) estaciones de clasificación, donde se conforman y organizan los trenes de carga (2) estaciones ferroviarias (u operativas), son las que brindan estacionamiento y espacio para conformar los trenes para operar adecuadamente los servicios de pasajeros y (3) estaciones de adelantamiento, estas son vías que se construyen paralelas a las principales a intervalos fijos, permitiendo la circulación de trenes a diferentes velocidad en una misma ruta.

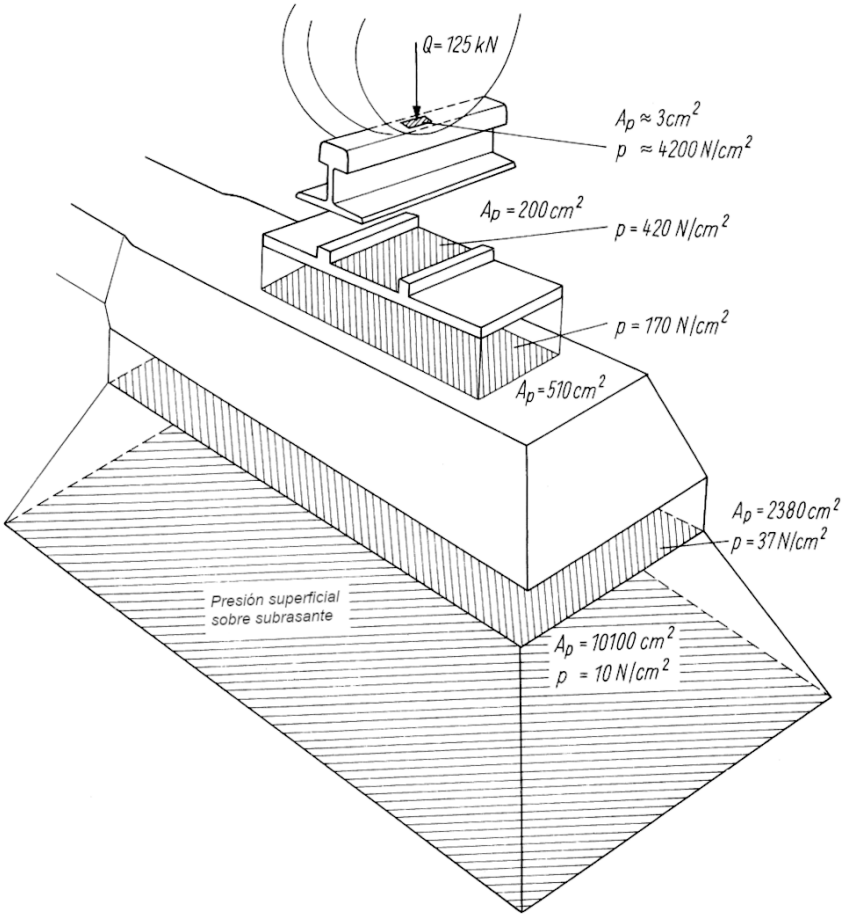
1.4 Mecánica de las vías con Balasto

La superestructura de las vías con Balasto se ha estudiado durante muchos años, sin embargo, los avances que hoy sustentan la base de conocimiento respecto de esta se desarrollaron a partir de mediados del siglo XX, uno de estos estudios es el realizado por Führer (1979), en su investigación desarrolló modelos matemáticos que permiten cuantificar de una forma más acertada las variables relativas a la mecánica de las traviesas y los rieles, partiendo de los conceptos básicos que determinan la superestructura; autores recientes como Freystein et al. (2015) y Menius & Matthews (2020) citando lo expuesto por Lichtberger (2010) indirectamente están basando su contenido en el estudio de Führer, ya que Lichtberger le cita ampliamente en su capítulo sobre la mecánica ferroviaria, de modo que esta investigación todavía hoy sigue siendo referente.

La Figura 11 expone cómo se da la transmisión de carga vertical a través de los diferentes elementos de la superestructura, en este esquema se utiliza un riel R65, una traviesa BS66 y la profundidad del balasto es de 50 cm, es evidente como la carga convertida en un esfuerzo de aplastamiento (presión = p) se reduce en función del aumento del Área de contacto (A_p). Mediante la Figura 11 es posible apreciar (1) como los diversos elementos requieren de diferentes capacidades según su Ap, así como también es notoria (2) la codependencia entre estos, siendo que un fallo en cualquiera de los elementos repercute directamente en los subsecuentes a este.

El diseño de la superestructura y su comportamiento está directamente ligado a la capacidad de carga de la subestructura (a nivel de la subrasante), esta capacidad viene dada por el módulo de deformación Ev [MN/m²], comúnmente para el diseño de vías férreas se considera el E_{v2} que corresponde a la capacidad en el segundo ciclo de carga, este valor se puede determinar tanto para el suelo in situ o bien, si fuese necesario se puede medir una vez se ha mejorado el suelo original (Lichtberger, 2010)

Figura 11. *Transmisión de carga vertical a través de la superestructura.*



Fuente: Adaptado de Führer, Figura (1979, Figura 3.3)

Propiamente en la superestructura el primer elemento de soporte es el balasto, para conocer la presión efectiva transmitida desde las traviesas hacia el balasto se define el coeficiente de balasto C [N/cm³], este mide los *N/cm²* necesarios para lograr un hundimiento de 1 cm sobre el balasto utilizando una única traviesa (Lichtberger, 2010).

Para determinar la capacidad de carga de la vía se utiliza el concepto de rigidez vertical de la vía *k*, que se define según Lichtberger (2010) como la resistencia a la deformación vertical en relación con la fuerza aplicada, la expresión más básica para *k* se presenta en la ecuación 1.

$$k = \frac{Q}{z} \qquad \textit{(Ec. 1)}$$

Donde:

k = rigidez vertical de la vía [kN/mm]
Q = Carga vertical transmitida desde la rueda [kN]
z = Asentamiento bajo la vía cargada [mm]

La tesis doctoral de Berggren expone métodos de medición de la rigidez de la vía y cómo estos son favorecen un mantenimiento eficiente, según lo citado por Lichtberger (2010) Berggren desarrolla la correlación que existe entre la subestructura y la rigidez vertical de la vía, siendo que *k* se ve afectada directamente por la rigidez de la capa de suelo subyacente a la superestructura, Berggren se basa inicialmente en la ecuación desarrollada por Selig & Li (1994) que expone el módulo de fundación de la vía en función de la rígidez, con algunos arreglos matemáticos realizados por Lichtberger es posible utilizar esa ecuación para expresar la rigidez en función del módulo del balasto, de esta forma se obtiene la ecuación 2.

$$k = \frac{8 \cdot E \cdot I}{L^3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{C \cdot A}{a}\right)^3 \cdot E \cdot I} \qquad \textit{(Ec. 2)}$$

Donde:

k = Rigidez vertical de la vía [N/cm]
E = Modulo de elasticidad [N/cm²]
I = Momento de Inercia del riel [cm⁴]
L = Longitud característica [cm]
C = Módulo del balasto [N/cm³]
A = Área de interacción traviesa/balasto [cm²]
a = Distancia de separación entre traviesas [cm]

Existen diferentes modelos y formas que definen el proceso de cálculo para la longitud característica (o ficticia), sin embargo, el utilizado por DB según Lichtberger, pp. (2010, pp. 52–58) es el presentado en las ecuaciones 3 y 4.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} \qquad \textit{(Ec. 3)}$$

Donde *b* se define como:

$$b = \frac{A}{2 \cdot a} \qquad \textit{(Ec. 4)}$$

Entiéndase *A,* específicamente para su uso en la ecuación 4, como el área de la traviesa que tiene interacción directa con el balasto, es decir el área de apoyo.

Con las ecuaciones 1 y 2 es posible no sólo obtener la rigidez de las vías, sino que también se puede estimar la capacidad de carga máxima que estás podrán soportar, esto desde una perspectiva simplificada utilizando el modelo de viga elástica ficticia de Winkler, en este modelo se consideran coeficientes de influencia de ejes cercanos, coeficientes de velocidad, coeficientes relativos al estado de superestructura y coeficiente de carga dinámica, estos son aplicados de forma consecutiva de modo que la magnitud del uno afecta de forma directa al subsecuente, el valor final que se ve afectado es la carga admisible soportada por la superestructura, así como la carga admisible máxima para un determinado radio de rueda.

Respecto de las cargas longitudinales y laterales estas deben ser consideradas en el marco de esfuerzos que presentan, para las cargas longitudinales los esfuerzos más relevantes se dan sobre los rieles (no limitándose a estos, también afectan toda la superestructura) generando esfuerzos de tensión y compresión, así como esfuerzos de torsión con las fuerzas de aceleración y frenado, entre tanto que las fuerzas transversales se hacen manifiestas principalmente a través de un momento flector y esfuerzos de cizalladura (entre la cejilla de la rueda y la cabeza del riel), en función de lo expuesto el comportamiento de estas cargas para esta investigación se consideran a groso modo en la subsección 1.7.1.

Tal como se menciona en el subtema 1.3.3.2 de seguido se detallan los elementos de estudio de la investigación desarrollada, siendo que estos son los elementos portantes y transmisores de las cargas de los trenes hacia el subsuelo es de alta relevancia comprender las bases técnicas que le rodean, la normativa que les rige, así como el estado del arte respecto a soluciones para su mantenimiento.

1.5 Balasto

El primer elemento de la superestructura es el *balasto*, mismo que de acuerdo con la Unión Internacional de Ferrocarriles (2024) se define como un “Material granular pétreo sobre el que asientan las traviesas. Silíceo calizo”. El sistema constructivo de *vía con balasto* es mayormente utilizado por su menor costo respecto a la *vía en placa,* sin embargo, esto no limita la funcionalidad que aporta este sistema al desarrollo de los ferrocarriles, por el contrario, lo promueve (Aritua, 2019).

De forma general Freystein et al. (2015) declara que el *balasto* cumple la función de soportar la armadura de las vías y transferir las fuerzas de estas hacia el subsuelo, de modo que para esto es necesario que sea un material elástico y permeable al agua, con capacidad para trabar las vías y transmitir sus fuerzas apropiadamente.

1.5.1 Funciones y comportamiento mecánico.

El *lecho de balasto* de acuerdo con Lichtberger (2010) desarrolla un papel fundamental mediante:
- la transferencia y distribución de las cargas desde las traviesas hacia la subestructura,
- el aporte de resistencia al desplazamiento lateral y longitudinal de las traviesas,
- un fácil restablecimiento de las vías a su posición, cuando se realizan labores de mantenimiento,
- una alta permeabilidad que permite mantener las capacidades de carga del subsuelo,
- la minimización de fuerzas dinámicas gracias a su elasticidad intrínseca y
- la garantía de aplicar labores correctivas para las vías en trabajos de bateo o enderezamiento.

Hay cuatro factores básicos que determinan el cumplimiento a cabalidad de las funciones descritas, estos son: (1) La *altura del balasto*, (2) el *perfil del balasto* (pendiente y cabeza), (3) la calidad del material y (4) el grado de compactación.

Su comportamiento mecánico se basa principalmente en su resistencia a los esfuerzos cortantes, de acuerdo con la teoría de Mohr-Coulomb expuesta por Lichtberger (2010, p. 121) es posible definir los esfuerzos cortantes del *balasto* mediante la relación matemática entre las variables de fuerza cortante aplicada (F_w), área a través de la que se aplica F_w (A_0), el esfuerzo vertical (σ_0) y el ángulo de fricción interno (φ); la relación se presenta en la ecuación 5.

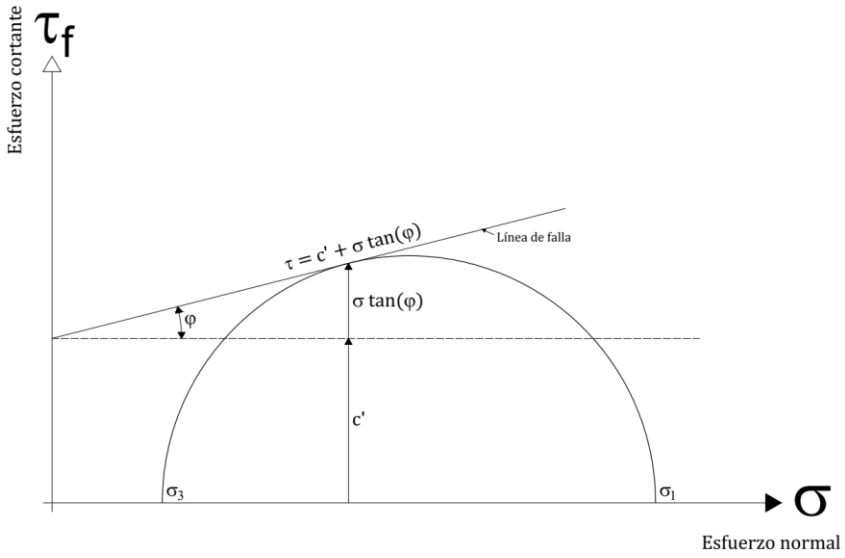
$$\tan(\varphi) = \frac{F_w}{A_0 \cdot \sigma_0} = \frac{\Delta_\tau}{\Delta_\sigma} \qquad \textit{(Ec. 5)}$$

De forma gráfica la Figura 12 amplía la relación expuesta en la ecuación 5, gracias a la consideración de los valores de cohesión que se pueden presentar en los materiales utilizados. En general, los valores de cohesión para el balasto son pequeños, debido a que este en su composición granulométrica tiene una muy baja presencia de materiales finos, sin embargo, inclusive en el balasto nuevo, puede presentar hasta un porcentaje de 3% de materia fina al ser instalado, para efectos de vías férreas la materia fina en el balasto se considera aquella que pasa a través del tamiz de 22,4 mm (Lichtberger, 2010, p. 188).

Un estudio realizado por Fisher (citado en Lichtberger (2010)) expone la combinación de dos tipos de balasto en diferentes porcentajes (30-60 mm y 15-30 mm), el estudio determinó que un porcentaje de 15% del material fino aumenta la resistencia al corte del material (p. 193). Lichtberger (2010) también apunta a que una vez superado el umbral del 15%, entre mayor sea el porcentaje de material fino en el balasto, mayor será su ángulo de fricción interna, lo que reduce significativamente la capacidad al cortante del *lecho de balasto*.

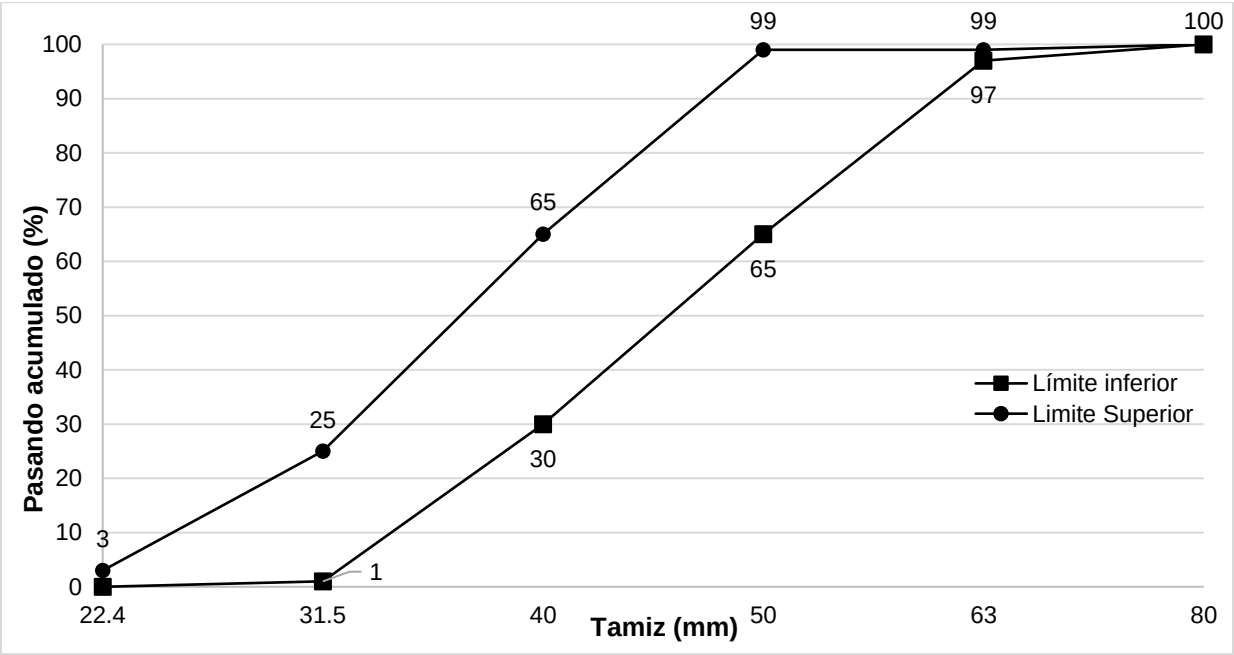
Previo a ser instalado el balasto deberá cumplir con una curva granulométrica que le permita satisfacer los valores de esfuerzo normales y cortantes de acuerdo con el tipo de vía para la que es requerido, estos requerimientos se ahondan en la subsección 1.5.2, a modo de ejemplo en la Figura 13 se muestra un ejemplo de los requisitos granulométricos de DB para un balasto 31.5 / 63 mm nuevo y/o en condiciones óptimas.

Figura 12. *Relación esquemática de esfuerzo cortante y esfuerzo normal, utilizando círculo de Mohr.*



Fuente: Adaptado de Lichtberger (p. 191, 2010).

Figura 13. *Límites granulométricos de DB para balasto Tipo D 31,5 / 63 mm nuevo.*



El balasto requiere de un mantenimiento periódico para satisfacer las condiciones mecánicas requeridas en su haber, donde según Lichtberger (2010) cuando se llevan a cabo estas labores se pueden obtener inclusive mejores cualificaciones en lo respectivo a la composición granulométrica. Ahora bien, la granulometría es un factor de gran relevancia, sin embargo, esta no es suficiente por sí sola para cuantificar la

capacidad mecánica que tendrá el balasto, deben considerarse otras variables más tales como la resistencia al impacto, la resistencia a la abrasión, la resistencia a cargas dinámicas, la resistencia a la intemperie, … y la composición geológica del material; estos factores se exponen en la subsección 1.5.2, ya que están directamente relacionados con las normas que establecen sus definiciones y métodos de medición.

1.5.2 Normativa

La normativa alemana regente establece que el balasto debe satisfacer lo estipulado en el TL 889.0061 (**TL**=Technische Lieferbedingungen, *Condiciones técnicas de entrega)* en su versión vigente, su última edición fue extendida por DB Netz AG en el año 2023 bajo el nombre “TL 889.0061 (DBS 918 061) - Technische Lieferbedingungen Gleisschotter”, la **TL 889.0061** se basa en la norma alemana DIN EN 13450, que a su vez basa su contenido en la norma europea **EN 13450** (CEN, 2003).

La TL 889.0061 establece los requisitos granulométricos del balasto, estos se determinan siguiendo lo establecido por la EN 933-1, lo primero es satisfacer la categoría D establecida por la EN 13450 en la tabla 1, este requisito corresponde con la información presentada en el gráfico de la Figura 13, se añade además que cuando el muestreo se realiza in situ de construcción el porcentaje pasando el tamiz de 22,4 mm puede superar el 3% siempre que no supere el 5%; mientras que de forma específica el contenido de partículas finas (pasando el tamiz de 0,5 mm) en el tamizado en seco es establecido a satisfacer la categoría **B** (máx. 1,0 % en peso< 0,5 mm) según la tabla 2 de la **EN 13450** y el valor para finos debe satisfacer la categoría **B** de la tabla 3 de la EN 13450 (máx. 1,0 % en peso < 0,063 mm).

El balasto de vía debe estar formado por granos quebrados, de forma irregular y de bordes afilados (con aristas vivas), esto se puede determinar mediante los ensayos que determinan el índice de planicidad y el índice de forma, correspondientemente según *EN 933-3* y *933-4*, el requerimiento por parte de DB respectivamente son las categorías $\boldsymbol{FI_{35}}$ *y* $\boldsymbol{SI_{5/30}}$ definidas según las tablas 4 y 5 de la EN 13450. Respecto del largo de partícula, DB establece como categoría objetivo la **B** (máx. 6 % en peso ≥ 100 mm) definida en la tabla 6 de la EN 13450.

Relativo a los requisitos físicos, se deben realizar los ensayos del coeficiente de Los Ángeles y índice de resistencia al impacto, estos según *EN 1097-2*, sus valores deberán coincidir con las categorías $\boldsymbol{LA_{RB}14}$ **y** $\boldsymbol{SZ_{RB}18}$ para que el balasto sea aceptado, correspondientes con lo expuesto en las tablas 7 y 8 de la EN 13450. Deberá además determinarse la densidad de partícula y la absorción de agua, esto según *EN 1097-6.*

Un factor que es de alta relevancia es la durabilidad que pueda presentar el balasto, para esto se evalúan condiciones como la resistencia a ciclos de hielo y deshielo o la presencia de “sonnenbrand” en el yacimiento del que se extraen las rocas. En el particular, Costa Rica se encuentra en una zona tropical en la que no se presentan ciclos de hielo y deshielo, por lo que no se detallará la información al respecto, por otra parte, sí pueden aparecer “sonnenbrand”, la presencia de estas debe determinarse mediante la *EN 1367-3*, las

“sonnenbrand” son un tipo de alteración de las rocas que puede aparecer en algunos basaltos y se manifiesta bajo la influencia de los agentes atmosféricos, que comienza con la aparición de manchas grises o blancas, el efecto es la desintegración de las rocas en pequeños trozos por la pérdida de resistencia de la textura mineral.

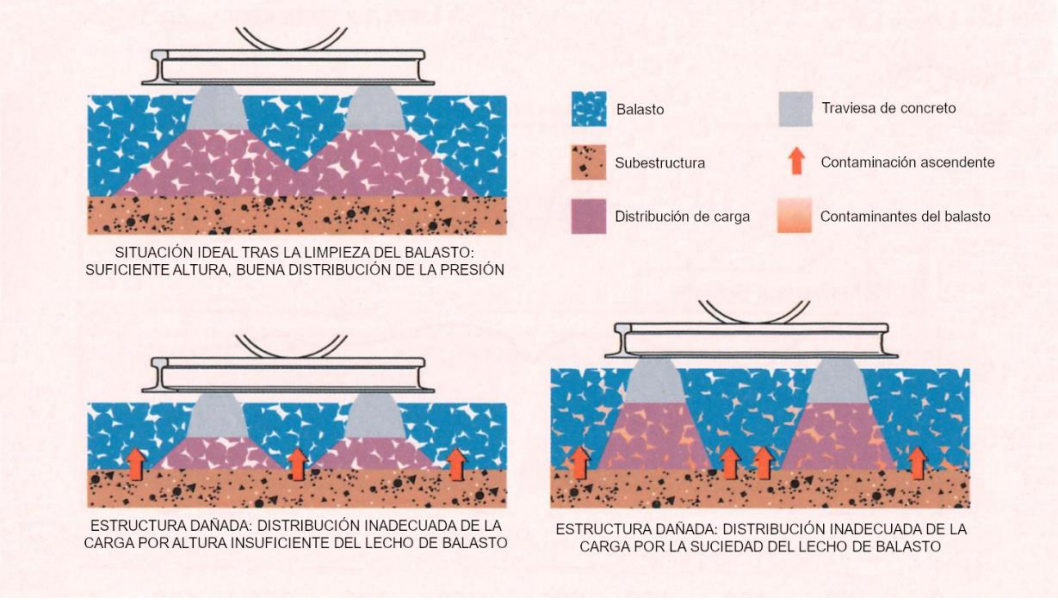
Existen también requisitos respecto a la composición mineral, sin embargo, en función del objetivo de este proyecto, se considera que en la etapa de construcción se determinó de previo la composición mineralógica correcta del material y por lo tanto en las labores de mantenimiento no será este un factor a evaluar.

Respecto a químicos u otros materiales que puedan ser encontrados en la matriz del balasto, que no se consideren parte de la composición mineralógica o no cumplan cualquiera de los puntos expuestos por la TL 889.0061 y/o la EN 13450 se consideran contaminantes y deben ser removidos en las labores de mantenimiento.

1.5.3 Degradación y afectaciones más frecuentes

Con el paso del tiempo en operación, tal como expone Lichtberger (2010), el balasto se contaminará, ya sea por la generación de partículas finas durante la instalación, depósitos trasladados por viento, la caída de residuos provenientes de los materiales transportados, partículas que ascienden desde el subsuelo, los residuos de la vegetación y/o por la abrasión de las rocas bajo la carga del tráfico, también pueden presentarse otros contaminantes de tipo químico (p.187); esta contaminación consiste en la cantidad de partículas finas.

Figura 14. *Esquema gráfico que muestra la interacción entre algunos parámetros del balasto y los contaminantes de este.*



Fuente: Adaptado de Lichtberger, Figura (2010, Figura 345).

La Figura 14 muestra de forma gráfica cómo se ve afectada la superestructura con el aumento de los contaminantes en el lecho de balasto, siendo que se reduce la superposición de los prismas de distribución de carga de las traviesas, esto trae como consecuencia un aumento en las cargas puntuales que recibe tanto el balasto como la superestructura; El aumento de contaminantes se puede ver acelerado por una insuficiente altura de la capa de balasta después de las labores construcción o mantenimiento, o bien, un excedente o inadecuado aislamiento de los materiales de la subrasante favoreciendo así el ascenso de estos.

1.6 Traviesas

Las traviesas componen una parte esencial de la superestructura férrea, siendo que estas son pieza fundamental para la transmisión de cargas y la sujeción de los rieles, entre otras más funciones que desempeñan.

En el mercado actualmente se dispone de traviesas elaboradas utilizando madera, acero, concreto reforzado o inclusive materiales poliméricos, cada material aporta ventajas y desventajas para su uso en la industria, sin embargo, predomina el uso de traviesas de concreto reforzado (en sus diferentes variantes), en especial en Alemania (Lichtberger, 2010). Por lo tanto, para este elemento se expone lo relativo a traviesas elaboradas utilizando concreto reforzado, considerando sus diferentes variantes.

Al inicio de la industria y hasta finales del siglo XIX el uso de traviesas de madera era la única alternativa, a inicios del siglo XX se incorporó al mercado la opción utilizar traviesas de acero y ya para 1906 en DE se estaban desarrollando prototipos de traviesas de concreto, siendo que se empezaron a producir en masa a partir de 1939, a partir de ese momento paulatinamente se convertirían en el tipo de traviesa más utilizado en la industria (Lichtberger, 2010, p. 158).

1.6.1 Funciones y comportamiento mecánico

La principal función de las traviesas es la transmisión de carga desde los rieles hacia la capa inferior de balasto, sin obviar que entre los rieles y el balasto existe un elemento intermedio más que también distribuye cargas, la *placa de apoyo*, empero, para propósitos de este proyecto se considera como uno de los elementos de fijación por lo que no se expone a profundidad.

Entrando en detalle, las funciones de las traviesas, según Lichtberger (2010) son:

- la fácil creación y mantenimiento de las vías;
- la transmisión de cargas desde los rieles hacia el balasto, entiéndase:
    - las cargas verticales de las ruedas,
    - las fuerzas centrífugas horizontales y
    - las cargas longitudinales de los rieles;

- la permanencia de los rieles en el plano:
    - vertical (hinchamiento y/o asentamientos),
    - horizontal (F. centrífuga y F. transversales) y
    - longitudinal (Fluencia, aceleración y térmicas);
- la salvaguarda de las vías:
    - ante obras de construcción y/o mantenimiento,
    - cuando se da la fractura de un riel y/o
    - cuando se da un descarrilamiento;
- la amortiguación de vibraciones y
- la reducción del ruido provocado por el impacto de los trenes al transitar.

Para cumplir las funciones mencionadas las traviesas se someten a diferentes pruebas para evaluar si son capaces de satisfacer los requerimientos específicos de las vías donde se utilizarán, para esto en función del tipo de cargas a las que se enfrentan se les realiza ensayos de (1) carga estática, (2) carga dinámica, (3) fatiga, (4) conductividad eléctrica, (5) resistencia a la intemperie, entre otros; estos ensayos se describen en la subsección 1.6.2.

Dentro de la gama de traviesas de concreto reforzado se puede destacar las bibloque y las de tipo monobloque (Lichtberger, 2010), las más conocidas a nivel de Costa Rica son las de tipo monobloque, en DE también son las más utilizadas, el uso de tipo bibloque es mínimo, por lo que se expone lo respectivo a las de tipo monobloque únicamente.

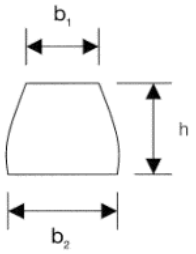
Las traviesas monobloque se pueden presentar en dos diferentes versiones, las que se fabrican utilizando la metodología de concreto pretensado o bien, concreto postensado; ambas resisten valores de esfuerzo similares, los esfuerzos que deben resistir son esfuerzos de compresión directa, cortantes y momento flector, este último es el más relevante y la razón del porque se debe utilizar concreto reforzado mediante pre o postensado, ya que el concreto tiene una muy baja capacidad a los esfuerzos de tensión que se provocan en el momento flector (Lichtberger, 2010).

Ahora, las traviesas de tipo monobloque también pueden ser clasificadas en función de su forma (comúnmente esta es la clasificación más utilizada), ya que en función de esta también se presentan cambios en el comportamiento mecánico de las mismas, las principales variaciones se dan en la resistencia al desplazamiento lateral (Lichtberger, 2010).

Predominan las *traviesas monobloque de concreto pretensado*, de modo que en referencias más recientes se procede directamente a exponer únicamente las fabricadas bajo este formato, tal es el caso de Freystein et al. (2015) que expone las diferentes variedades utilizadas en DE, en la
TABLA 1 se presenta esta información, a pesar de la variedad según Handbuch Eisenbahninfrastruktur (2019) la más utilizada es la B70W.

TABLA 1. DIMENSIONES TÍPICAS PARA DIFERENTES TRAVIESAS

Entiéndase:
[1)] Traviesa preensamblada.
[2)] Traviesa plana/Lisa.
[3)] Traviesa sin sujeción al riel.

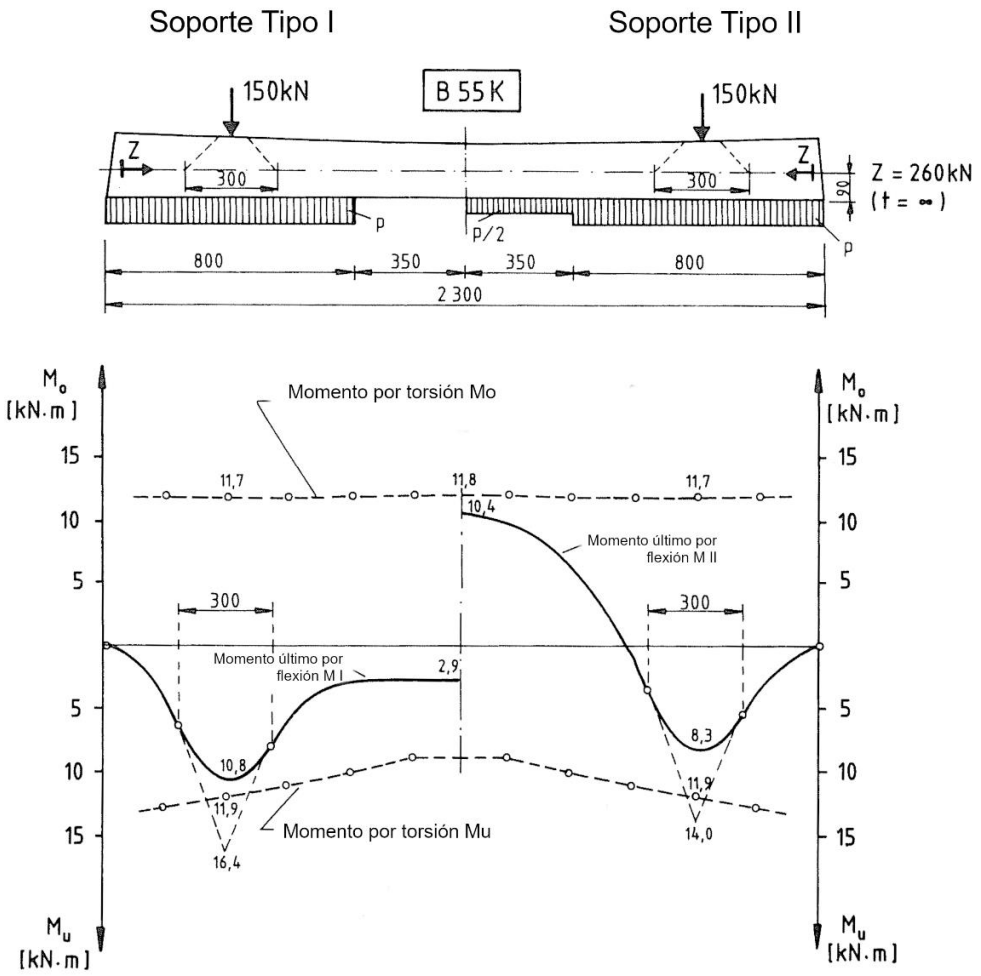


Designación	Largo [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	h [mm]	Masa [kg]
B 70 W-(60 y 54)	2600	150	300	210	aprox. 304[1)]
B 70 Wo-(60 y 54) (Riel no inclinado)	2600	150	300	210	aprox. 304[1)]
B 70 So W-(60 y 54) con plantilla elástica	2600	150	300	210	aprox. 304[1)]
B 70 W-2,4-(60 y 54)	2400	150	300	210	aprox. 284[1)]
B 90 W-(60 y 54)	2600	aprox. 150	320	200	aprox. 355[1)]
B 58 W-54	2400	150	300	200	aprox. 249[1)]
B58K	2400	150	300	200	aprox. 260[2)]
B 75 W-300	2800	aprox. 150	330	240	aprox. 450[3)]
BBS 1 W-(60 y 54)	2400		570	225	aprox. 574[1)]
BS 55, BS 60	2270	200	350	200	250[3)]
BS 62	2270	200	350	200	aprox. 260[1)]
BS 65	2380	200	280	195	223[3)]
BS 66	2270	190	350	217	aprox. 274[3)]
BS 78	2500	210	295	226	295[3)]
B55K	2300	150	300	200	aprox. 229[2)]
B 53, BV 53	2300	136	280	195	229[3)]
B12, B12[1)]	2300	125	280	205	aprox. 304[3)]

Fuente: Adaptado de Freystein et al., p. (2015, p. 544).

Los modelos mecánicos actuales según lo recopilado por Lichtberger (2010) consideran la deformación elástica de la subestructura bajo estas, anteriormente se consideraba un apoyo rígido. Los esfuerzos que cobran mayor relevancia en las traviesas son el momento flector y la torsión, mismos que se generan por la transmisión de cargas desde el riel hacia estas, la Figura 15 muestra a modo de ejemplo el comportamiento de una traviesa B55K ante una carga estática desde la rueda de 150 kN, considerando un flujo lineal del esfuerzo a través de la traviesa; se presentan los dos casos de análisis de respuesta del balasto más comunes.

Figura 15. *Esquema de cargas y esfuerzo para traviesa pretensada de concreto de tipo B55K, con dos casos de presión de balasto.*



Fuente: Adaptado de Lichtberger, Figura (2010, Figura 97).

1.6.2 Normativa

Para las traviesas de concreto, que son el objeto de este estudio, en la Unión Europea y en DE rigen un conjunto de normas denominadas bajo el código *EN 13230 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Traviesas y soportes de concreto,* son 6 normas en total que abordan cada una lo siguiente:

- **Parte 1: Requisitos generales**.
- **Parte 2: Traviesas monobloque pretensadas.**
- Parte 3: Traviesas bibloque de hormigón armado.
- Parte 4: Soportes pretensados para aparatos de vía.
- Parte 5: Elementos especiales.
- **Parte 6: Diseño.**

Las partes 1,2, 4 y 6 marcadas con negrita en la lista anterior son el foco de esta subsección, a pesar de que se pueden usar traviesas de otros tipos en el esquema constructivo de una vía, a modo de ejemplo y referencia se usan las traviesas de concreto monobloque pretensadas, las cuales son cubiertas en su totalidad por las normas mencionadas y están dentro del alcance de esta investigación.

Dentro de las normas base que regulan las traviesas se hace cita a normas europeas que regulan los materiales para la elaboración de estas, en este específico se hará referencia tanto a la norma europea como a la norma costarricense equivalente o regente en ese específico.

En el caso de las traviesas es posible también reutilizarlas para esto cada operador ferroviario debe definir los términos y condiciones para este fin, en el caso de Alemania, la DB a través del TL 889.0164 ha establecido el proceso y los parámetros a satisfacer para su reutilizar traviesas (DB Netz AG, 2006).

1.6.2.1 EN 13230-1. Requisitos generales (CEN, 2016a)

En esta norma se exponen los aspectos básicos que deben satisfacerse para el diseño, construcción y uso de traviesas de concreto, se definen los requisitos para materias primas, el proceso de fabricación y los requisitos del producto acabado, en el Anexo A se puede encontrar el Anexo F de la norma donde se condensan mediante 3 tablas los datos que deben ser verificados en las traviesas en las diferentes etapas, sin embargo, esto es únicamente y se aclara constantemente en el contenido de la norma que estos parámetros pueden variar previo acuerdo entre el comprador y el fabricante mediante un manual de requisitos específicos que establezca el comprador, mismo que el proveedor debe conocer de previo.

Como acotación, las normas respecto al cemento hidráulico, agregados para concreto hidráulico y lo referente al concreto hidráulico deben referirse a nivel costarricense respectivamente mediante las normas INTE C147, ASTM C33 y ACI 211.1, cada una en su versión vigente. Es posible encontrar equivalencias entre los requisitos de la norma EN 1320-1 para con las normas costarricenses.

1.6.2.2 EN 13230-2. Traviesas monobloque pretensadas (CEN, 2016b)

Desarrolla algunos criterios técnicos y procedimientos de control específicos para traviesas monobloque pretensadas, relacionados con la fabricación y ensayo de estas y los componentes necesarios para ejecutar estos ensayos.

Siguiendo los procedimientos de esta norma el comprador puede asegurarse de la calidad ofrecida por el proveedor, ya que entre ambos se comparte información a nivel confidencial que permite asegurar el estándar de calidad mínimo establecido por la norma o bien, requisitos aún mayores establecidos por el comprador. SE pueden conocer valores de la traviesa tales como sus Momentos (positivo y negativo bajo la sección central y positivo bajo la sección del riel) y coeficientes estáticos y dinámicos de carga que permiten establecer las cargas de la traviesa (máximas y de ensayo positivas-negativas).

1.6.2.3 EN 13230-6. Diseño (CEN, 2020a)

Si bien, en este proyecto no se diseñan traviesas, ya que esta es una etapa generalmente superada cuando se llega a la etapa de mantenimiento, puede existir el caso en el que sea necesario una renovación total en las vías para la cual se requería de inclusive diseñar traviesas específicas para satisfacer las necesidades que tendrá la nueva vía.

La norma expone los métodos que pueden ser utilizados en el proceso de diseño, el método empírico, el teórico y el combinado, cada uno de los primeros tiene un enfoque diferente, por lo que en ocasiones para optimizar el proceso de desarrollo del producto se combinan elementos de ambos dando lugar así al método combinado.

Se recomienda al lector profundizar el contenido de esta norma ya que explora y utiliza técnicas complementarias a lo expuesto en la subsección 1.6.1.

1.6.2.4 TL 889.0146. Condiciones Técnicas de entrega; Traviesas de concreto pretensado reacondicionadas (DB Netz AG, 2006)

Este documento expone las regulaciones que deben satisfacer las traviesas para poder ser ***reutilizadas*** en los proyectos de mantenimiento, renovación o construcción de vías de DB, la primera condición que establece el documento es que no podrán emplearse traviesas reutilizadas para vías de alta velocidad, únicamente las permite para su uso en trenes secundarios entiéndanse trenes ligeros, urbanos y/o metros.

El uso de traviesas reutilizadas implica un estricto control durante su proceso de remoción, almacenamiento y reinstalación final en las vías de destino, para esto las traviesas deberán satisfacer el no tener defectos graves como fracturas, grietas o desgarros en toda su composición, esto incluye las sujeciones que pueda tener o deba soportar. El reglamento declara que las traviesas deben satisfacer las necesidades para una ruta con ancho nominal de 1435 ± 3 mm y satisfacer el perfil de inclinación para los rieles con una relación de 1:40.

En general, las traviesas no podrán presentar desgastes significativos en las zonas de apoyo de los rieles (máx. ≤ 1 mm) y en sus demás caras podrá haber algunos signos de desgaste, desconchados menores a 1 cm de profundidad y sin llegar a exponer el acero de refuerzo, no se podrá tener residuos químicos sobre la traviesa que puedan dar lugar a reacciones de desgaste en el futuro (entiéndanse grasas, aceites, carburantes, combustibles, …).

Cuando se decida reutilizar travi¡”as e’tas deberán ser aprobadas de previo por el departamento de control de calidad (en DB cuentan con su propio laboratorio) con verificaciones realizadas a nivel interno y externo.

1.6.3 Problemas frecuentes

Las traviesas se ven sometidas a grandes esfuerzos de flexión y cortante que comúnmente pueden llegar a generar afectaciones a su capacidad estructural, sin embargo, por sí solas no presentarán graves afectaciones, sus daños se presentan en conjunto cuando existen problemas en las sujeciones, el confinamiento o integridad del balasto, o bien fracturas de riel que afectan la correcta distribución de fuerzas entre las traviesas circundantes.

Según diversos autores los problemas más frecuentes son debidos principalmente a situaciones relacionadas con el proceso de fabricación, díganse (1) agregados de baja calidad, (2) moldeo inadecuado, (3) acero de refuerzo sobre oxidado , entre otros; También se pueden registrar problemas por la exposición a contaminantes en las vías, algunos de estos aceleran procesos como la carbonatación del concreto y por ende la oxidación del refuerzo interno (Freystein et al., 2015; Lichtberger, 2010; Menius & Matthews, 2020).

Cuando se tienen ciclos de congel¡”ión ’ descongelación, la expansión y contracción del agua en las pequeñas fisuras presentes en las traviesas pueden estas llegar a convertirse en grietas e inclusive fracturas, autores como Stuart et al. (2022) concluyen que estos efectos pueden ser contrarrestados con el uso de fibras sintéticas incorporadas en la mezcla del concreto.

Los autores LoPresti & McHenry (2019) estudiaron el desgaste que en ocasiones puede darse en la superficie de la traviesa sobre la que se asienta el riel y concluyen que este efecto se da principalmente en vías de alta velocidad o vías de carga con valores por eje superior a los 100 kN, esta situación se genera cuando hay una vibración excesiva en las vías que pueden ser producto de defectos en los rieles o fallas del sistema de amortiguación de los trenes, con el tiempo la geometría de las vías se ve afectada tanto a nivel vertical como horizontal y esto se refleja en la pendiente de inclinación para el riel, los autores concluyen que el desgaste en la traviesa está relacionado directamente con la pendiente del asiento.

1.7 Rieles

Los rieles son el elemento de la superestructura que recibe de forma directa la carga de los trenes que es transmitida a través de las ruedas, junto con estas ambos son los elementos que soportan los mayores esfuerzos en la infraestructura de las vías, esto es debido a que entre ambos elementos existe la menor área de contacto para la distribución de fuerzas, esta tiene un valor aprox. De 3 cm² según Führer, p. (1979, p. 20).

1.7.1 Funciones y comportamiento mecánico

Los rieles son el elemento de las vías que de acuerdo con Lichtberger, Capítulos (2010, Capítulos 2 y 3) cumplen con las funciones de:

- Ser la superficie de ruedo para los vehículos,
- brindar estabilidad y guía para los trenes,
- recibir, transmitir y distribuir las cargas de las ruedas hacia las traviesas, así como,
- soportar los esfuerzos que se produzcan en su haber por la carga de las ruedas, fuerzas por cambios de temperatura y tensiones residuales de su proceso de producción.

Para satisfacer las descritas funciones, según Lichtberger, p. (2010, p. 89) los rieles deben poseer:

- Elevada resistencia:
    - al desgaste,
    - al aplastamiento,
    - a la fatiga,
    - a la tensión,
- grandes valores de límite elástico y esfuerzo de rotura frágil,
- gran dureza,
- buena soldabilidad,
- excelente acabado superficial,
- uniformidad del perfil en su longitud y
- bajas tensiones residuales tras el proceso de fabricación.

Los valores específicos para estos parámetros varían de acuerdo al requerimiento de carga, la frecuencia de uso de las vías, … es decir dependen directamente del uso esperado que tendrán las vías (pasajeros, carga, mixto, alta velocidad, …), esto se detalla más a profundidad en la subsección 1.7.2.

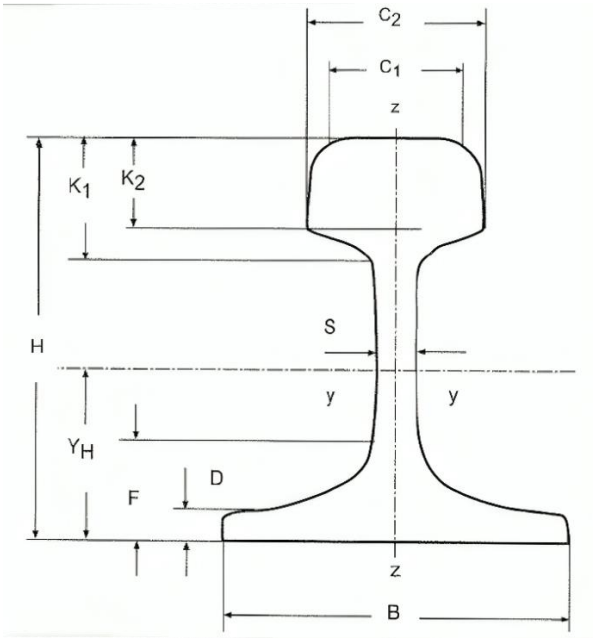
Los rieles pueden clasificarse en función de su dureza y/o su perfil de sección transversal, siendo que esta última es la primera categoría para referenciar un riel, una vez establecido el perfil se define la dureza y distribución interna de esta en el riel; la definición de un perfil y su respectiva dureza se hace según las necesidades específicas del tramo de vía en el que se instalará el riel, pueden darse incluso variaciones entre el riel interno y externo en una curva, de modo que en una línea, independientemente de si esta es para transporte de pasajeros o carga, no se usa un único tipo de riel en toda su extensión, sino que se presentaran diferentes perfiles y durezas a lo largo de esta (Freystein et al., 2015; Führer, 1979; Lichtberger, 2010).

La Figura 16 y la TABLA 2 exponen las principales dimensiones (no todas) y otros valores relevantes de los perfiles de riel utilizados en Alemania y las correspondientes equivalencias del estándar de la UIC.

La Figura 17 muestra un esquema básico de las fuerzas que reciben de forma directa los rieles, estas provocan esfuerzos diversos en la estructura interna del riel, siendo que se pueden presentar esfuerzos de tensión, compresión, cortantes y/o momentos de flexión y torsión; dos o más de estos pueden presentarse simultáneamente, esta es una de las razones por lo que aún a hoy con los modelos de elemento finito y más desarrollos no ha sido posible determinar con exactitud el origen de algunos daños que se presentan en los rieles (ej. Los squats), la complejidad para describir el comportamiento mecánico de los rieles en operación

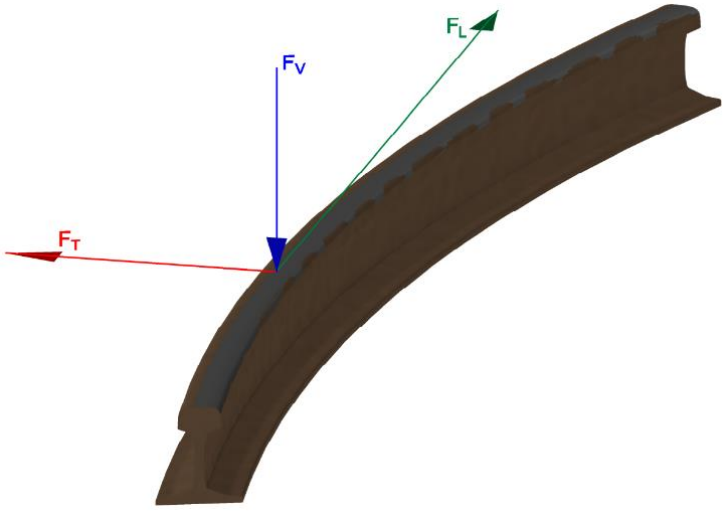
hace de este uno de los más grandes retos de la ingeniería ferroviaria y a su vez una de las áreas de mayor estudio e investigación. En la Figura 17 entiéndanse: F_T como las fuerzas transversales/horizontales, F_V como las fuerzas verticales y F_L como las fuerzas longitudinales/axiales. Estas fuerzas se presentan generalmente acompañadas por un par de momento rotando sobre sus ejes.

Figura 16. *Perfil de un riel con cotas geométricas*



Fuente: Tomada de Lichtberger, Figura (2010, Figura 48).

Figura 17. *Esquema de fuerzas básicas transmitidas desde la rueda hacia el riel.*



Fuente: Concepto adaptado de Führer, Figura (1979, Figura 2.2).

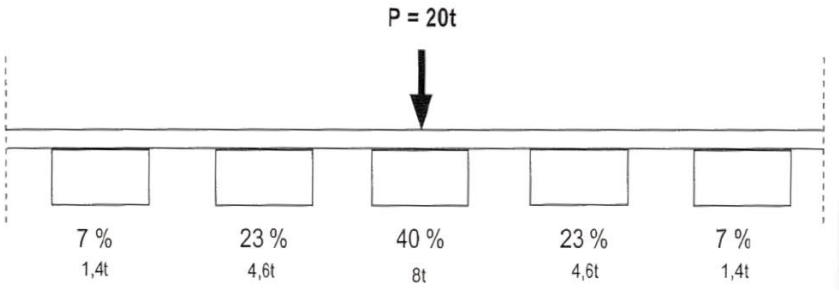
TABLA 2. PARÁMETROS VARIOS DE PERFILES DE RIEL

Designación	Altura Riel H [mm]	Ancho Patín B [mm]	Ancho Cabeza C_1 [mm]	Ancho Cabeza C_2 [mm]	Ancho Alma S [mm]	Altura Cabeza K_1 [mm]	Altura Cabeza K_2 [mm]	Altura Patín F [mm]	Espesor Patín D [mm]	Área Perfil A [mm^2]	Masa lineal G [kg/m]	Centro de masa Y_H [mm]	Inercia I_x [cm^4]	Módulo de Sección S_x [cm^3]
Perfiles usados en Alemania														
SMR29	115	90	47	55	12	40	31	19	10	3794	29,8	55	624	104
S30	108	108	60,3	60,3	12,3	31	24	19,5	7	3825	30	52,1	606	109
S33	134	105	58	58	11	39	31,8	19	95	4264	33,5	67,3	1040	155
S41, 10R	138	125	67	67	12	43	31,8	24	95	5271	41,4	68,2	1368	196
S41, 14R	138	125	67	67	12	43	31,8	24	9,5	5216	41	68,2	1368	196
49E1 (S49)	149	125	67	70	14	51,5	39,8	27,5	10,5	6297	49,4	73,3	1819	240
54E3 (S54)	154	125	67	70	16	55	43,3	29	12	6948	54,5	75	2073	262
(Perfiles designados por la UIC)														
50E4 (UIC50)	152	125	70	72,2	15	49,4	36,3	28	10	6392	50,2	76	1940	253,6
54E2 (UIC54E)	161	125	67	69,5	16	51,4	38,7	30,2	12	6855	53,8	69,5	2308	276,4
54E1 (UIC54)	159	140	70	72,2	16	49,4	36,3	30,2	11	6934	544	75	2127	279,2
60E1 (UIC60)	172	150	72	74,3	16,5	51	37,5	31,5	11,5	7687	60,3	80,9	3055	335,5

Fuente: Adaptado de Lichtberger, p. (2010, p. 99).

El riel distribuye las fuerzas verticales con un comportamiento similar al de una viga, las cargas se transmiten hacia los apoyos (traviesas); en el caso de los rieles los apoyos se ubican a gran cercanía uno de otro con una separación constante, esto implica que los apoyos ubicados a una determinada distancia del punto de aplicación de la fuerza (interfaz rueda/riel) percibirán un valor nulo o despreciable de esta, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 18 donde se distribuye una carga de 20 Ton desde una rueda a través del riel hacia un conjunto de 6 traviesas, lo expuesto refiere a los modelos simplificados que se desarrollaron en el siglo XX, en la actualidad existen modelos de elemento finito que permiten cuantificar de forma aún más exacta la zona de influencia.

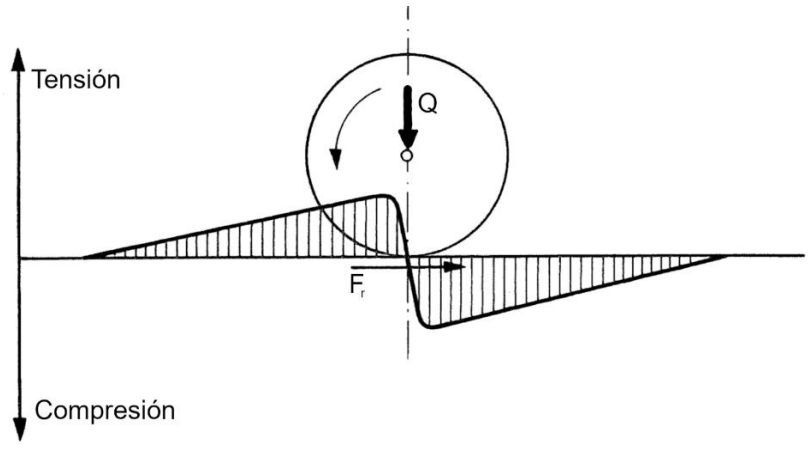
Figura 18. *Rango de influencia para una carga vertical de 20 Ton, esquema de traviesa principal y circundantes.*



Fuente: Tomado de Lichtberger, Figura (2010, Figura 98)

Respecto de las fuerzas longitudinales, estas son transmitidas mediante la fricción entre la rueda y el riel, cuando se dan fuerzas de aceleración y/o frenado estas producirán una fuerza de arriostre (F_r) y a su vez un par de torsión que se manifiesta en esfuerzos de tensión y compresión sobre el riel, la Figura 17 muestra este comportamiento.

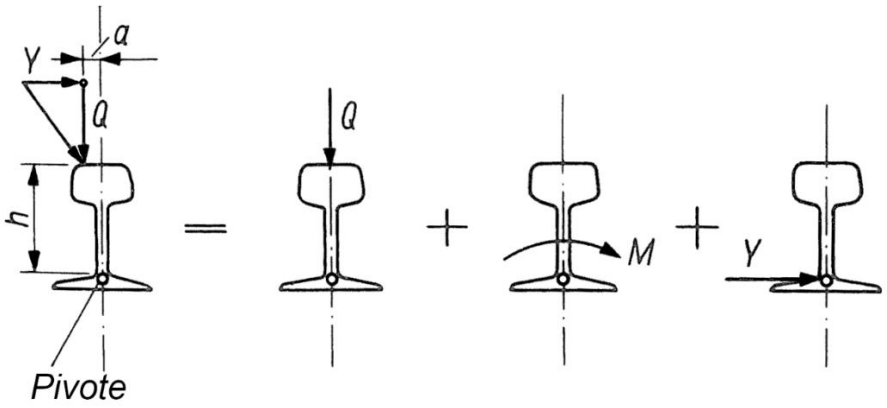
Figura 19. *Esfuerzos en el riel ante el accionamiento de la rueda.*



Fuente: Adaptado de Führer, Figura (1979, Figura 2.6).

Finalmente, las fuerzas verticales y horizontales no son más que componentes del vector de fuerza transmitido desde de la rueda, este se encuentra inclinado respecto al eje vertical del eje, esta inclinación respecto al eje vertical del riel es debida a la forma cónica de la rueda y del riel mismo junto a la inclinación con la que se instala el riel en las vías, el punto de acción específico de esta fuerza sobre el riel varía en función de la configuración de la vía para esa cota. La Figura 20 muestra como el accionar de esta fuerza desde la rueda al descomponerse no sólo transmite la fuerza horizontal (Y) y la Vertical (Q), sino que también genera un momento (M) sobre el riel.

Figura 20. *Descomposición de fuerza transmitida desde la rueda.*



Fuente: Adaptado de Führer, Figura (1979, Figura 2.11)

1.7.2 Normativa

Los rieles son uno de los elementos de la infraestructura ferroviaria con más investigación y regulación, en Alemania estos deben satisfacer las regulaciones europeas, así como los reglamentos internos de la DB, a estos no fue posible obtener acceso, sin embargo, estos son primordialmente adaptaciones de las normas europeas al respecto, se deja constancia de las normas correspondientes a rieles a nivel de DB, estas son las TL 823.0200, TL 889.2481, TL 889.2541, TL 889.2542, TL 889.2543, TL 889.2551 y TL 889.2552, estas refieren respectos a las geometrías, calificaciones del acero utilizado, así como también respecto de los procesos y requisitos para las soldaduras en las juntas de los rieles.

De seguido se hace una exposición de las normas europeas que rigen diseño, requisitos de materiales, procedimientos de fabricación, condiciones de entrega, procesos de soldadura y demás, esta información por facilidad se presenta en el CUADRO 3.

CUADRO 3. NORMATIVA EUROPEA APLICABLE A RIELES, SEGÚN ALCANCE DEL PROYECTO.

Designación	Campo de acción	Descripción / Nombre	Objeto y campo de aplicación
EN 13231-2:2020	Recepción de trabajos	Parte 2: Recepción de Rieles reperfilados en vía plena, aparatos de vía y dispositivos de expansión	Define los requisitos técnicos y las mediciones para aceptar el trabajo de reperfilado longitudinal y/o transversal de las cabezas de los Rieles en plena vía, aparatos de vía y aparatos de dilatación. Refiere a Rieles según la norma EN 13674-1.
EN 13231-5:2018	Recepción de trabajos	Parte 5: Procedimientos para el reperfilado de Riel en plena vía, interruptores, cruces y dispositivos de expansión	Especifica el procedimiento para la planificación y ejecución de trabajos de reperfilado de Rieles e incluye además la descripción de los defectos en la superficie de los Rieles. La norma es aplicable tanto a trabajos en plena vía como en aparatos de vía que se realizan normalmente conforme a los requisitos de las series de Normas EN 14033 y EN 15746. Refiere a Rieles según la norma EN 13674-1.
EN 13674-1:2011 + A1:2017	Rieles, general	Parte 1: Rieles Vignole de masa mayor o igual a 46 kg/m	Especifica los Rieles ferroviarios Vignole de masa lineal mayor o igual a 46 kg/m, para su uso en vía convencional y de alta velocidad. Define nueve grados de acero perlítico, que cubren un rango de dureza de entre 200 HBW a 440 HBW y abarcan aceros no aleados sin tratamiento térmico, aceros aleados sin tratamiento térmico, aceros no aleados con tratamiento térmico y aceros de aleación con tratamiento térmico. Especifica 23 perfiles de Riel. Expone dos clases de enderezado del Riel que difieren en los requisitos de alineación recta, planicidad de la superficie y el perfil de la cabeza. Se especifican dos clases de tolerancias en el perfil.
EN 14587-1:2018	Soldadura	Soldeo de nuevos Rieles a tope por chispa; Parte 1: Rieles de grado R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT y R400HT en una instalación fija	Especifica los requisitos para la aprobación del proceso de soldeo en una instalación fija, junto con los requisitos para la producción posterior de soldaduras. Aplica al soldeo de Rieles Largos Soldados en instalación fija para uso ferroviario.

CUADRO 3. Continuación

Designación	Campo de acción	Descripción / Nombre	Objeto y campo de aplicación
EN 14587-2:2009	Soldadura	Soldeo de nuevos Rieles a tope por chispa; Parte 2: Rieles nuevos de grado R220, R260, R260Mn y R350HT mediante máquinas móviles de soldeo en ubicaciones distintas a instalaciones fijas	Especifica los requisitos para la aprobación de un proceso de soldeo por medio de una máquina móvil de soldeo por chispa en ubicaciones que no sean instalaciones fijas, así como los requisitos de las empresas de soldeo y de la producción de soldaduras. Los requisitos de esta parte de la norma deben ser de aplicación cuando se utiliza una máquina móvil de soldeo por chispa en una situación estática pero temporal. Aplica al soldeo de Rieles Largos Soldados en vía, para uso ferroviario.
EN 14730-1:2017	Soldadura	Soldeo aluminotérmico de Rieles; Parte 1: Aprobación del proceso de soldeo	Define los ensayos de laboratorio y los requisitos para la aprobación del proceso de soldeo aluminotérmico realizado en condiciones de taller. Refiere a Rieles según la norma EN 13674-1. El cumplimiento de los requisitos especificados en la norma no garantiza por sí mismo la aptitud para el uso de un proceso de soldeo bajo las condiciones específicas de la vía y del tráfico.
EN 14730-2:2021	Soldadura	Soldeo aluminotérmico de Rieles; Parte 2: Cualificación de soldadores por aluminotermia, aprobación de contratistas y aceptación de soldaduras	Especifica los requisitos de: – aprobación de las instalaciones para formar, ensayar y mantener las competencias en soldeo aluminotérmico, y de los formadores en soldeo. Se aplica a los procesos de soldadura aluminotérmica que cumplen los requisitos de la Norma EN 14730-1. Se requiere que el sistema de formación y ensayos de los soldadores esté aprobado por la autoridad ferroviaria competente; – aprobación de contratistas de soldadura aluminotérmica. Se aplica a los contratistas que utilizan procesos de soldeo aluminotérmico, según los requisitos de la Norma EN 14730-1, y que emplean soldadores que poseen un permiso de soldeo válido, tal y como se define en el capítulo 4 de este documento; – aceptación de los controles finales para soldaduras aluminotérmicas y de los inspectores de soldaduras aluminotérmicas aprobados por la autoridad ferroviaria. No incluye ninguna inspección previa de soldadura, por parte del soldador, ni de otros fabricantes.

CUADRO 3. Continuación

Designación	Campo de acción	Descripción / Nombre	Objeto y campo de aplicación
EN 15594:2009	Soldadura	Reparación de Rieles por soldeo por arco eléctrico	Especifica la reparación por soldeo por arco eléctrico y está limitada solamente a las cabezas de los Rieles. Describe los sistemas de aprobación para los consumibles y los procedimientos utilizados en el soldeo para la reparación de Rieles por arco eléctrico con electrodo revestido y con alambre tubular. La norma incluye las tareas relacionadas con la calidad y las responsabilidades del personal involucrado en la reparación de Rieles por soldeo por arco eléctrico. Refiere a Rieles según las normas EN 13674-1 y EN 13674-2. Esta norma europea se puede aplicar "in situ", al lado de la línea, o en zonas fuera de la vía.
EN 16729-1:2016	Ensayos no destructivos	Parte 1: Requisitos para los principios de evaluación y de inspección por ultrasonidos	Aplica a los ensayos de los Rieles instalados en la vía para detectar discontinuidades internas. Especifica los requisitos para los principios de ensayo y sistemas con el fin de producir resultados comparables en lo que se refiere a la ubicación, tipo y tamaño de las discontinuidades en los Rieles. Refiere a Rieles según la norma EN 13674-1.
EN 16729-2:2020	Ensayos no destructivos	Parte 2: Inspección por corriente de Foucault de los Rieles de vía	Aplica a los ensayos de Rieles instalados en la vía para detectar fisuras en la superficie del Riel. Especifica el requisito para el ensayo de principios y sistemas, a fin de producir resultados comparables con respecto a la ubicación y características de las fisuras en la superficie. Refiere a Rieles según la norma EN 13674-1.
EN 16729-3:2018	Ensayos no destructivos	Parte 3: Requisitos para identificar los defectos internos y de superficie del Riel	Especifica los métodos de los ensayos no destructivos (NDT Non Destructive Testing) utilizados para detectar defectos internos y superficiales en los Rieles, y la idoneidad de cada método en la detección y evaluación de los defectos típicos de los Rieles instalados en la vía. No especifica los criterios de evaluación de los defectos en los Rieles y las acciones derivadas. Refiere a Rieles según la norma EN 13674-1.

CUADRO 3. Continuación

Designación	Campo de acción	Descripción / Nombre	Objeto y campo de aplicación
EN 16729-4:2018	Ensayos no destructivos	Parte 4: Cualificación del personal para ensayos no destructivos en Rieles	Define los requisitos de calificación del personal que planifica, realiza y supervisa los ensayos no destructivos en el sector industrial: infraestructura de mantenimiento ferroviario, en los Rieles y aparatos de vía, y en vías simples. Refiere a Rieles según las normas EN 13674-1 y EN 13674-2.
EN 16729-5:2023	Ensayos no destructivos	Parte 5: Ensayos no destructivos en soldaduras en vía	Especifica los procedimientos de ensayo para inspección visual e inspección por ultrasonidos de las soldaduras de Riel en vía, realizadas sobre perfiles de Riel conformes con los requisitos de la Norma EN 13674-1. Define el procedimiento para soldaduras de reparación y soldaduras de unión. Especifica los principios de los procedimientos de ensayo de las soldaduras en estado acabado.
EN 16843:2024	Juntas, requisitos	Requisitos mecánicos de las juntas de los Rieles de rodadura*	Específica los requisitos para las juntas mecánicas de Riel para instalación permanente con Rieles de fondo plano de 46 kg/m y superiores. La norma: - establece los requisitos para las juntas de Riel aisladas y no aisladas, para Riel tensado (Riel largo soldado, CLS) y no tensado (Riel articulado); - definir los requisitos mecánicos y eléctricos para la homologación de tipo y para la aceptación de las juntas de Riel aisladas que se fabrican en una fábrica (construcción prefabricada) así como se montan in situ (construcción en obra). Excluye todo tipo de juntas mecánicas para instalación temporal en la vía, los dispositivos de expansión (cubiertos en la norma EN 13232-8) y las juntas especiales en la construcción de agujas.
EN 17397-1:2020	Defectos	Parte 1: Gestión de los defectos del Riel	Especifica el sistema de gestión de defectos que el administrador de infraestructuras utiliza, a fin de controlar el riesgo de accidentes graves causados por la degradación de defectos internos o superficiales en los Rieles, de conformidad con las Normas EN 13674-1, EN 13674-2, EN 13674-4 y EN 15689:2009 (excluyendo los Rieles de garganta de la Norma EN 14811, que necesitan sistemas alternativos).

Fuente: Adaptado de European Committee for Standardization (2009a, 2009b, 2016a, 2017a, 2017b, 2018a, 2018b, 2018c, 2018d, 2020b, 2020c, 2020d, 2021, 2023, 2024).

1.7.3 Problemas frecuentes

Tal cual se expuso de previo, los rieles son los elementos más abundantes en normalización e investigación, inclusive existe una norma europea para establecer un sistema de gestión de defectos específicos en los rieles, en esta norma se aboca a informar sobre los defectos que se pueden presentar, los límites de acción para con estos, un panorama del sistema de gestión de defectos y mitigación de riesgos; El detalle de estos temas la norma los profundiza mediante anexos, el anexo A profundiza en la tipología de los defectos, mientras que el anexo B ahonda en los límites de acción inmediata (CEN 2020d). Esta información se incorpora en el Anexo B.

1.8 Sistemas de evaluación

Un sistema de inspección (o evaluación) se define como un conjunto de “Reglas, procedimientos y gestión para realizar la inspección” (Organización Internacional de Normalización, 2012a) de modo que a través de este y de forma imparcial se pueda identificar la conformidad o no de los elementos inspeccionados, sea con respecto a normas estándar (de preferencia) o bien, normas propias para cada elemento.

En concordancia con el objetivo de este proyecto, para proponer los procesos y el sistema de la metodología de evaluación se siguió lo dictado por las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) en su versión internacional. Las normas afines al propósito mencionado se detallan de seguido.

1.8.1 ISO/IEC 17000

Esta norma define de forma estandarizada los “términos y las definiciones generales relacionados con la evaluación de la conformidad (incluyendo la acreditación de los organismos de evaluación de la conformidad)” (Organización Internacional de Normalización, 2020).

Si bien, en esta norma no se establecen requisitos para la evaluación de la conformidad, sí se establece la terminología estándar sobre la que se desarrollan estas normas, de manera tal que permite una comunicación clara entre diferentes entes.

1.8.2 ISO/IEC 17020

La norma cubre las “actividades de los organismos de inspección cuyo labor puede incluir el examen de materiales, productos, instalaciones, plantas, procesos, procedimientos de trabajo o servicios, y la determinación de su conformidad con los requisitos” (Organización Internacional de Normalización, 2012a).

Dentro de los aspectos considerados en esta norma se destacan como punto principal la imparcialidad del ente inspector, así como también las calificaciones del personal que realiza las inspecciones, el uso de equipos computacionales, digitales y manuales, la definición de los métodos de inspección y procedimientos, los registros de información durante inspección y finalmente el sistema de gestión.

1.8.3 ISO/IEC 17025

Esta norma estipula “requisitos que permiten a los laboratorios demostrar que operan de forma competente y que tienen la capacidad de generar resultados válidos” (Organización Internacional de Normalización, 2017).

La norma desarrolla lineamientos para la operación desde la perspectiva legal, organizacional y técnica de laboratorios, se rescata principalmente la sección dedicada a las condiciones mínimas ambientales, de equipo, personal y procedimientos para ejecutar ensayos. Se expone también de forma general los elementos a satisfacer cuando no se cumple las condiciones o bien, cuando se debe desarrollar un método no estandarizado.

1.8.4 ISO/IEC 17065

La norma cubre requisitos que pretenden “garantizar que los organismos de certificación operan esquemas de certificación de manera competente, coherente e imparcial, facilitando así el reconocimiento de tales organismos y la aceptación de productos, procesos y servicios certificados en el ámbito nacional e internacional” (Organización Internacional de Normalización, 2012b).

De forma general se establecen los pasos que debe seguir un ente certificador al evaluar entes de inspección o bien laboratorios, regidos respectivamente por el cumplimiento de las normas ISO/IEC 17020 e ISO/IEC 17025.

1.9 Sistemas de Mantenimiento y/o evaluación ferroviaria

La industria ferroviaria ha avanzado y ha sido promovida a nivel europeo de tal forma que en la última década se han desarrollado algunas guías enfocadas específicamente en la gestión de los activos férreos, esto mediante el Comité Europeo de Normalización (CEN), también se han realizado investigaciones a nivel europeo, americano e internacional al respecto de la evaluación férrea propiamente, de seguido se detallan las normas y los principales resultados de las mencionadas investigaciones.

1.9.1 Normas relativas a mantenimiento

Debe entenderse primero la definición que se usa para un sistema de mantenimiento, esta parte y está relaciona con la definición de sistema de gestión de calidad, especificando más en garantizar la seguridad en el tiempo del elemento al que se aplica el sistema, “es un conjunto completo de especificaciones técnicas, organizativas y de otro tipo para el cumplimiento del mantenimiento” (European Committee for Standardization, 2019) (de la infraestructura férrea, en este caso).

A pesar de que el proyecto se limita a evaluar, no a la completa gestión del mantenimiento, muchos de los conceptos entre mantenimiento y evaluación son compartidos, es por esto por lo que se exponen de seguido las normas europeas que les definen.

1.9.1.1 EN 13306. Terminología del mantenimiento (CEN, 2017a)

Está norma específica de forma general todos los conceptos ligados a los procesos de mantenimiento, propiamente “específica los términos genéricos y las definiciones para las áreas técnicas, administrativas y de gestión del mantenimiento” (CEN, 2017a)

1.9.1.2 EN 17018. Mantenimiento del material Rodante; Términos y definiciones (CEN, 2019)

Lo primero que debe aclararse respecto a esta norma es que no es elaborada para la infraestructura ferroviaria, sin embargo, los términos y definiciones que expone son fácilmente adaptables para la infraestructura y aporta una óptica más acertada y cercana a la industria férrea, respecto de la norma genérica de mantenimiento, la ya citada EN 13306. La norma define los conceptos más relevantes y comúnmente usados cuando de mantenimiento y evaluación a nivel de vehículos ferroviarios se trata.

1.9.1.3 EN 17397-1. Parte 1: Gestión de los defectos del Riel (CEN, 2020d)

Consultar la subsección 1.7.2 respecto de la Normativa para rieles.

1.9.2 Investigaciones respecto a la gestión y evaluación de la infraestructura ferroviaria

Muchos de los equipos y procedimientos hoy usados en la industria, son el resultado de investigaciones que se han realizado en el pasado, en el respecto de las más recientes investigaciones relacionadas con la gestión y evaluación de infraestructura ferroviaria se rescatan de acuerdo con el alcance del proyecto las expuestas de seguido, considerando que a nivel costarricense la investigación en el eje de mantenimiento ferroviario es inexistente, no se citan investigaciones costarricenses, sin embargo, se deja constancia de investigaciones

realizas mediante proyectos de graduación de estudiantes de la carrera de ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica, estas han sido enfocadas a realizar restauraciones y/o ampliaciones de la infraestructura, con objetivos de restauración y/o ampliación, si el lector desea profundizar más en este respecto puede consultar el repositorio de tesis de la UCR en su página web.

1.9.2.1 Uso de Sistemas de Información Geográfica para la gestión de infraestructura ferroviaria.

Esta investigación fue desarrollada por F. Chen et al. (2000) buscando tener un primer acercamiento al uso de SIG en la administración ferroviaria china en este caso, su investigación concluyó en ese momento que se pueden obtener los siguientes productos de información con el uso de SIG:

- Información disponible a partir de la tecnología tradicional de gestión de datos;
- Representaciones en pantalla y en papel de la información del emplazamiento mostrada en un mapa;
- Imágenes en pantalla que muestren fotografías de las condiciones del emplazamiento de infraestructuras que centradas en algunos problemas para resolver o tomar decisiones;
- Consultas dinámicas de bases de datos para formular preguntas ad hoc y traducir las respuestas en cambios en mapas o dibujos para ilustrar dónde y cuánto; y
- Señalar en mapas, planos de infraestructuras, planos esquemáticos, ubicaciones de instalaciones puntos de construcción de obras, secciones de mantenimiento para proporcionar datos, tablas, gráficos, fotos o estadísticas.

En una segunda etapa M. Chen et al. (2012) llevan a una propuesta concreta de modelo SIG, para la administración, en esta ya es posible encontrar una combinación donde el sistema SIG es parte de un macrosistema denominado “Desarrollo Orientado al Tránsito” (del inglés transit-oriented development) que busca integrar el desarrollo de las ciudades en función de la capacidad de movilización mediante sistemas de transporte público, apuntas a que el uso de SIG puede traer beneficios a largo plazo en el desarrollo de ciudades integrales, actualmente el piloto del proyecto se ha estado ejecutando en la línea 2 del metro de Wuhan en China, los autores usaran este insumo para depurar el modelo actual.

1.9.2.2 Modelación mecánica por computadora de vías férreas.

Este ha sido uno de los campos de estudio en el que más se han invertido recursos tanto a nivel europeo como globalmente, no fue posible tener acceso a los modelos usados actualmente en DE, sin embargo, se deja constancia de modelos usados a nivel americano, Stuart et al. (2023) modelaron el comportamiento mecánico de la vía usando almohadillas extra de soporte en las traviesas y usando solamente capas de balasto, sus

resultados y el modelo pueden ser extrapolados y adaptados para los límites y requerimientos bajo los códigos alemanes y europeos.

1.9.2.3 Desarrollo de equipos específicos para evaluación

Oden et al. (2018) han desarrollado un equipo manual que puede ser transportado en las vías para realizar mediciones del grado de contaminación del balasto mediante el uso de equipos radar de penetración terrestre o Georadar (GPR, siglas en inglés) acoplados a un equipo rodante no guiado por rieles, los autores concluyen que el uso de GPR con el desarrollo actual tiene una buena precisión, sin embargo, recalcan que el modelo de análisis debe ser calibrado específicamente para las condiciones previstas en situ, ya que el equipo es extremadamente sensible a las condiciones que puedan haber en la subestructura, así como a variaciones de humedad en el balasto. Los autores consideran factible y recomiendan desarrollar en el futuro aplicaciones en las que los equipos de GPR se puedan acoplar a maquinas férreas para generar mediciones continuas y ampliar de esta forma las bases de datos para un mejor ajuste de los modelos de análisis.

La tecnología de GPR, actualmente no es utilizada formalmente para evaluar la contaminación del balasto, es utilizada por empresas como Plasser & Theurer principalmente para el análisis de la subestructura en sus propiedades “macro” como estratigrafía.

La tecnología GPR y similares como lo son la de ultrasonido son utilizadas para la evaluación del estado de los rieles, la empresa Vossloh AG ha desarrollado equipos como el SoniQ Rail Explorer que mediante el uso de ultrasonido permite determinar las condiciones de los rieles a nivel superficial e interno, este es un equipo manual, portátil que le permite al operador en tiempo real visualizar mapas de calor del estado del riel permitiendo de esta forma detectar de manera inmediata las afectaciones que pueda tener la vía, de acuerdo con la logística del operador esta información puede también sincronizarse de forma automática con sus bases de datos, el equipo cuenta con las capacidades de registrar la cota en la que se ubica un determinado defecto a partir de una cota inicial aportada por el técnico. Esta empresa no sólo ha desarrollado este equipo, sus investigaciones van más allá y cuenta con equipos para soldadura, reperfilado de rieles, e instalación de estos.

La empresa Amberg Technologies, es una empresa suiza con operaciones globales que ha desarrollado equipos específicos para inspección de operación manual, algunos de estos combinan diferentes tecnologías como lo son LiDAR (Teledección de objetos mediante el uso de laser, del inglés, Light detection and ranging), ultrasonido e inclusive Geoposición Satelital (GPS), sus equipos se basan modelos no lineales de elemento finito (*Amberg Rail Inspection*, s/f).

La empresa DB Bahnbau Gruppe GmbH, que está asociada de forma directa con el conglomerado DB AG, en el año 2023 presentaron la incorporación de un sistema de análisis y modelación 3D, mediante un sistema de sensores incorporados a la máquina de medición mecánica de vías EM SAT 120 de Plasser & Theurer, el sistema consta de un sistema de cartografía móvil de Trimble, el MX9, además de dos escáneres láser, una cámara panorámica y tres cámaras planas, incorpora también una antena GNSS (sistema global de

navegación por satélite) y un sensor de medición inercial, también cuando es requerido se puede incorporar un georadar; este último aporta datos “macro” respecto de la geometría y composición de las capas inherentes de la estructura, el conjunto de los sensores permite generar un modelo 3D georreferenciado con metadatos que pueden incluir la composición estratigráfica de las vías, su geometría exacta con precisión de hasta 1 mm (según la velocidad usada al levantar los datos) y su evolución en el tiempo (Vaatz & Dumitsch, 2023), en las Figura 21 y Figura 22 se presenta esta máquina.

Figura 21. *Vista frontal del vehículo de medición EM SAT 120 con MMS de DB Bahnbau Gruppe GmbH*

Fuente: Tomado de (Vaatz & Dumitsch, 2023, Figura 1)

Figura 22. *Vista trasera del vehículo de medición EM SAT 120 con antenas de georradar de DB Bahnbau Gruppe GmbH*

Fuente: Tomado de Vaatz & Dumitsch, Figura (2023, Figura 2)

Capítulo 2: Metodología

El esquema de trabajo de este proyecto viene dado en función de su objetivo principal, alcance y limitaciones. De esta forma el abordaje fue principalmente teórico y a un nivel exploratorio, utilizando como sustento para los postulados información documental recabada de normativa a nivel alemán, costarricense e internacional, así como revistas científicas y reglamentos internos de las compañías ferroviarias tanto de DE como de CR.

Este proyecto forma parte de una visión a largo plazo en la que se plantean varias etapas de investigación: Propuesta teórica (Actual etapa), Plan piloto (Segunda etapa) y Puesta en marcha (Tercera etapa). En concordancia con el tiempo disponible para su ejecución, así como el nivel académico por el que se opta es que se definió la realización únicamente de la propuesta teórica en esta etapa, esta propuesta sin embargo se procuró analizarla en conjunto con empresas del sector para validar su aplicabilidad en la industria.

2.1 Recopilación de información

El proceso de búsqueda y análisis de información sigue el esquema de revisión documental propuesto por Martínez-Corona et al. (2023), el cual aplicado a la presente investigación se esquematiza de la siguiente manera.

2.1.1 Objetivo de la investigación

Para concretar esta fase que representa la base de la investigación fue necesario establecer los antecedentes históricos y técnicos de cada uno de los sistemas ferroviarios en los países de estudio, así como también un estudio del estado del arte, esta labor se realizó usando las fuentes de información descritas de seguido, que a su vez establecieron las categoría primarias de evaluación.

2.1.1.1 Información relativa a Costa Rica

La información se recabó mediante un acercamiento con el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), fue la fuente primaria de información a nivel costarricense ya que el Instituto Costarricense de Normalización (INTECO) no dispone de normas técnicas específicas para infraestructura ferroviaria. Costa Rica en materia ferroviaria únicamente posee normativa a nivel administrativo y político.

2.1.1.2 Información relativa a Alemania

La recolección de información se realizó mediante reuniones presenciales con profesores universitarios de la HFT que aportan su experiencia en el campo, así como el acceso a información documental de revistas científicas del área, tales como Eisenbahntechnische Rundschau ® (ETR) que cuenta con más de 70 años generando información para el sector ferroviario en Alemania y Der Eisenbahningenieur (EI); también se analizó información proveniente de las normas del Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización, DIN) y aquellos reglamentos de la Deutsche Bahn que fue posible tener acceso mediante sus diferentes páginas web, ya que no fue posible tener acceso mediante el contacto directo.

2.1.1.3 Normativa internacional

Para el estudio de normativa internacional se hizo especial foco en las normas europeas dictadas por la Comisión de Aplicaciones ferroviarias (CEN/TC 256) del Comité Europeo de Normalización (CEN, por sus siglas en inglés) así como documentos de referencia dictados por la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC, por sus siglas en francés). También se consultaron documentos de AREMA.

2.1.1.4 Investigaciones previas

Respecto al estado del arte en el campo de la investigación, se consideraron publicaciones alemanas, costarricenses y de otros países que puedan sumar valor a los elementos de estudio. Se estudiarán también publicaciones estadounidenses dada la compatibilidad entre ambos países (CR-USA) en el sector constructivo, aunque esto será principalmente como referencia.

Debe resaltarse que una mayoría de los resultados de investigaciones encontradas estaban enfocadas en uno o máximo dos de los elementos considerados en este proyecto, por lo que entre las fuentes de información existe una gran variabilidad, elemento que se considera de forma más detallada en el Capítulo 4:.

2.1.2 Problema de la investigación

La definición del sujeto y los objetos de estudio se determinó en concordancia con la magnitud de la industria y los recursos disponibles, entiéndanse como tiempo y personal. Se contó con un investigador, con el apoyo de tutores y un periodo de 5 meses para completar la investigación, por lo que el alcance se limitó a realizar una propuesta teórica (aplicable en primera instancia para Costa Rica) determinada mediante un análisis multicriterio del sistema ferroviario alemán, en la subsección 2.1.3 se detalla más a profundidad las categorías y variables a considerar.

Respecto del sujeto, la industria ferroviaria en DE tiene una ventaja significativa respecto de la industria en Costa Rica, a modo de ejemplo: la mayoría de las vías en Costa Rica aún no utilizan la tecnología de *RLS,*

mientras que esta, tal y como se expuso en la sección 1.2 en Alemania se aplica desde el siglo anterior (Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 2019). Por lo tanto, se encontraron diferencias marcadas entre los objetos de estudio en los diversos elementos.

Toda la información requerida para establecer el sujeto y objetos de estudio para esta fase proviene de los medios descritos en la subsección 2.1.1.

2.1.3 Categorías y variables

Se consideraron tanto categorías como variables, en primera instancia, al inicio del proyecto las categorías globales corresponden a las descritas en los temas de la subsección 2.1.1.; es decir; normativa costarricense, normativa alemana e investigaciones previas; estas se mantuvieron en la extensión del proyecto; Sin embargo, las categorías propias de cada objeto de estudio fueron definidas una vez se realizó el estudio bibliográfico, para consultar esta categorías consulte la sección de resultados, en el gestor podrá encontrar cada una de estas, de forma general se tienen propiedades geométricas y propiedades físicas, están son compartidas por todos los elementos estudiados

Cada una de las categorías iniciales se aplica a los tres objetos de estudio (*balasto, traviesas* y *rieles*) de forma independiente. El propósito de estas categorías fue facilitar el acercamiento bibliográfico a los recursos de información.

Las variables por considerar fueron estrictamente aquellas que puedan ser replicables a nivel práctico en la industria, excluyendo aquellos valores que actualmente sólo puedan ser determinados utilizando equipos experimentales, aun así, se hace mención de estas como referencia para futuras etapas.

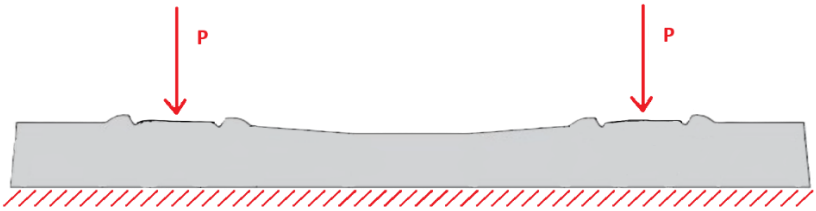
2.1.3.1 Balasto

Se plantearon de forma preliminar las variables de: Densidad, resistencia al desplazamiento lateral, dureza, capacidad drenante (ligado a la cantidad de finos, composición y grado de desgaste del material original). Estos valores son algunos de los mencionados por Wilk & Li (2023), conforme avanzó la investigación se ampliaron, consulte la sección 3.3.1.

2.1.3.2 Traviesas

Para estos elementos se consideró de forma previa a modo de variables, la resistencia última al momento flector, así como su resistencia al cortante, ambas bajo un esquema de cargas similar al mostrado en la Figura 23, se aclara que este es únicamente un esquema de referencia, del cual pueden darse variaciones en el sistema de apoyo y la posición de las cargas horizontales. Todas las variables de este elemento se pueden consultar en la sección 3.3.2.

Figura 23. *Esquema simplificado de cargas de traviesas estándar de concreto.*



2.1.3.3 Rieles

Para este último elemento se propusieron preliminarmente las variables de resistencia a la tensión y compresión, así como su resistencia al pandeo y sus valores de expansión y contracción térmica, luego del estudio de las fuentes, se concluye que existe una amplia gama de defectos que no se ajustan a las categorías generales, estos se pueden consultar en la subsección 3.3.3

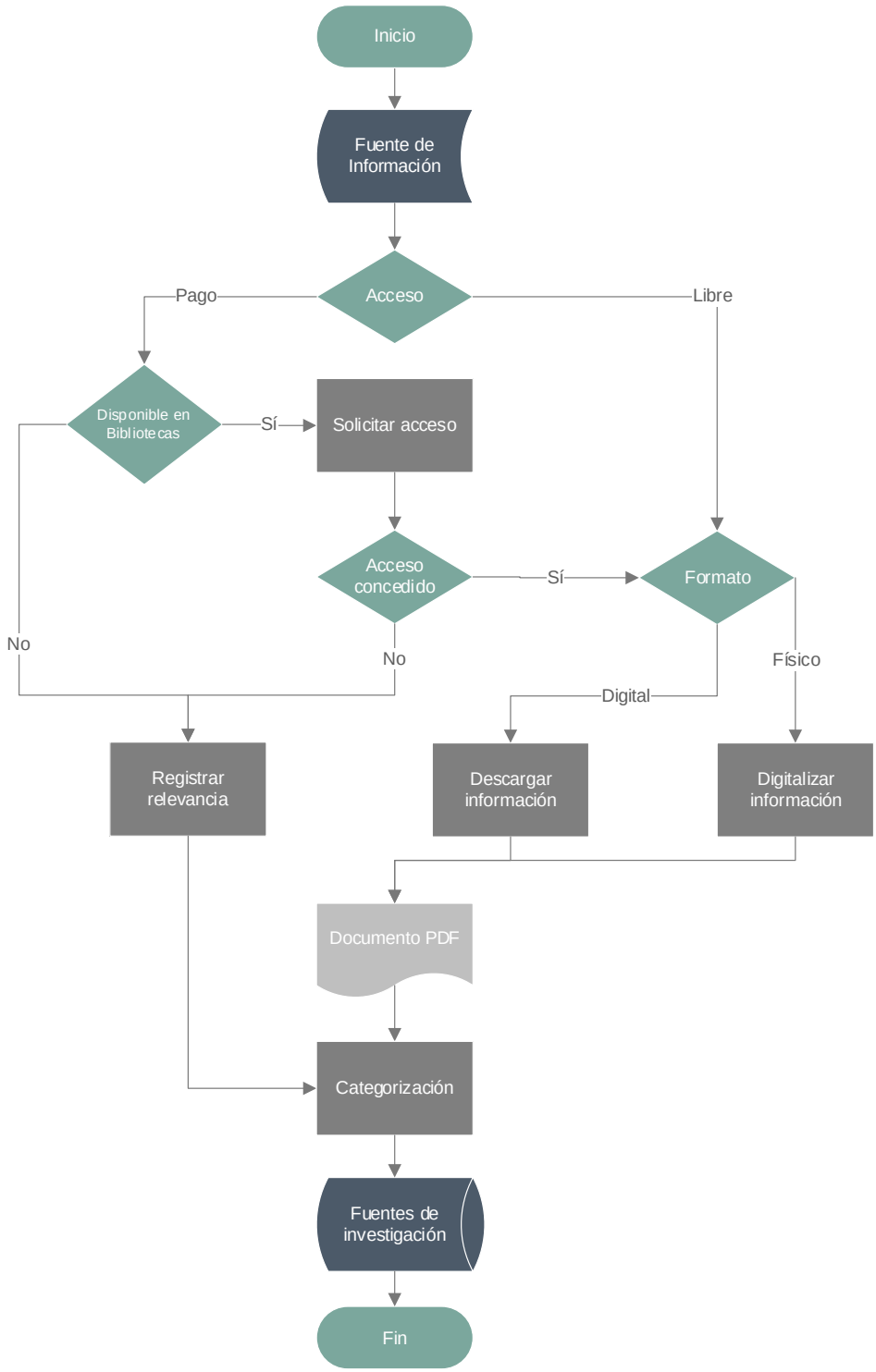
2.2 Gestor de información y referencias

Debido al alto volumen de referencias que se utilizaron como sustento para el desarrollo de este proyecto se volvió necesario desde el inicio la implementación de un gestor de información y un gestor de referencias, para este propósito se optó por utilizar la herramienta de software Mendeley Reference Manager ® con la que no sólo se hace una eficiente gestión de las referencias, sino que también permite dentro de su plataforma explorar la información correspondiente a cada una de las fuentes de información, siempre que se usen archivos PDF.

En la Figura 24 se presenta el diagrama de flujo implementado para la gestión de la información y referencias durante este proyecto. Debe notarse que la categorización se realiza previo a su incorporación a la base de datos en el software, a cada una de las fuentes se le asigna automáticamente su respectiva referencia, o bien cuando por carencia de los datos necesarios dentro de la misma información o incorrecta interpretación del programa, la referencia deberá ser creada o actualizada manualmente.

La base de datos creada mediante el proceso de previo descrito incluye también fuentes de información que en el avance del proyecto fueron descartadas, sea por su relevancia, alcance, presentación de resultados inconclusos y/o incongruentes con otras fuentes de información o bien, fuera del campo de estudio actual. En el caso de descartar fuentes de información que se encuentren dentro del alcance de la investigación únicamente se podrá realizar bajo la premisa de haber sido demostrada su inexactitud o incongruencia por algún estudio o investigación posterior; cuando se trate de normativa las fuentes de información no podrán descartarse exceptuando aquellas reglamentaciones que hayan sido derogadas por legislación más reciente o de mayor grado jerárquico legal de acuerdo a la jerarquía normativa correspondiente a su país de origen o región de aplicación.

Figura 24. *Gestión preliminar de información. Creación de base de datos de información.*



2.3 Análisis de información

Existen al menos 12 técnicas de análisis de datos según Barrera (2023), para este proyecto se utilizó una combinación de análisis mecanicista, análisis de textos y análisis factorial.

Una vez obtenida la base de datos mostrada en la Figura 24 se procedió a realizar primero un análisis individual de los textos para identificar y extraer aquellos datos que efectivamente sean relevantes para la investigación; el análisis mecanicista permitió comprender las variaciones que existen entre los diferentes resultados de investigaciones y/o normas, de esta forma se pudo también identificar las maneras para equiparar cuando existen diferencias marcadas entre los datos. Finalmente, con el análisis factorial se consideraron aquellos factores que no se incluyen en las normas o reglamentaciones, pero que sí han sido estudiados por otros investigadores.

2.3.1 Presentación de los resultados

Dado el esquema de trabajo y la secuencia de análisis se elaboró una herramienta digital editable (base/preliminar) para ser adaptada por el usuario final a su contexto local. En esta herramienta se incluyó para cada una de las categorías: las variables y métodos disponibles para su evaluación, y valores de referencia cuando corresponda; esta herramienta le permite al usuario establecer ponderaciones para con cada una de las variables a fin de obtener el estado del elemento evaluado. A modo de guía de usuario la herramienta se acompaña por explicaciones en prosa y/o diagramas de flujo que establecerán su funcionamiento, los medios para su adaptación y los procesos para realizar cada una de estas actividades, esta guía se llamó Manual de proceso.

Dentro del manual se incluyen imágenes e información de referencia extra al gestor, con esto el usuario tiene mayor claridad respecto a la metodología y procedimientos que debe seguir en su implementación.

Cuando se trate de diagramas de flujo estos fueron elaborados con el programa computacional Microsoft Visio® por su facilitad al integrarse en reportes y documentos elaborados con el procesador de texto Microsoft Word®, tal fue el caso en este proyecto; los reportes, manuales y documentos de apoyo se elaboraron usando esta plataforma, de forma general se utilizará el paquete de programas de oficina Microsoft 365® y algunos de extra de la misma casa matriz cuando sean requeridos.

Se incluyen dentro del informe final algunas capturas de pantalla de la herramienta elaborada bajo el formato de figuras, sin embargo, la herramienta dado su formato no se incorpora dentro de este, se brinda un medio para su acceso mediante su alojamiento en servidores web externos.

Capítulo 3: Resultados

El desarrollo de aún una parte de un sistema de gestión, como lo es una metodología de evaluación para elementos específicos, representa uno de los mayores avances para Costa Rica en el último siglo y el presente, de acuerdo con lo expuesto respecto de la historia férrea costarricense, en su momento Costa Rica fue pionero en la región, sin embargo, todos sus desarrollos y cualquier procedimiento, reglamentos y/o normas internas que regularan el proceso de mantenimiento y gestión del sistema desaparecieron con el cierre técnico de su ente rector tres décadas atrás, hoy muchos cuentan con el deseo de recuperar la gloria del pasado, a pesar de esto, es momento de ver al futuro, Costa Rica puede volver a ser pionero en su desarrollo ferroviario con la ejecución de los proyectos que el estado ha planteado a través de los últimos diez años, la propuesta de seguido desarrollada se aboca a que estos proyectos luego de su construcción pueden ser gestionados con los últimos avances en el sector respecto a inspección y evaluación.

Se recomienda encarecidamente al lector antes de continuar con su lectura (a menos de que tenga un conocimiento previo) consultar la información expuesta en el Capítulo 1: y según su propio criterio también las referencias ahí contenidas. Utilice este enlace para descargar los archivos adjuntos (Matriz de evaluación, Manual de procedimientos y más).

3.1 Propiedades evaluables de los elementos de la infraestructura usadas para determinar su calidad

En seguimiento de los objetivos planteados, para conocer cuáles son las propiedades que determinan la calidad de los elementos de la infraestructura férrea, se desarrolló un amplio estudio de la normativa vigente en Alemania y Europa, respecto a los sistemas de gestión, evaluación e inspección de infraestructura ferroviaria; no sólo se consultó la normativa mencionada, también se consideraron algunos reglamentos y estándares de referencia a nivel internacional como son los códigos de la UIC o la Asociación Americana de Ingeniería Ferroviaria y Mantenimiento de Vías (AREMA, por sus siglas en inglés), este último únicamente como una consideración respecto de algunas investigaciones consultadas; no fue posible incorporar información proveniente de normativa técnia costarricense ya que este es inexistente tanto a nivel de INTECO como del INCOFER, esto fue manifestado por el Ing. José Antonio Quirós, quien es el jefe de vías y estructuras del sector pacífico del INCOFER y a su vez verificado por el autor.

La calidad de los elementos de infraestructura ferroviaria no puede ser determinada mediante calificaciones basadas en propiedades cualitativas, esta evaluación debe realizarse en función de propiedades y variables que sean cuantificables, debido a esto se decidió utilizar como fuente de información para la determinación de las propiedades relacionadas únicamente aquellos procedimientos que puedan (aun cuando no estén normalizados) ser replicados por otro operador.

De forma resumida en el Capítulo 1: se presentan de forma organizada todos los reglamentos y códigos que actualmente están relacionados de forma directa o indirecta con la inspección y evaluación de las propiedades para los correspondientes elementos de la infraestructura férrea, en este punto es importante dejar claro que **una mayoría** de los reglamentos y estándares internos de la compañía ferroviaria alemana, la Deutsche Bahn, no son de libre acceso, aun ni cuando de fines académicos se trata, esto fue constatado a inicios de esta investigación a través de interacciones por correo electrónico, mensajes e inclusive comunicación directa. Debido a lo expuesto cuando no fue posible de forma legal y libre acceder a los reglamentos de DB se escaló al siguiente nivel, la normativa nacional alemana y europea.

Cuando alguno de los procesos, medios y/o equipos de evaluación se rige bajo alguna de las normas estudiadas, se deja constancia explícita para que el lector pueda consultar las referencias según su interés, así también cuando se trate de procesos experimentales aún no normalizados. Debido a que este proyecto se trata de una propuesta basada en un sistema ya existente y normado, una mayoría de su contenido contiene referencias a documentos y/o autores externos.

Se exponen tanto las propiedades que evalúan la calidad, como también los procedimientos que se utilizan para llevar a cabo esta tarea, algunos de estos procedimientos son normalizados entre diferentes entes entre tanto que otros son reglamentos internos aplicables únicamente a una región, o aplicables únicamente a un operador, o bien aplicables únicamente a un determinado país en función de sus condiciones climatológicas o ambientales, la clasificación expuesta en esta sección provee de una mejor comprensión de las diversas propiedades y sus medios de evaluación.

De seguido se expone el alcance de las normas existentes para cada uno de los elementos estudiados, la Figura 25 expone de forma gráfica la cantidad de procedimientos que cuentan con una norma o reglamento asociado que regula su ejecución, en esta consideración no se incluyen las normas que definen dimensiones o valores mínimos para categorización, únicamente se consideran los métodos para determinar dichas propiedades. Entre tanto en el CUADRO 4 se ve el detalle de las propiedades y medios usados organizados según el elemento evaluado.

Las propiedades presentadas en el CUADRO 4 son las más relevantes de acuerdo con el método que se utiliza para evaluarles, no son las únicas que pueden ser evaluadas, de conformidad con los parámetros definidos respecto a las repetibilidad y a la medición cuantitativa, las incluidas son únicamente aquellas que satisfacen estas premisas, para algunas dentro del cuadro se indica también el método más común utilizado para su medición.

CUADRO 4. PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS DE LA SUPERESTRUCTURA FÉRREA QUE SE EVALÚAN MEDIANTE PROCESOS NORMALIZADOS

Balasto	**Traviesas**	**Rieles**
Propiedades geométricas in Situ:		
Conformación de capa (Fotogrametría)	Ubicación, daños superficiales (Fotogrametría)	Daños superficiales (Fotogrametría)
Tamaño de partículas, conformación de capa (Laser)	Múltiples (Medición manual)	Daños superficiales al mm (Laser)
Densidades de capa (GPR)	Múltiples (Laser)	Perfil Longitudinal (Sensores inerciales)
		Perfil transversal por ultrasonido
Propiedades geométricas en laboratorio:		
Granulometría de partículas gruesas	Medición manual	Perfilometría Laser
Granulometría de partículas finas	Laser	Perfil transversal por ultrasonido
Granulometría de Finos		
Indice de Forma		
Indice de Lajas		
Longitud de partícula		
Propiedades físicas in Situ:		
		Inconsistencias internas (Corrientes de Fouler)
		Inconsistencias internas por ultrasonido
Propiedades físicas en laboratorio:		
Coef. Los Angeles	Rest. Compresión	Inconsistencias internas (Corrientes de Fouler)
Coef. Impacto	Flexión (tres puntos)	Determinación de Temperatura Neutra
Coef. Micro-Deval	Desgaste de asientos	Dureza
Rest. Ciclos hielo deshielo	Rest. Ciclos hielo deshielo	Ensayo de flexión ambas direcciones
Densidad	Absorción de agua	Ensayo de tensión
Absorción de agua	Rest. Impacto	Ensayo de torsión
Sonnerbrand		Ensayo de fatiga
		Inconsistencias internas por ultrasonido

Fuente: Adaptado de (DB Netz AG, 2006, 2023; European Committee for Standardization, 2003, 2016b, 2016a, 2017b, 2018c, 2020a, 2020d, 2021a, 2023, 2024; Vossloh AG, s/f)

En contraste con la Figura 25 y el CUADRO 4, en la Figura 26 y el CUADRO 5 se presentan la cantidad y el detalle de procedimientos que no cuentan con una norma asociada para normalizar su ejecución, sea esto por encontrarse en etapa experimental o bien, por ser procesos propios de determinadas regiones.

Figura 25. *Métodos de inspección normados que evalúan propiedades de los elementos de la superestructura férrea*

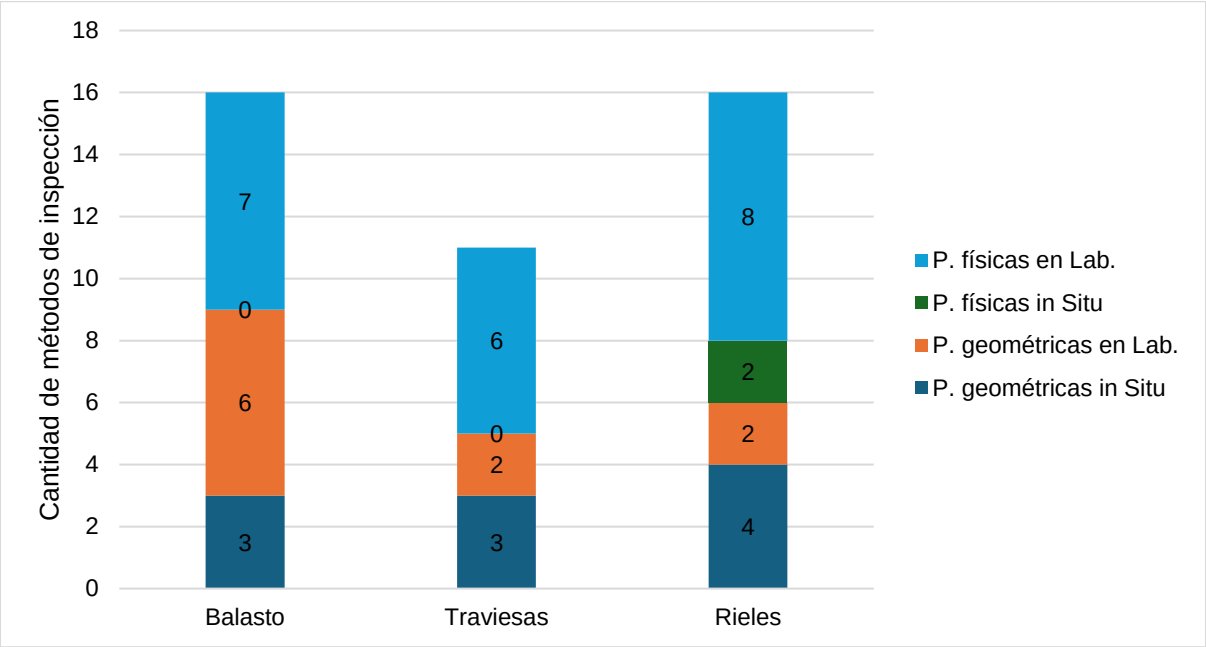
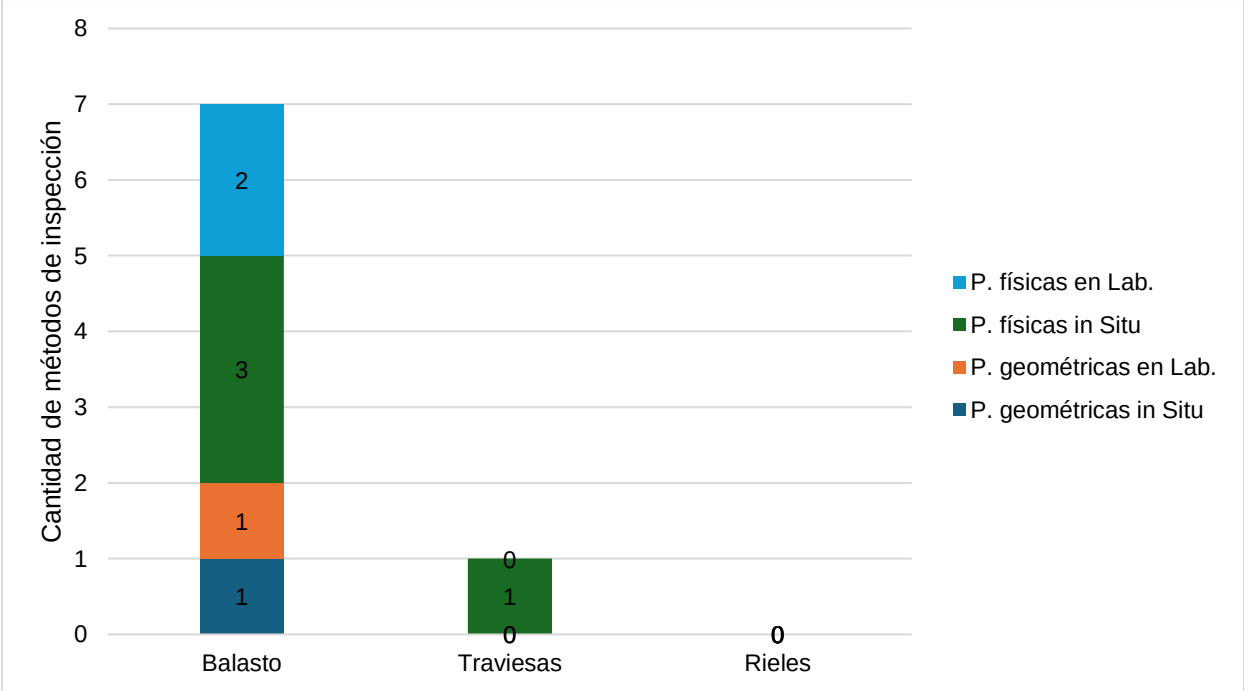


Figura 26. *Métodos de inspección no normados que evalúan propiedades de los elementos de la superestructura férrea*



CUADRO 5. PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS DE LA SUPERESTRUCTURA FÉRREA QUE SE EVALÚAN MEDIANTE PROCESOS NO NORMALIZADOS

Balasto	Traviesas	Rieles
Propiedades geométricas in Situ:		
Macro conformación (GPR)*		
Propiedades geométricas en laboratorio:		
Finos, sistema ferroviario de Sudáfrica		
Propiedades físicas in Situ:		
Rest. Empuje Lateral Traviesa individual	Deterioro (Carbonatación)	
Módulo de balasto (1 Traviesa)		
Contaminación (GPR)*		
Propiedades físicas en laboratorio:		
Rest. Empuje Lateral Traviesa individual		
Módulo de balasto (1 Traviesa)		

Fuente: Adaptado de: (Lichtberger, 2010; Oden et al., 2018; Stuart et al., 2022, 2023; Wilk & Li, 2023)

*Respecto del ensayo de GPR, se aclara que este está altamente normado para las mediciones macro de la geometría del balasto, como lo puede ser el perfil y profundidad de capa, para determinaciones más específicas como el grado de contaminación aún está en una fase relativamente experimental, Oden et al. (2018) son algunos de los investigadores que están trabajando en este desarrollo.

3.2 Equipos y maquinaria utilizada en procesos de inspección y/o evaluación para determinar la calidad de los elementos estudiados

En esta sección es importante hacer una aclaración, no existe ningún tipo de asociación con ninguno de los fabricantes y/o proveedores de equipo, maquinaria y/o soluciones de software. Cualquier valoración respecto a estos es propia del autor y es basada en la información a la que fue posible tener acceso fuese esta facilitada por los fabricantes, operadores férreos u otras fuentes.

De la mano con la sección 3.1 y en apego a los objetivos, de seguido se exponen los equipos que utilizan los procedimientos enmarcados en el CUADRO 4 y CUADRO 5, estos equipos son fabricados por expertos en el sector aplicando los diversos medios posibles, pudiendo ser por mediciones directas o indirectas, una mayoría de estos proveedores ofrecen un servicio completo en el que no solamente se realizan las

mediciones sino que también se aporta el análisis e interpretación de los datos recopilados, convirtiéndose de esta manera en sí mismos los equipos y maquinaria el principal medio utilizado en la actualidad para evaluar la calidad de los elementos de la superestructura férrea. Por lo tanto, en esta sección se exponen principalmente equipos y maquinarias y no los procedimientos en sí mismos.

Los fabricantes de equipo estudiados se presentan en el CUADRO 6, la selección de estos se basó en registros históricos de uso de sus equipos o servicios en la industria ferroviaria alemana, debe aclararse respecto el fabricante suizo MATISA que de este no se encontró registro directo de aprobación por parte de DB, sin embargo, la empresa constructora “schwerbau” (Schweerbau GmbH & Co. KG, s/f) tiene sus equipos certificados y entre estos se encuentran los de MATISA.

El proveedor de equipo Plasser & Theurer (P&T) cuenta más de 70 años en el mercado, mientras que MATISA lo supera por al menos 10 años más, Trimble es un referente para equipos de cartografía y ha incursionado en las últimas décadas en el sector ferroviario con equipos específico, Vossloh y Amberg Technologies son los más jóvenes, con alrededor de 30 años en el mercado, sin embargo ambos proveen avanzadas soluciones, todos los equipos de los proveedores satisfacen la respectiva norma europea que los regula, aun así esto no limita que puedan ser utilizados en procesos experimentales, por el contrario refuerza su valía para estos.

CUADRO 6. FABRICANTES DE EQUIPO / MAQUINARIA DE INSPECCIÓN FÉRREA

Fabricante	Sede central	Aprobado por DB
Amberg Technologies	Suiza	Sí
MATISA	Suiza	Sí*
Plasser & Theurer	Austria	Sí
Trimble Railway	Alemania	Sí
Vossloh	Alemania	Sí

Fuente: Información de aprobación por DB tomada de Benz & Siggel (2024).

Los equipos fueron organizados bajo tres categorías principales ligadas a
(1) la función principal, entiéndase en este caso si el equipo es de evaluación o evaluación / rehabilitación, respectivamente evaluación refiere a que el equipo cuenta con las capacidades de registrar datos del estado y contrastarlos con las especificaciones correspondientes, mientras que la segunda categoría refiere a equipos que por su configuración cuentan además con las capacidades para realizar las correcciones necesarias para la conformidad del elemento;
(2) el modo de trabajo, este refiere a las capacidades operativas del equipo sobre la vía, se tienen equipos de medición continua y equipos de medición individual y

(3) el modo de operación, acá se tiene la operación manual y mecánica, esta categoría conecta con la portabilidad del equipo o máquina.

Se estableció también otra categoría en función de la cantidad de elementos y propiedades que les son evaluados, en este sentido se tienen las categorías expuestas en el CUADRO 7;

CUADRO 7. CATEGORIAS DE EQUIPO SEGÚN ELEMENTOS EVALUADOS

Cantidad de elementos evaluados	Categoría asociada
4 o más	A
3	B
2	C
1	D

Se aclara que los objetos de estudio son 3, aun así, los equipos muchas veces realizan una determinación geométrica del alineamiento de la vías, al ser esta una medida indirecta del estado de los elementos estudiados se considera como un “cuarto elemento”. La categorización de los equipos se presenta en el CUADRO 8.

En el CUADRO 8 se resaltan los equipos de operación manual, así como las máquinas GMTZ y la EM120, estas dos últimas ya que son respectivamente desarrollada específicamente para DB Netz AG y adaptada por DB Netz AG, exceptuando la GMZ (las especificaciones de diseño están protegidas y son exclusivas de DB Netz AG) para cada uno de estos equipos se elaboró una ficha que detalla las capacidades de medición en los elementos correspondientes, para estos y los restantes equipos en el Apéndice B se presenta una matriz que condensa sus capacidades, esta información también se pone a disposición en el fichero que acompaña este informe, mediante un archivo de formato Excel.

Para un país como Costa Rica los equipos manuales vendrían a ser indispensables ya que son los medios más económicos disponibles en el mercado, sin embargo, cada uno de los equipos de mayor dimensión expuestos son considerados muchas veces en los presupuestos globales cuándo se construyen nuevas rutas como parte de la inversión necesaria para tener en óptimas condiciones de operación las vías férreas y los equipos que por ellas transitan.

En el Apéndice A, se incluye información complementaria a la presentada en el CUADRO 8 respecto de las capacidades de todos los equipos estudiados, indicando cuáles son las actividades que estos pueden realizar sobre los elementos de estudio o bien, la línea/vía.

CUADRO 8. CATEGORIZACIÓN DE EQUIPOS ESTUDIADOS

Denominación	Cat. 0. Fabricante	Cat. 1 Función principal	Cat. 2 Modo de trabajo	Cat. 3 Modo de operación	Cat 4. Elementos Evaluados
GMTZ	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	A
EM100VT	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	A
EM120VT	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	A
EM160	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	B
EM100U	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	B
EM80H	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	B
EM30	Plasser & Theurer	Evaluación	Continuo	Mecánica	B
HSG-2	Vossloh	Evaluación / Rehabilitación	Continuo	Mecánica	D
MX90	Trimble	Evaluación	Continuo	Mecánica	A
SRE	Vossloh	Evaluación	Individual	Manual	D
HSG-city	Vossloh	Evaluación / Rehabilitación	Continuo	Mecánica	D
GEDO CE 2.0	Trimble	Evaluación	Individual	Manual	B
M Series	MATISA	Evaluación	Continuo	Mecánica	A
GRP System FX	Amberg Technologies	Evaluación	Individual	Manual	D

Para cuatro de los equipos resaltados en el CUADRO 8 se confeccionó una ficha que detalla sus capacidades de medición, estas fichas se incluyen en el citado archivo de Excel (gestor), en las figuras 23-26, se presentan capturas de pantalla de las mencionadas fichas.

Figura 27. *Ficha del equipo P&T EM120VT*

Equipo: EM120VT
Fabricante: Plasser & Theurer
Función: Evaluación **Categoría asignada:** A

Descripción general:
La EM120VT de Plasser & Theurer está diseñada para la adquisición completa de datos en obras de gran envergadura, su gran diferencia con respecto a otros vehículos de medición es que los datos acumulados que se recopilan ya brindan toda la información sobre dónde hay que aplicar qué tipo de medidas en la vía.

Sistemas incorporados	Descripción	Registra información				
		Balasto	*Traviesas*	*Rieles*	*Línea / Vía*	*Otros*
ReferenceTrackGeometry	El sistema se basa en tecnología inercial, determina la posición de la vía entre puntos fijos. Su inclusión permite verificar la posición espacial absoluta de la vía. Utiliza cámaras estereoscópicas para el proceso de medición. Los resultados permiten establecer las posibles deformaciones respecto del alineamiento de diseño de las vías, esto indirectamente puede reflejar daños en el balasto y/o en la subestructura.	☐	☐	☐	☑	☐
Inspección por vídeo	El sistema puede trabajar a velocidades de medición de hasta 120 km/h, el sistema identifica automáticamente componentes mal colocados o inexistentes, tales como elementos de sujeción y bulones, uniones de rieles dañadas (bridas) y más, ya que el sistema se puede adaptas para los elementos específicos de acuerdo con la infraestructura del operador.	☑	☑	☑	☐	☑
InertialTrackGeometry	El sistema de auscultación sin contacto de la geometría de vía con navegación GPS integrada y medición óptica del ancho de vía sirve para registrar la geometría de la vía en forma de curvas espaciales relativas en 3D, utiliza los sensores inerciales para completar sus mediciones.	☐	☐	☑	☑	☐
Tecnología de radar (Geometría de superestructura)	Mide, además de la posición del hilo de contacto, también su altura y su descentramiento y posición lateral. El sistema se puede utilizar perfectamente en condiciones meteorológicas adversas o con sol directo, al contrario que los sistemas basados en vídeo.	☐	☐	☐	☑	☐
Perfil de los rieles	La EM120VT dispone de sensores láser para la medición del perfil de los rieles. A una velocidad máxima de 120 km/h, estos sensores miden el perfil real del riel que después es comparado con el perfil teórico por el ordenador. Las tolerancias que permiten establecer las desviaciones se ajustan de acuerdo con la infraestructura en evaluación.	☐	☐	☑	☐	☐
Georradar	Utiliza 2 sensores GPR, proyectan ondas electromagnéticas que penetran hasta una profundidad de 2,5 m, donde son reflejadas en función de la estructura del terreno. Los resultados se visualizan en un radargrama y aportan datos sobre "zonas lodosas", grado de contaminación y estratigrafía del terreno.	☑	☐	☐	☐	☑

Figura 28. *Ficha del equipo Amberg Technologies GRP System FX*

Equipo: GRP System FX
Fabricante: Amberg Technologies
Función: Evaluación **Categoría asignada:** D

Descripción general:
La plataforma GRP System FX es un equipo modular al cual se le pueden adaptar un amplia diversa gama de sensores y equipos de otros proveedores o propios, Amberg Technologies ofrece mediante sus programas computacionales la integración y procesamiento de los datos recopilados para el análisis y toma de desiciones por parte del operador férreo.

Sistemas	Descripción	Registra información				
		Balasto	*Traviesas*	*Rieles*	*Línea / Vía*	*Otros*
Sensor de gálibo Odómetro y Sensor de pendiente	Estos sensores están incoporados en la plataforma y permiten conocer con alta precisión las dimensiones del ancho de vía y peralte, cuando se detectan desviaciones que superan los límites permitidos, el sistema gracias al odómetro (y la antena GNSS si se tiene) registra la posición exacta de este defecto.	☐	☐	☑	☑	☐
IMS 1000 IMS 3000 IMS 5000	Estos son sensores inerciales, la denominación de estos está ligada con la alcance de sus mediciones. Estos dependiendo de su configuración pueden generar una visualización 3D del alineamiento de las vías.	☐	☐	☑	☑	☐
GNSS	El cliente puede decidir si incorpora la antena GNSS que se usa conectada a una estación central de mayor potencia, su ventaja es la sincronización de los datos con la ubicación geográfica en las vías y no a medidas relativas.	☐	☐	☐	☑	☐
GRP 1000 GRP 5000	El sensor GRP 1000 es un prisma para mediciones desde estaciones totales fuera de las vías, este forma parte del conjunto de sensores del GRP 5000 que incorpora también un perfilómetro láser para generar a través del método geodésico un modelo 3D de las vías.	☐	☐	☑	☑	☑
VMS 1000 VMS 3000	Estos son sensores de largo alcance, consisten en la adaptación de una estación total a la plataforma en conjunto con los sistemas incorporados, los resultados principales son de alineamiento.	☐	☐	☐	☑	☐
Investigación	Se desconocen los alcances en el sector de la investigación, sin embargo, existe potencial por la versatilidad para adaptar sensores de pequeño y mediano tamaño.	☑	☑	☑	☑	☑

Figura 29. *Ficha del equipo Trimble GEDO CE 2.0*

Equipo: GEDO CE 2.0
Fabricante: Trimble
Fúnción: Evaluación **Categoría asignada:** B

Descripción general:
La plataforma ofrece mediciones principalmente geométricas como lo son el ancho de vía, inclinación, defectos superficiales en rieles, mapeo 3D del entorno y la vía, el aspecto más relevante puede ser la determinación del alineamiento de la vía tanto a nivel vertical como horizontal, ya que este es un indicar del estado de la superestructura en general, pudiendo esto indicar defectos a nivel de alguno de los elementos que la componen. A la plataforma se le pueden acoplar (extra de los incorporados) la totalidad de los 3 sistemas "extra" en simultáneo para obtener una mayor cantidad de datos en un sólo levantamiento.
Su desarrollo y operación cumplen con la normativa europea EN 13977.

Sistemas	Descripción	Registra información				
		Balasto	*Traviesas*	*Rieles*	*Línea / Vía*	*Otros*
GEDO CE 2.0	Con esta denominación entiéndanse los sensores que ya tiene incluidos la plataforma, estos son un odómetro, el sensor de gálibo y de inclinación. Estos sensores alcanzan una exactitud de ± 0,3 mm. Para el uso de esta plataforma y sus sensores incorporados no es necesario el acoplamiento de los otros sistemas, estos últimos dependen del contar con la plataforma.	☐	☐	☑	☑	☐
GEDO GX50	Estos son equipos láser, que en combinación con la tecnología de sensores inerciales puede llegar a generar modelos geométricos de las vías y alrededores con una alta precisión, entiéndase, inclusive menor a 7 mm para elevación y de 10 a 20 mm en el sentido longitudinal de las vías. La precisión del equipo aumenta cuando se integra una estación total en terreno, así también es posible generar referencias absolutas.	☑	☑	☑	☑	☐
GEDO IMU	Estos son sensores inerciales de alta precisión, que llegan a alcanzar una exactitud de ± 0,1 mm en las zonas cercanas al sensor, a 20 m este valor es de 0,3 mm. Sus resultados son un modelo de las curvas de alineamiento de las vías de alta precisión.	☐	☐	☑	☑	☐
GEDO Profiler	Este es un equipo láser para la medición de distancia de objetos cercanos a las vías.	☐	☐	☐	☑	☐
GEDO Track Bar	Esta es una barra que integra sensores electrónicos para la medición del ancho de vía (gálibo), es una alternativa para la plataforma cuando sólo se realizarán mediciones en puntos determinados. Tiene una exactitud de ±0,3 mm.	☐	☐	☐	☑	☐
Investigación	Se desconocen los alcances en el sector de la investigación, sin embargo, existe potencial por la versatilidad para adaptar sensores de pequeño y mediano tamaño.	☑	☑	☑	☑	☑

Figura 30. *Ficha del equipo Vossloh SoniQ Rail Explorer*

Equipo: SRE
Fabricante: Vossloh
Fúnción: Evaluación **Categoría asignada:** D

Descripción general:
El SoniQ Rail Explorer (SRE) permite identificar, localizar y predecir con precisión las irregularidades relacionadas con el funcionamiento en el interior del carril.
Además de los métodos y dispositivos de medición para documentar los perfiles longitudinales y transversales del carril, las inspecciones ultrasónicas sirven para localizar irregularidades relacionadas con el funcionamiento en el interior del carril.

Sistemas	Descripción	Registra información				
		Balasto	*Traviesa*	*Rieles*	*Línea / Vía*	*Otros*
Inspección por ultrasonido	El SRE detecta defectos volumétricos tanto en los bordes como en la zona central de la cabeza, esto según la norma EN 16729-1. La unidad de rodillo ultrasónico dispone de nueve sondas de prueba que analizan el carril desde varios ángulos diferentes y permiten desarrollar mediciones más precisas. Si el inspector lo desea puede incorporar una sonda manual y utilizar el software integrado para la visualización de los datos. 6 sondas inclinadas a 70 °, 4 MHz; para las mediciones de los bordes y zona central de la cabeza. 2 sondas inclinadas a 40 °, 2 MHz; para datos complementarios de la cabeza y el alma. 1 sonda sin inclinación, 2 MHz; para una medición de la sección transversal completa. Los grados de inclinación son referidos desde el eje normal hacia el sentido longitudinal del riel.	☑	☐	☐	☐	☑
Inspección por video	Al SRE se le puede adicionalmente incorporar una cámara 2D para capturar y visualizar en tiempo real la superficie que está siendo analizada por las sondas ultrasónicas.	☑	☐	☐	☐	☐
Integración virtual	El SRE puede sincronizarse con las HoloLens de Microsoft para que el operador en campo pueda visualizar en la longitud del riel los defectos que han sido detectados, así como su info. asociada.	☑	☐	☐	☐	☐
Investigación	El equipo brinda una plataforma para el análisis y detección de diferentes defectos que se pueden presentar en los rieles, los investigadores pueden caracterizar de forma precisa algunas tipologías de los defectos menos estudiados en los rieles como pueden ser las micro fisuras por corrosión interna.	☑	☐	☐	☐	☐

Notas adicionales:
Vossloh ofrece al cliente la opción de adquirir el SER y recibir la capacitación para su uso, así como también ofrece el servicio de inspección.
El cliente puede utilizar los servicios de Vossloh para analizar los datos y obtener recomendaciones de sus expertos, o bien el operador férreo puede integrar los datos en su propio sistema de gestión.
Los datos se pueden transferir vía redes inalámbricas, red celular, o bien mediante dispositivos de almacenamiento insertados.
El dispositivo tiene un peso menor a 20 kg (excluye el depósito para el agua de lubricación, 4 litros) y está diseñado para operar a una velocidad máxima de 5 km/h.
La batería es removible y cuenta con una capacidad de trabajo de hasta 8 horas.

3.3 Matriz de evaluación (Gestor)

Para los elementos estudiados se generó una matriz que condensa la información referente a sus propiedades, las normas y/o procedimientos que les rigen, así como consideraciones importantes que debe tener en cuenta el operador ferroviario al momento de implementar la matriz.

Dentro de la matriz se refiere y resaltan los valores o categorías que la DB requiere para los elementos estudiados, sin embargo, esto es solamente una recomendación, ya que el operador ferroviario durante las gestiones de mantenimiento deberá siempre priorizar el cumplimiento de las capacidades requeridas por el diseño original (o actualizado). La matriz le permite al operador ajustar los valores de referencia, así como los límites operativos y desviaciones toleradas respecto a estas, por lo que será responsabilidad única del operador verificar que los valores usados como referencia al evaluar su infraestructura sean los correctos para sus condiciones operativas.

La matriz fue elaborada utilizando la herramienta computacional Microsoft Excel, debido a (1) su integración y conocimiento de uso en el país e institución donde se plantea la implementación de la matriz, (2) su facilidad para integrar y exportar datos desde y hacia diversas fuentes y (3) el alcance actual del proyecto, este último no excede las capacidades de la herramienta seleccionada, ya que el almacenamiento del software seleccionado soporta hasta 1.048.576 de entradas (Soporte Técnico Microsoft, s/f) y en esta etapa aun no es requerida la ejecución de algoritmos de análisis numérico de alta complejidad, los algoritmos y operaciones a este punto son básicas.

La matriz se puede acceder a través del archivo de tipo Excel adjunto “03.Gestor”, el usuario debe contar con las macros activadas y seguir las instrucciones del archivo de texto “01.LEEME” para de esta forma no tener inconvenientes en su experiencia de uso, esto se detalla a su vez más a profundidad en el archivo Word “02.Manual de procesos”, del cual también se expone más en la sección 3.4.

Cuando el usuario accede al Gestor, se le presentará una hoja llamada Portada (ver Figura 31) con los créditos y una rápida explicación del contenido del archivo, el usuario desde esta hoja accede a la matriz que se ubica en una hoja separada, una vez dentro de la matriz, el usuario deberá tener en su pantalla una visualización similar a la presentada en la Figura 32.

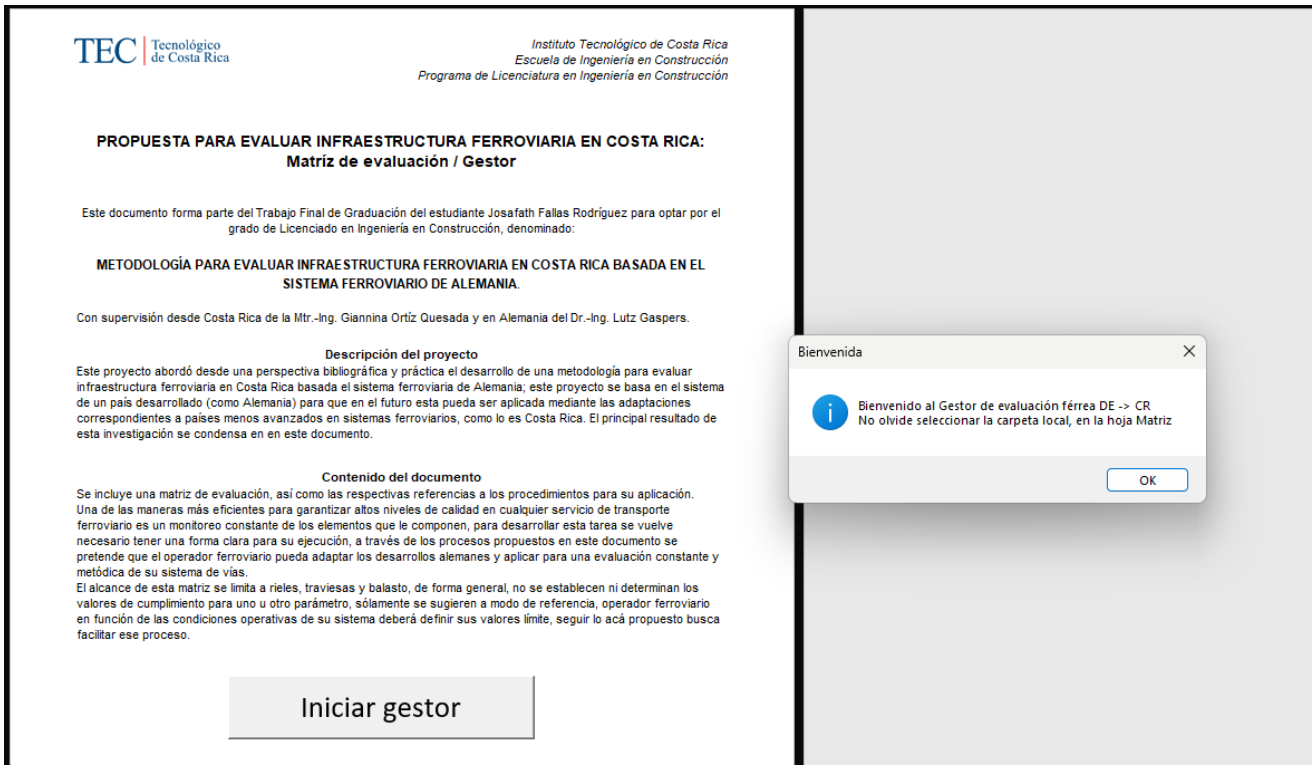
La información se condensa utilizando el formato de Tabla de Excel, mediante el cual el usuario puede filtrar según sus requerimientos la información que requiera, el primer filtro corresponde a los elementos incluidos, el usuario puede escoger visualizar lo respectivo únicamente a Balasto, a Traviesas o Rieles, también puede mantenerlos en simultáneo. Este funcionamiento se explica con ejemplo más adelante.

Cada elemento se encuentra categorizado según corresponde a sus propiedades, en general las categorías 0 y 1 aplican a todos los elementos, por tal razón se encuentran nombradas desde el encabezado, para las categorías 2 – 5, el nombre de las categorías es el indicado en las celdas de las respectivas columnas, siendo que en la columna “Variable” se expone directamente la propiedad evaluada o por evaluar, en esta

columna el usuario debe ser prioritariamente cauteloso, ya que para repetidas variables se incluyen enlaces interno o externos para poder visualizar correctamente los valores que puede tener esta propiedad.

Previo a exponer de forma general las variables y propiedades evaluadas en los diferentes elementos se aclara que el gestor no está preparado para ser usado como herramienta de evaluación comparativa, el gestor es una herramienta de referencia y guía que condensa los parámetros que deben ser evaluados por el operador, el uso esperado es que con esta herramienta el operador desarrolle su manual de mantenimiento en el que detalle cada proceso así como las herramientas que permitan comparar los datos de la inspección con los datos de referencia. De forma global, para todos los elementos se aplica que al observar la celda de variable resaltada con color verde se está indicado que ese es el valor o categoría utilizada por la DB.

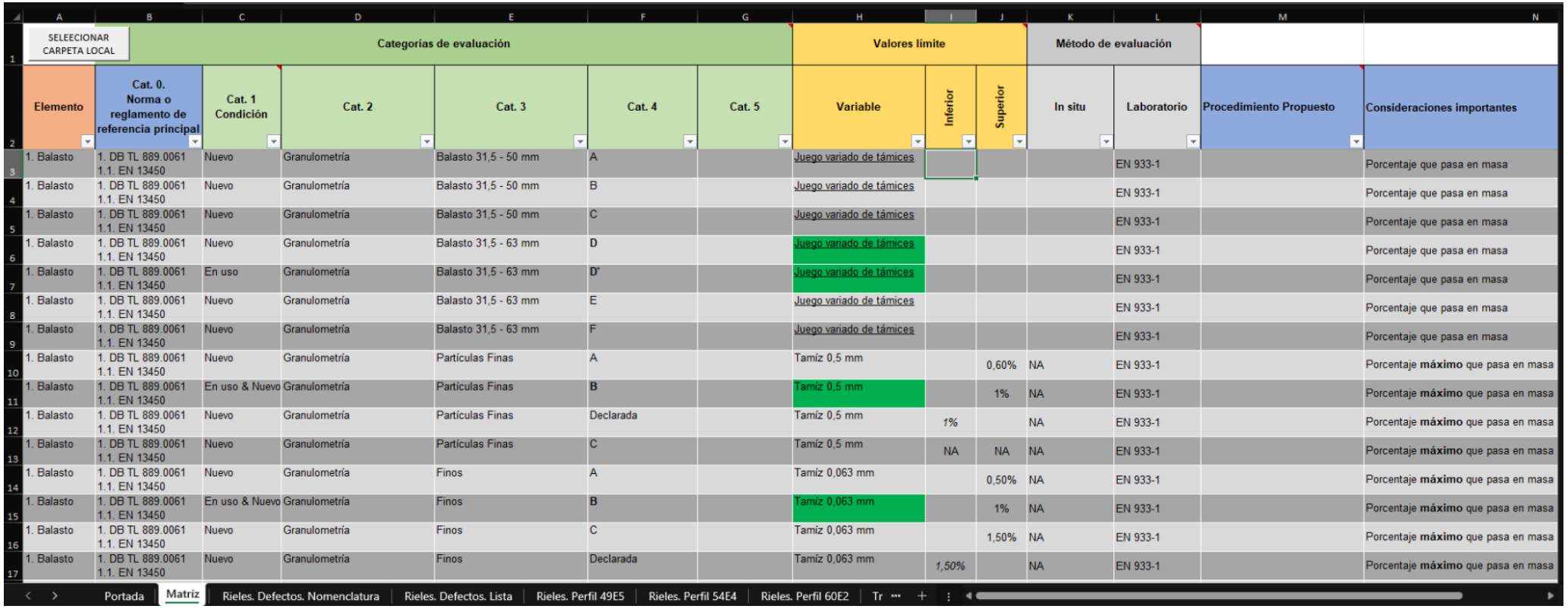
Figura 31. *Vista inicial del gestor*



Una vez el usuario haya iniciado el gestor y se encuentre en la vista de la Figura 32, podrá según su conveniencia acceder a los recursos almacenados para cada elemento, de seguido se considera como ejemplo ilustrativo el acceso a la información relativa al balasto, en este específico uno de los indicadores indirectos de contaminación, la resistencia al desplazamiento lateral/longitudinal. Se expone una secuencia de pasos, que son aplicables en una mayoría de las propiedades de los elementos estudiados:

1. Seleccione el elemento del que desea obtener información, mediante la opción de filtro escoja el correspondiente.

Figura 32. *Visualización completa de la matriz de evaluación (gestor)*

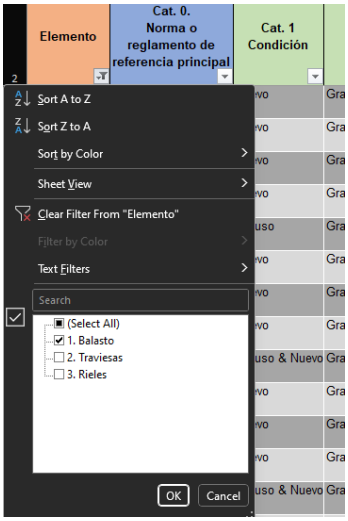


SELEECIONAR CARPETA LOCAL	Categorías de evaluación						Valores límite			Método de evaluación			
Elemento	Cat. 0. Norma o reglamento de referencia principal	Cat. 1 Condición	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Variable	Inferior	Superior	In situ	Laboratorio	Procedimiento Propuesto	Consideraciones importantes
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 50 mm	A		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 50 mm	B		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 50 mm	C		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	D		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	En uso	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	D'		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	E		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Balasto 31,5 - 63 mm	F		Juego variado de támices				EN 933-1		Porcentaje que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	A		Tamíz 0,5 mm		0,60%	NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	En uso & Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	B		Tamíz 0,5 mm		1%	NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	Declarada		Tamíz 0,5 mm	*1%*		NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Partículas Finas	C		Tamíz 0,5 mm	NA	NA	NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Finos	A		Tamíz 0,063 mm		0,50%	NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	En uso & Nuevo	Granulometría	Finos	B		Tamíz 0,063 mm		1%	NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Finos	C		Tamíz 0,063 mm		1,50%	NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa
1. Balasto	1. DB TL 889.0061 1.1. EN 13450	Nuevo	Granulometría	Finos	Declarada		Tamíz 0,063 mm	*1,50%*		NA	EN 933-1		Porcentaje **máximo** que pasa en masa

Portada | Matríz | Rieles. Defectos. Nomenclatura | Rieles. Defectos. Lista | Rieles. Perfil 49E5 | Rieles. Perfil 54E4 | Rieles. Perfil 60E2 | Tr

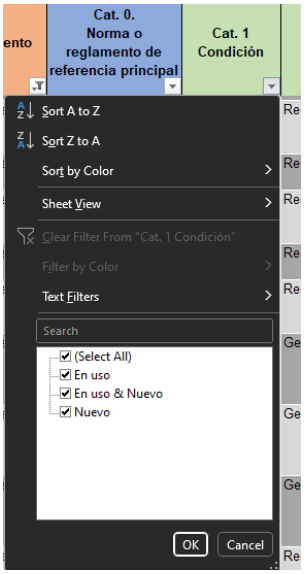
En la Figura 33 se observa como las casillas que no corresponden a Balasto se encuentran desmarcadas, siendo que de esta manera únicamente se presentan propiedades evaluables para el con la casilla seleccionada

Figura 33. *Uso de filtro por elemento de la superestructura*



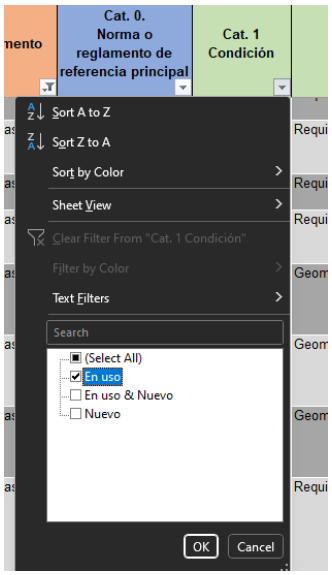
2. Según su nivel de conocimiento, podrá aplicar un filtro en la categoría 0, sin embargo, esta aplica únicamente cuando se desea diferenciar entre normas de referencia. Ver Figura 35.

Figura 34. *Filtro por Noma o reglamento aplicable al elemento de la superestructura*



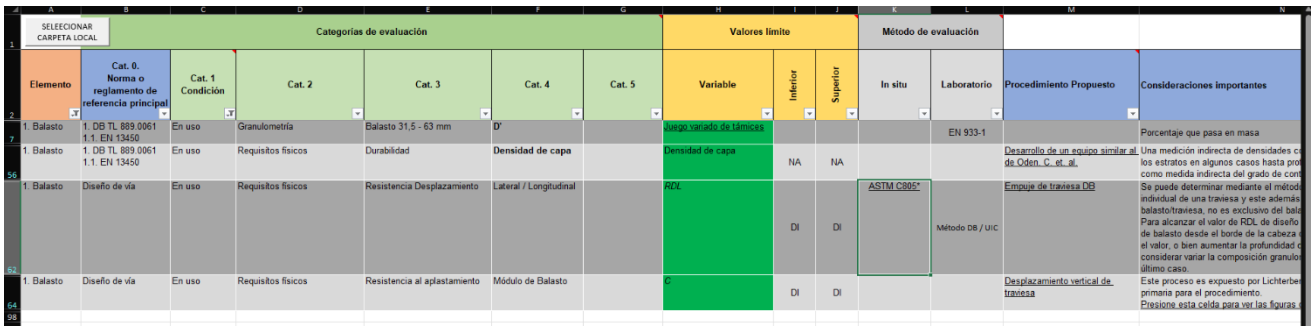
3. En la categoría 1 filtre según la condición que tiene o tendrá el elemento a evaluar. Ver Figura 35, para el ejemplo se utiliza la condición de “En uso” reduciendo la matriz la cantidad de información disponible a la presentada en la Figura 36.

Figura 35. *Filtro por Condición del elemento de la superestructura*



(a) (b)

Figura 36. *Vista filtrada de la matriz, una vez aplicados los filtros de los pasos 2 y 3.*

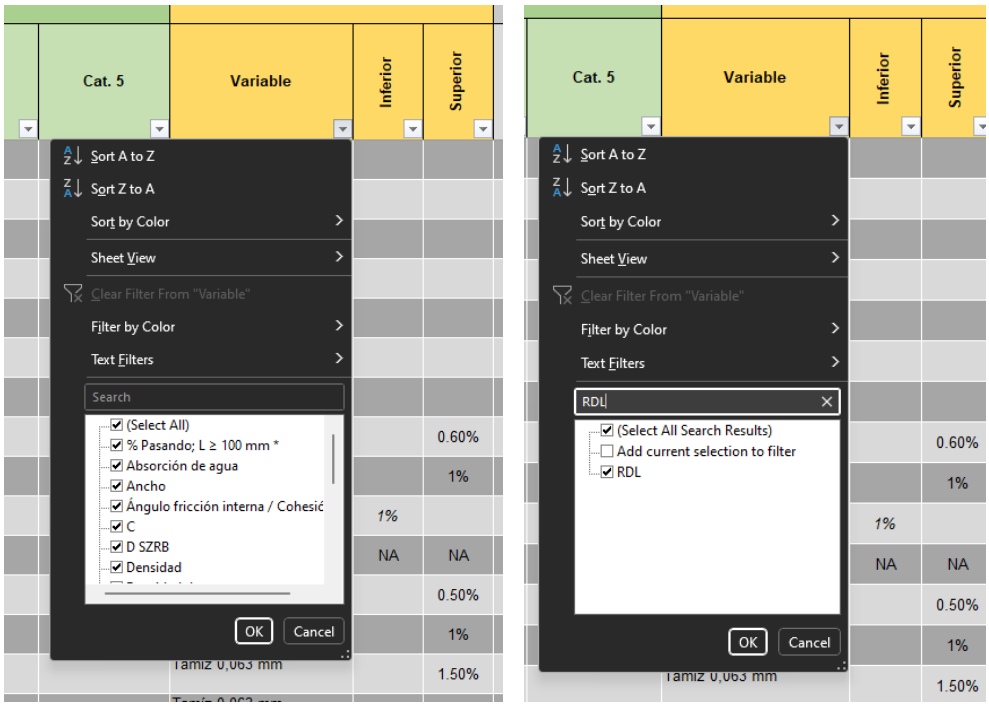


f

4. En la Figura 36 se observa como en la categoría 3 y 4 ya se logra identificar la conexión hacia la variable de RDL, en la columna “Procedimiento propuesto” al hacer clic en la celda se le abrirá un diagrama de flujo (en el visor de archivos PDF del sistema) que expone a detalle la aplicación del método que cuantifica la RDL, el usuario deberá prestar atención a la columna de consideraciones importantes.

   Alternativamente el usuario podría saltarse los pasos 2 y 3 (en función de su conocimiento) y filtrar directamente por variable y así obtener la información que busca con mayor rapidez. Ver Figura 37.

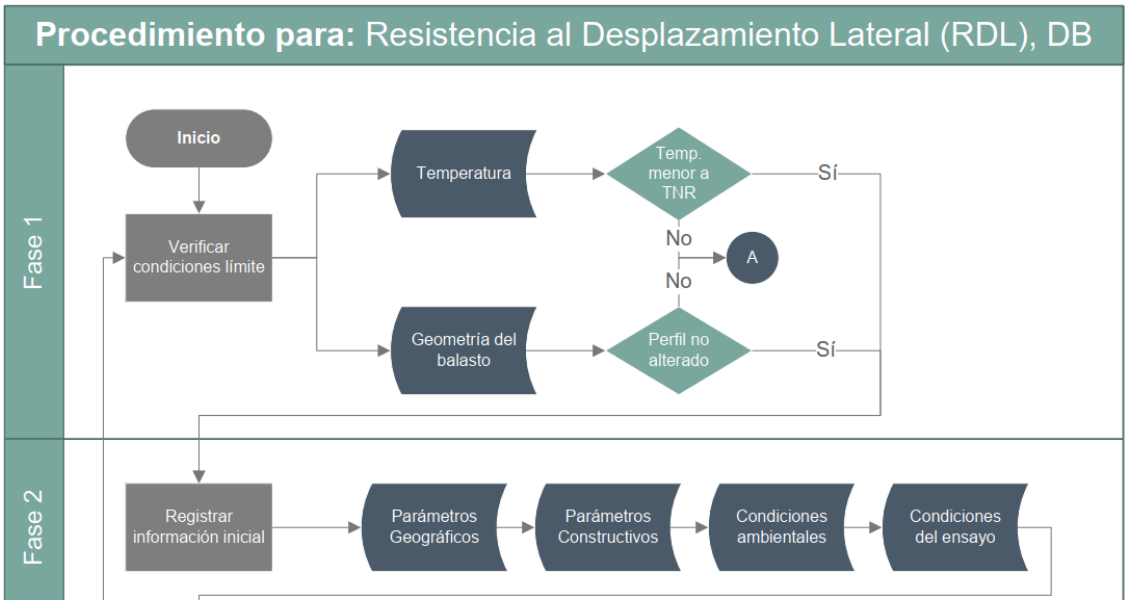
Figura 37.
(a) Vista de ventana para filtrar por variable.
(b) Uso de filtro mediante de búsqueda por término "RDL"



(a) (b)

5. Finalmente, se puede acceder al archivo adjunto en el procedimiento, este se muestra en la Figura 38.

Figura 38. *Recorte de la vista del esquema de procedimiento para la evaluación de la RDL.*



3.3.1 Balasto

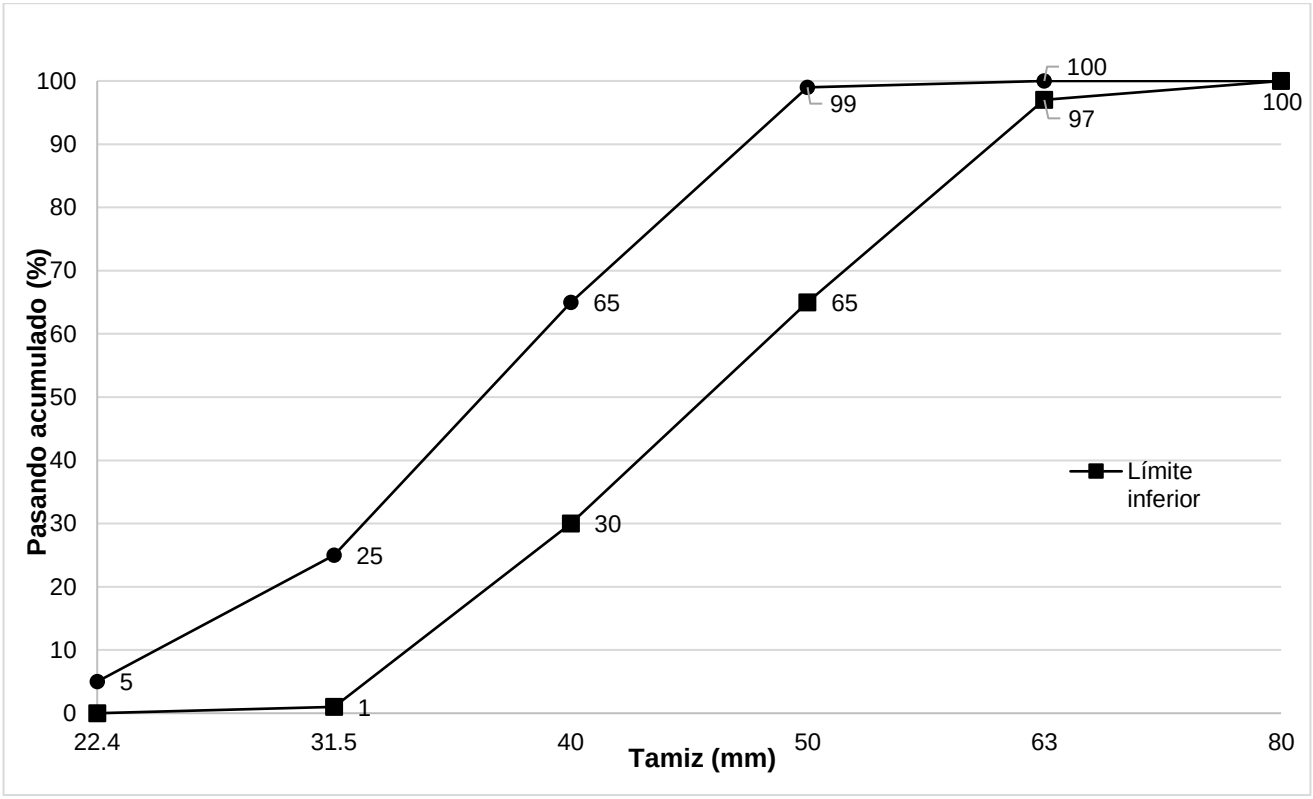
Para el balasto se contó con información de primera mano, respecto de los requisitos alemanes, ya que fue posible obtener acceso al TL 889.0061, este en conjunto con la norma EN 13450 corresponden a la base para las propiedades mencionadas, sin embargo, también se incluyen otras propiedades que directamente estas normas no evalúan o no cuentan con un proceso para su evaluación.

Para los procesos normados directamente se refiere al procedimiento que la norma o reglamento refiere, para los que no, se refiere a los investigadores que los están desarrollando o bien, tal el caso de la medición del módulo de balasto el autor sugiere un equipo y diseño esquemático que podría ser mejorado y utilizado para este proceso. Para cada uno de los procesos no normados se desarrollan los respectivos diagramas de flujo que facilitan la comprensión del procedimiento.

Lamentablemente, para el balasto el uso de Métodos de ensayo no destructivos actualmente sólo aporta datos de tipo “macro”, por lo que muchas de las propiedades más representativas del balasto como lo son su granulometría, forma, dureza y otros no es posible evaluarlas en campo sin afectar el tránsito por las vías. Se enfatiza que muchas de las técnicas de inspección actuales para el balasto son mediciones indirectas, a través de la geometría de la vía.

Se destaca el hecho de evaluar la granulometría para balastos reutilizados, previo a su colocación, o en el caso de equipos de bateo y limpieza de balasto en simultáneo, la DB ha establecido desviaciones respecto del estándar del balasto Tipo D en condición nueva, cuya granulometría se presenta en la Figura 13, la variación se da en el tamiz de 22,4 mm, como se aprecia en la Figura 39 el valor aumenta de 3% a 5%, lo cual corresponde con lo expuesto por Lichtberger (2010) respecto a una cantidad óptima de finos.

Figura 39. *Balasto 31,5 / 63 mm Categoría D', reutilizado*



Fuente: Con datos de DB Netz AG (2023).

La detección de variaciones porcentuales en el contenido de finos en el balasto es una tarea que no puede ser realizada sin las herramientas adecuadas, este proceso es completamente mecánico, se requiere de contar con los tamices adecuados y una muestra lo suficientemente representativa de las vías, por lo que DB y este autor recomiendan el muestreo y tamizaje del balasto de previo a que este se reinstalado, ya que una vez completado este proceso será operativamente no factible realizar su medición.

Equipos como la P&T EM120VT de forma indirecta permiten cuantificar el estado del balasto con sus medidas geométricas y aportan información adicional también a nivel "macro" de la estratigrafía del balasto, permitiendo detectar cuando existen cúmulos de lodo o arcillas que hayan ascendido en la cama de balasto, esta tarea también puede ser realiza con los equipos Trimble GEDO CE 2.0 y el MX90, este último cuando se adapta a la locomotora adecuada.

Para procesos manuales, tal y como se recomienda en el gestor, se pueden usar Georadares tales como el propuesto por Oden et al. (2018), este se presenta en la Figura 40, sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos equipos no son desarrollados en cadena, cada usuario u operador deberá según las especificaciones construir sus propios equipos, con el riesgo que esto a su vez representa en términos de precisión e inexactitudes en las mediciones.

Figura 40. *Georadar de operación manual RABIT, en desarrollo investigativo*

Tomado de: Oden et al. (2018).

El equipo RABIT de completar su desarrollo permitirá al usuario ir más allá de la medición estratigráfica del balasto y acceder al grado de contaminación de partículas finas inclusive, hasta el próximo avance se deben utilizar los equipos ya expuestos, o en casos extremos únicamente la inspección visual por un técnico especializado, misma que se aclara es requerida para el uso de cualquiera de los equipos que evalúan propiedades del balasto.

3.3.2 Traviesas

Los procesos y propiedades evaluados para las traviesas son expuestos en función del acceso a normas europeas, el TL 889.0146 y la literatura externa expuesta en el Marco Teórico, sin embargo, debe aclararse que particularmente respecto de los valores geométricos estos provienen del diseño o diseños que se establezcan para la región.

En el gestor únicamente se exponen las geometrías que se utilizan en Alemania, sin embargo, estas dimensiones pueden variar y ser alteradas en la etapa de diseño y construcción de una vía, por lo que el operador deberá incluir dentro del gestor las dimensiones específicas de sus vías, una vez completado esto contará con los insumos para evaluar los defectos que las traviesas en uso puedan presentar.

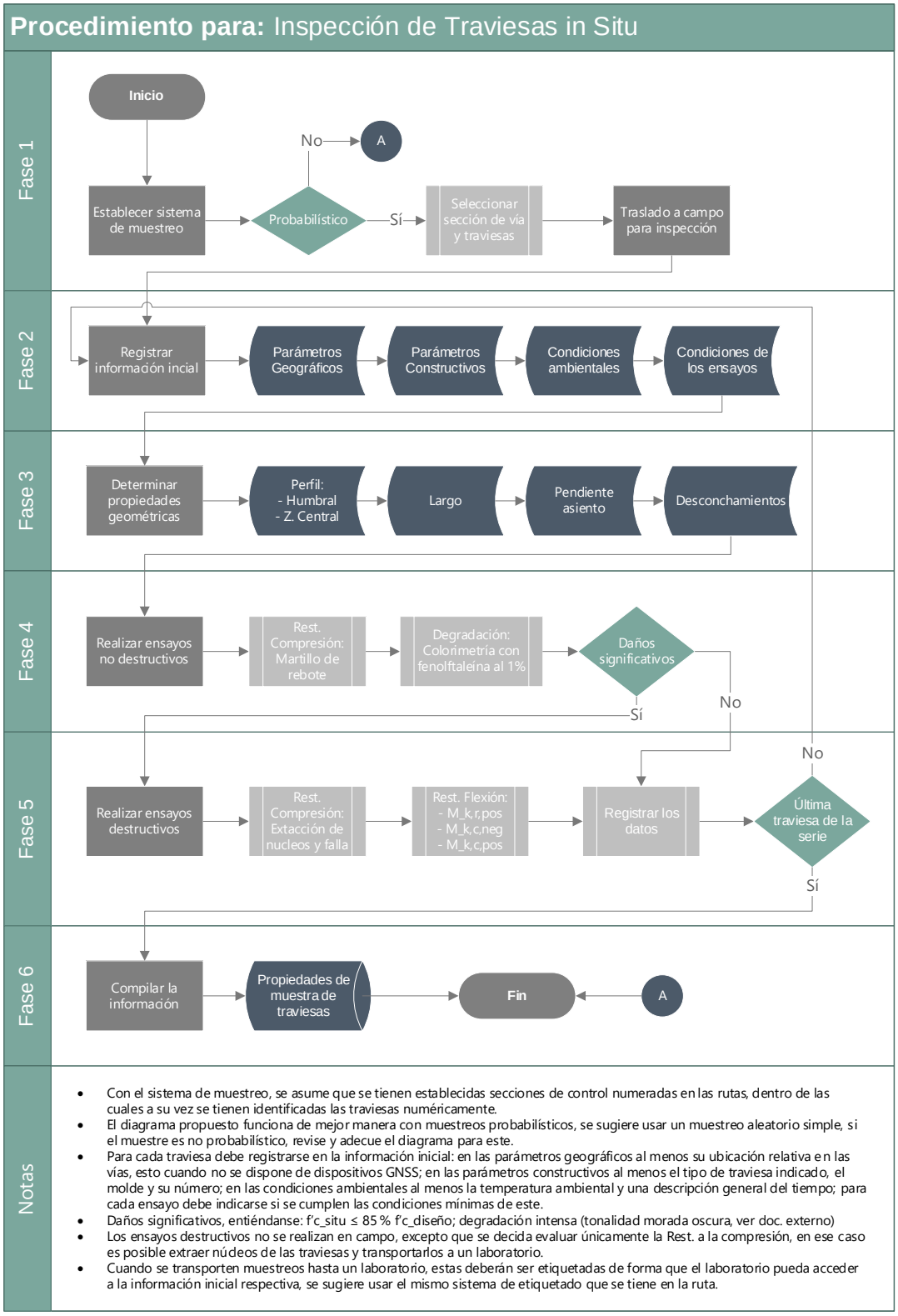
Indiferentemente de la geometría de las traviesas, los criterios expuestos por DB para la reutilización de traviesas pueden ser aplicados ya que estos están ligados principalmente a estado de las superficies de estas, estos valores son límites que no deberán sobrepasarse si se desea mantener la correcta funcionalidad de las traviesas en uso, el dilema que esto sugiere es la medición de algunos parámetros que requieren de desmontar la traviesa de las vías, para esto el autor sugiere realizar un muestreo metódico que según lo observado en campo se determine la necesidad de extracción de muestras para evaluación en laboratorio, en estos casos al extraer traviesas, estas son sustituidas con traviesas de igual o mejores capacidades, pueden ser nuevas o reutilizadas.

En el caso de las traviesas, el procedimiento general que se menciona de previo se expone en la Figura 41, este diagrama se puede acceder en su tamaño y calidad original a través del gestor, o bien, en los archivos adjuntos; el esquema para las traviesas, contrario al caso del balasto no profundiza en los detalles específicos de cada ensayo, sino que de forma general hace un abordaje que le permite al usuario en la Fase 4 decidir si es necesario trasladar muestras a laboratorio para una inspección más detallada de las muestras. Para las traviesas cada uno de los ensayos mencionados, al menos a nivel de laboratorio, cuenta con un procedimiento y técnicas normadas de aplicación, por lo que deberán seguirse dichos procedimientos, la referencia a estos también es aportada por el gestor.

Los ensayos no destructivos determinantes para decidir si una muestra de traviesas es traslada a laboratorio son la medición de la resistencia a la compresión y medición de degradación con fenolftaleína, sin embargo, cuando en las propiedades geométricas se detecta alguna deficiencia respecto a lo establecido por el TL 889.0146, esto también es clave para la decisión.

La matriz aporta como valor agregado las consideraciones que se deben tener con cada propiedad evaluada, para las traviesas, se resalta como valor de alerta principal, la presencia de señales de oxidación que puedan ser observadas directamente por un operario en la superficie (sin el uso de equipos de medición), cuando esto sucede inmediatamente se deberá inmediatamente marcar la muestra para ensayos destructivos y realizar la valoración del estado general de la ruta, si se trata de un caso aislado se recomienda simplemente sustituir la traviesa.

Figura 41. *Procedimiento propuesto para inspección de traviesas In Situ*



3.3.3 Rieles

En el caso de los rieles debido a su complejidad la matriz no es suficiente para condensar sus categorías de evaluación, esto aun cuando no se tuvo acceso a los reglamentos de la DB, se exponen los defectos que les aquejan mediante dos hojas añadidas dentro de la matriz.

Los parámetros más comúnmente evaluados son las propiedades geométricas, entiéndanse, sus perfiles, en la matriz se incluyen únicamente 3 perfiles, estos son los perfiles utilizados en DE, son los perfiles 49E5, 54E4 y 60E2, sus dimensiones son extraídas directamente de la norma EN 13674-1; respecto a las dimensiones de los perfiles se debe destacar que por ejemplo el perfil 54 tiene las variaciones E1, E2, … hasta el E5, esto también sucede con otros perfiles, esta variación está conectada únicamente con la forma de la cabeza, en el caso del ejemplo se han desarrollado 5 versiones para la cabeza, en cambio, para el perfil 60 sólo se llega hasta el E2. El gestor le facilita al usuario visualizar las dimensiones de los perfiles principales, sin embargo, también le refiere a la norma donde puede encontrar las dimensiones para los demás perfiles no detallados en la herramienta.

El gestor expone también el límite que se utiliza en Europa respecto a las variaciones de dureza que se pueden tener en los rieles por el uso en estos, reperfilados y otros procesos, esto está ligado a las unidades de dureza de Brinell HBW, se establece un límite de ± 50 HBW en la superficie de ruedo respecto a los puntos de medición circundantes (2017b).

Retomando lo mencionado con respecto a los defectos de los rieles, debe aclararse que en este proyecto no es (fue) posible desarrollar procesos para inspeccionar cada uno de los defectos que se han identificado a hoy para los rieles, empero, sí se definen equipos que aportan integraciones de software que ya cuentan con los algoritmos necesarios para evaluar el estado de los rieles, en este específico se hacen recomendación especial al Vossloh SRE, que detecta no sólo defectos superficiales, sino que también detecta defectos internos en los rieles, gracias a sus capacidades de ultrasonido, la combinación de este equipo con equipos mayores como las locomotoras de inspección de P&T pueden llegar a brindar una perspectiva clara del estado de las rutas que pueda tener el operador.

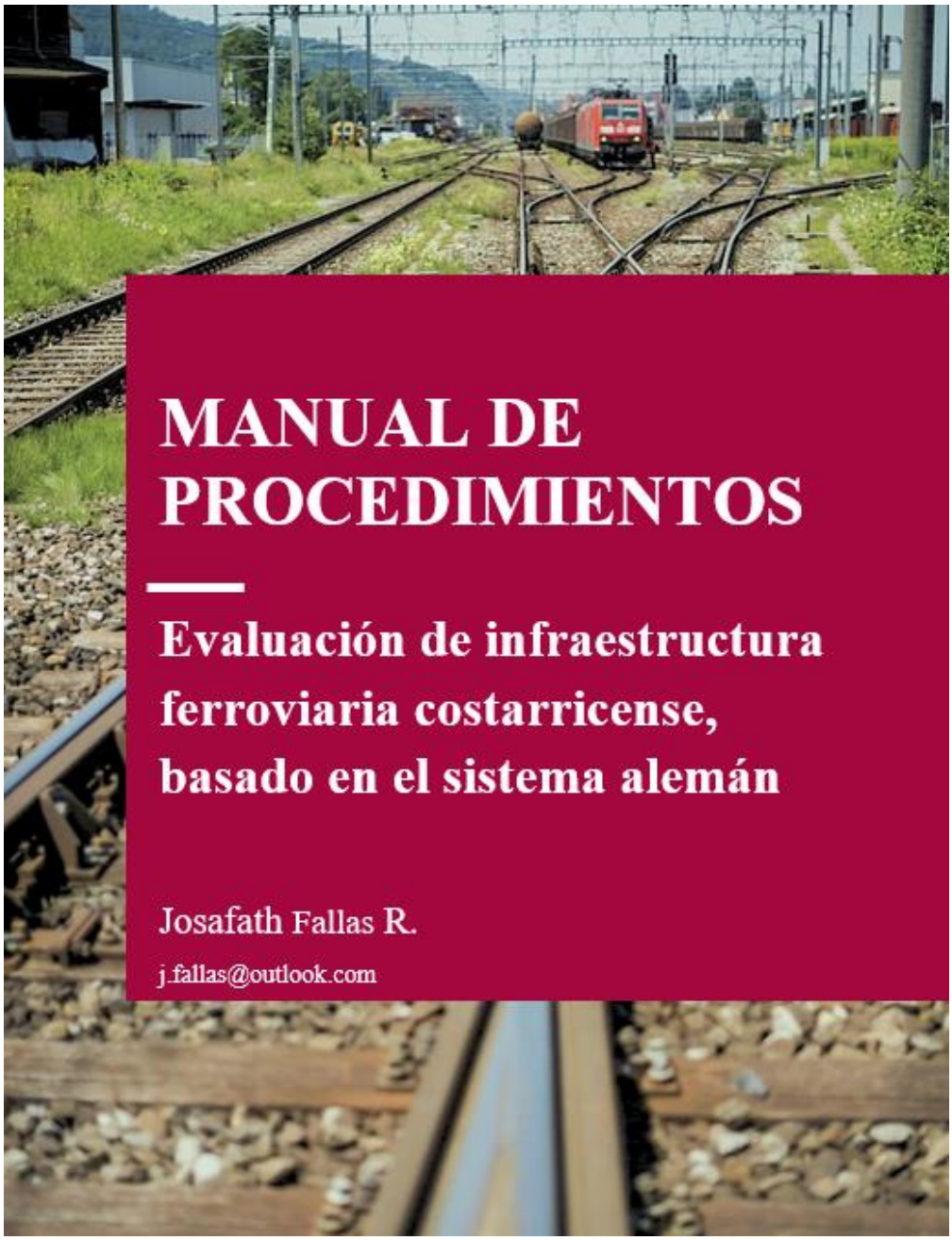
El gestor refiere y expone las categorías de los defectos, así como menciona también en una lista los defectos que detalla la norma, aún, así como también se menciona en el Marco Teórico, en el Anexo B se incluye a detalle toda esta información para lectura del usuario.

Cerrando con lo contenido en el gestor, no fue posible determinar un procedimiento de inspección específico para la detección de defectos en los rieles, ya que como se mencionó de previo no se tuvo acceso a los reglamentos de la DB al respecto, en el tanto que las normas europeas no detallan un proceso específico, lo dejan a criterio del operador.

3.4 Manual de procedimientos

Se elaboró un manual que expone en prosa cómo utilizar el gestor, recomendaciones para su implementación y desarrollo de procesos de evaluación de algunos de los elementos estudiados. En la Figura 42 se puede ver la portada de este.

Figura 42. *Portada del Manual de Procedimientos del proyecto desarrollado*



El manual cuenta con una extensión de 24 páginas, en las que se exponen algunos conceptos básicos de la industria férrea y terminología, se exponen los equipos y maquinarias usados en la inspección, brevemente se explica cómo debería desarrollarse la implementación de la herramienta desarrollada, se describen también los procesos y funcionamiento del gestor para con cada uno de los elementos y finalmente, se exponen algunas conclusiones que deberán tomarse en consideración para la industria, en específico en el sector de mantenimiento: la evaluación e inspección.

El manual se dispone en dos formatos, el formato para impresión y el formato digital, el operador puede de acuerdo con su conveniencia y sistema interno implementar uno o ambos formatos.

La función principal de este manual es acompañar y aclarar el funcionamiento del gestor para el usuario, su redacción está pensada para que el usuario no requiera de este informe para su utilización, aun así, se recomienda acompañar el estudio del manual con una lectura de este informe para que pueda tener una mejor comprensión de la industria férrea.

El manual por sí sólo no es funcional, para su comprensión es necesario en paralelo el uso del gestor, caso contrario con el gestor, este puede utilizarse sin el manual (corriendo el riesgo de error).

Se destacan de los resultados de este proyecto la facilidad y operatividad de la herramienta desarrollada, donde cada uno de sus componentes en conjunto mediante las conexiones internas le permiten al usuario acceder al conocimiento necesario para desarrollar e implementar su sistema de evaluación/inspección dentro de su plan de mantenimiento.

Capítulo 4: Análisis de Resultados

El reto más grande de la infraestructura pública en Costa Rica no ha sido su construcción, lo ha sido el mantenimiento en el tiempo de las obas, para el adecuado mantenimiento es fundamental conocer el estado de los activos para de esta forma prevenir y mitigar defectos que puedan afectar la operatividad de estos; esto es conocido como mantenimiento activo, pieza clave es un sistema de evaluación/inspección, tal como el propuesto en este proyecto.

4.1 Propiedades evaluables de los elementos de la infraestructura usadas para determinar su calidad

El gran bagaje de normas y reglamentos que tiene Alemania y en específico para su industria ferroviaria permite que una mayoría de los procesos que se realizan a nivel de inspección/evaluación se encuentren normalizados o en proceso de estandarización; hola leo luar las propiedades de los elementos que determinan la calidad de la infraestructura feria el contar con este tipo de normas y reglamentos facilita su veracidad su precisión su repetibilidad y el nivel de compatibilidad entre diferentes tipos de sistemas férreos, sin embargo esta misma estandarización puede llegar a aceptante para el desarrollo de nuevos métodos equipos y o tecnologías que se aboquen a la medición y evaluación de algunas propiedades aún hoy poco exploradas.

Aun y con toda la estandarización alemana, la industria avanza rápido y el desarrollo de nuevos equipos y tecnologías provocan que existan a su vez nuevos métodos de inspección no normados, por ejemplo, en la Figura 26 se contabilizaron al menos 7 de estos para el balasto. Gran parte del valor de esta investigación y la razón del por qué se escogió el sistema alemán justamente coincide por su historia y el desarrollo que está teniendo como pionero en su continente en las últimas décadas, hoy no solo a nivel de inspección y evaluación sino que también a nivel ambiental considerando estos aspectos desde la construcción y como elemento clave para la determinación de los valores que deben satisfacer las propiedades, esto se puede observar en cada una de las normas que son citadas en el texto de este informe.

Conectado con el párrafo anterior en la Figura 26 se encuentra que para las traviesas y rieles no se encontraron procesos no normados, esto debe entenderse en complemento con lo expuesto por la Figura 25, donde se ve que para las traviesas existen al menos 11 procesos y para los rieles 16. En ambos gráficos se exponen métodos para propiedades que se pueden evaluar In situ o en laboratorio, el aspecto que se resalta y

da luz en la cantidad para estos elementos es el tipo de propiedades evaluadas, para el balasto, una mayoría de los procedimientos no normados son para evaluar propiedades In Situ, nótese que no existen más que 3 procesos normados para este tipo de pruebas en el balasto, mientras que para los otros elementos hay una mayor abundancia de pruebas In Situ normadas.

De los elementos estudiados en el proyecto para el que mayor documentación se dispone es para los rieles, la industria por muchos años ha apuntado a estandarizarlos, particularmente en Europa, esta estandarización busca desarrollar una interoperabilidad entre los diversos países, el balasto es el que cuenta con una menor cantidad de información para ser consultada, mientras que las traviesas en particular de concreto han venido siendo implementadas desde mediados del siglo XX y se han estandarizado ampliamente en el siglo presente.

Alemania, por medio de la Autoridad Federal de Ferrocarriles estable normas generales para la operación, construcción y desarrollo de infraestructura férrea, ahora dentro de sus códigos las fuentes primarias son normas de la DB o bien, normas europeas, por lo que dentro de la exposición realizada se omite la descripción de este código y buscando el abordaje de las fuentes primarias. Muchas de las normas que se expusieron en el desarrollo de este informe cuentan un alcance no sólo a nivel alemán, sino que también a nivel europeo, e inclusive a nivel internacional (en el caso de la UIC).

Los procesos y normas brindan una amplia cobertura y guía, sin embargo, en el campo de la investigación se encontró una cantidad de proyectos considerable que buscan nuevos medios de evaluar los elementos, principalmente el balasto y traviesas, por lo que cuando se desarrolle la segunda etapa de este proyecto deberá realizarse una amplia revisión del progreso de las investigaciones citadas o bien, nuevas.

Cada una de las propiedades que se pueden utilizar para evaluar la calidad de los rieles, traviesas y balasto cuenta con un trasfondo técnico e histórico que valida su autoridad y competencia como determinante al momento de tomar decisiones sobre la red ferroviaria del operador; tal es el caso del módulo de balasto, el cual ha sido estudiado desde el siglo 19 y todavía hoy sigue siendo relevante para cuantificar la calidad de un palazo previo a ser colocado una vez que se encuentra en situ y cuando procede a ser reciclado; al considerar el caso de las traviesas un valor estándar a nivel de la industria de construcción como lo es la resistencia a la compresión del concreto, es usada para conocer cuando estas han sufrido daños a nivel estructural en su matriz, mediante la medición de su valor en diferentes puntos de las traviesas; y en el caso de los rieles hoy integridad estructural es determinante para su comportamiento en la transmisión de cargas, en la actualidad se utilizan procedimientos modernos como el uso de equipos de ultrasonido con diferentes sensores que permiten establecer su composición e integridad, hasta inclusive detectar cuando se tienen fisuras a nivel interno (que no puedan ser notadas desde la superficie. Cada una de las propiedades presentadas en el CUADRO 4y CUADRO 5 son ampliamente utilizadas por la Deutsche Bahn, en el Apéndice A se pueden consultar los equipos utilizados para evaluarles los procedimientos y medios respectivos para cada uno de estos, en función de las capacidades del equipo, consulte también la sección 4.2 para más detalle.

4.2 Equipos y maquinaria utilizada en procesos de inspección y/o evaluación para determinar la calidad de los elementos estudiados

El proceso de evaluar infraestructura requiere de equipos especializados para dicho fin, o bien, sensores de alta precisión que se puedan adaptar para las necesidades del sector; se estudiaron 14 equipos diseñados especialmente para su uso en la industria férrea, además de algunas propuestas desde el sector de la investigación.

Se hizo especial énfasis en los equipos presentados en las figuras 23-26 debido a que representan los equipos más modernos y eficientes de sus marcas o estilo, no todos los equipos estudiados se recomiendan para su uso en los procesos para evaluación, sin embargo, se busca que el lector y operador on la lista y detalle de los equipos puedan tener una compresión de cuáles son las opciones actuales en el mercado alemán (y prácticamente internacional).

De todos los equipos se debe destacar que globalmente existen dos categorías, los equipos de uso manual, que operan de forma cíclica o por secciones y siendo propulsados por un operario de forma manual, y los equipos mecánicos (pueden ser autopropulsados o no), estos por lo general incorporan una gran cantidad de sensores y realizan inspección en más de dos elementos de forma simultánea, inclusive tal como la EM120VT de P&T que registra información de aun más elementos que los estudiados en este proyecto.

Cada uno de los equipos ofrece tecnologías que el operador deberá valorar según el tamaño de su red ferroviaria, considerando el tamaño de la red costarricense, que no supera los 150 km actualmente, se recomienda el uso de las plataformas manuales, sea la plataforma GEDO CE 2.0 de Trimble o la GRP System FX de Amberg Technologies, desde una perspectiva de versatilidad y funcionalidad la plataforma GEDO CE 2.0 aporta una cobertura indirecta para todos los elementos estudiados y está prevista para la incorporación de una mayor cantidad de sensores respecto de los incluidos en la GRP System FX, el autor no puede brindar un análisis desde la perspectiva económica debido a que esta información no es brindada a usuarios no corporativos, por lo que las recomendaciones de equipo son basadas únicamente en las capacidades de los equipos y desde el pensamiento de las capacidades de los equipos.

Los equipos de P&T o MATISA, son recomendados cuando la red del operador se mida en diez miles de kilómetros, ya que estos equipos tomando de referencia la EM120VT puede cubrir una red de 1000 km en menos de una semana realizando mediciones, por lo que para Costa Rica estos equipos actualmente podrían ser utilizados a través de un proveedor externo, pero no será eficiente su adquisición.

Las plataformas manuales operan a velocidades de entre 5 – 10 km/h por lo que para la red costarricense contando con un operador especializado y una de estas plataformas sería suficiente para realizar levantamientos de toda la red de forma periódica, inclusive múltiples veces cada semestre.

Se hace una especial recomendación al equipo de Vossloh SRE, ya que las plataformas a pesar de su versatilidad y capacidades de hacer levantamientos con diversos sensores, para con los rieles, que son los elementos más críticos de las vías, no aportan datos del estado interno o defectos que estos puedan presentar respecto de fisuras superficiales, entre tanto que el SRE profundiza y determina el estado de los rieles a un mayor detalle, esta herramienta no es pensada para su uso en toda la red, es pensado para la revisión de las zonas donde los ensayos geométricos indirectos hayan mostrado evidencia de posibles defectos.

Está Claro que los equipos y maquinaria no son en sí mismos los medio utilizados para evaluar la calidad de la infraestructura, sin embargo, se vuelven indispensables para obtener medidas precisas y exactas que garanticen la calidad no solamente de los elementos de la infraestructura, sino también del servicio ofrecido sea este de carga o transporte de pasajeros, siendo el más crítico el último, ya que en este tipo de servicio se llegan a alcanzar velocidades (en sistemas de alto desempeño) que superan los 200 km/h; para operar redes ferroviarias a estas velocidades se vuelve necesario implementar un sistema de gestión con equipos automatizados que no interrumpan el flujo normal y operación normal de las vías, de ahí el enfoque del informe hacia los equipos y maquinaria, aun así no se deja de lado los medios y entendimiento de cada equipo, expuesto en sus fichas o en el Apéndice A.

Tal cual se menciona en la sección de Resultados, a hoy muchos proveedores no solamente ofrecen los sensores, los equipos o la maquinaria, junto con estos ofrecen (1) capacitaciones para el personal que los va a operar, así como también (2) la implementación de sistemas de software que le permiten al operador realizar una interpretación precisa y en tiempo real de los datos que está recopilando en campo, tal es el caso del equipo de Vossloh, el HSG-city, que no solamente recopila datos y los analiza en tiempo real, sino que en paralelo puede realizar labores de esmerilado y pulido de los rieles para alcanzar el cumplimiento de las normas que regulan la geometría de estos.

Con el progreso que tiene la tecnología y el avance de la industria férrea en países pioneros como Alemania limitar el alcance de esta investigación a los pormenores de cada uno de los procedimientos y medios utilizados para la evaluación e inspección de los rieles traviesas y balasto limitaría el panorama general y habría oscurecido el resultado deseado, generar una herramienta introductoria a la evaluación de infraestructura férrea, esta es pensada para el operador costarricense buscando el último nivel de la tecnología disponible a la fecha. Estos pormenores pueden ser considerados en futuras investigaciones que cuenten con los recursos.

Finalmente, se hace hincapié respecto al uso de equipos, esta tarea requiere de personal capacitado y de preferencia con experiencia en el sector, tal se comentó todos (o su mayoría) los proveedores de equipo analizados ofrecen la opción de junto con sus equipos brindar el servicio de capacitación para el personal del operador. Se aconseja encarecidamente siempre incluir estas capacitaciones al comprar cualquier equipo, los

datos que arrogan los equipos dependen en gran medida de las configuraciones con las que se establen al momento de levantar los datos.

4.3 Matriz de evaluación y manual de procedimientos

La matriz de evaluación (o gestor) no puede ser analizada sin considerar el manual de procedimientos que le acompaña, en conjunto forman el producto principal de este proyecto, por lo que es esta sección se analiza el diseño, comportamiento y funcionalidad de esta herramienta.

El gestor es una herramienta digital, que no está preparada para su impresión, en la que se puede acceder de forma eficiente y sencilla a las propiedades de los elementos que según el estado del arte pueden ser evaluadas con el fin de establecer su estado cuando se encuentran en uso, el gestor provee una gran cantidad de información extra a la matriz para que el usuario de forma interactiva pueda visualizarla y comprender cuáles son los parámetros que deberá establecer en su plan de mantenimiento.

El manual de procedimientos no establece ni dicta la totalidad de procesos o procedimientos que se encuentran a través del gestor, el manual busca brindar una orientación de cómo funciona el gestor y cómo poder utilizarlo de forma eficiente en la implementación del sistema de calidad del operador. El manual ofrece también un concepto básico de la industria férrea, terminología y demás que se usan en el mismo manual y en el gestor, gracias a esto inclusive usuarios con poca experiencia en el sector pueden acercarse y participar de la implementación de la herramienta, que tal y como se expone en el manual requiere de un equipo multidisciplinario para el mejor beneficio del operador férreo y su infraestructura.

El gestor ofrece algunos valores de referencia para con las variables que cuantifican las propiedades de los elementos, sin embargo, debe quedar completamente claro que son únicamente de referencia, los valores que use el operador deberán ser ajustados con las características propias de su red, por lo que en este sentido la herramienta no es lo sufrientemente exhaustiva como para ser implementada directamente tal cual se encuentra, en conversaciones con el Ing. José Antonio Quirós, del INCOFER, se determinó que la herramienta no se desarrollase pensando en la infraestructura actual, sino que se plantease para los proyectos de construcción que tiene el INCOFER, en razón de que actualmente aun si la herramienta se desarrollase y fuera altamente precisa con valores actuales la institución no cuenta con los recursos financieros para implementarla y mantener la evaluación constante que se propone, de esta forma el producto final cuenta con una gran cantidad de incógnitas que sólo podrán atendidas cuando se desarrolle e implemente el plan piloto.

Cada uno de los elementos tiene un abordaje diferente tanto en el gestor como en el manual, en concordancia con la normativa y reglamentos, para el balasto inclusive se realizan propuestas de herramientas aun no desarrolladas, mientras que para las traviesas se desarrolla un proceso global que ilustra la mejor secuencia de ejecución para ensayos, ya que una mayoría están normados y cuentan con sus procedimientos específicos en las respectivas normas.

Sin demeritar el producto final, este no logra satisfacer a un punto de detalle los defectos de los rieles, este elemento en razón de ser el qué más normativa, reglamentos e investigaciones tiene se volvió imposible completar/desarrollar una propuesta para la detección/evaluación de estos, esta dificultad se ve acelerada en función de que muchos de los defectos que se tienen tipificados no cuentan con una forma de detección temprana, una mayoría de los defectos listados por la norma EN 17397-1 son identificables en etapas cuando ya no pueden ser prevenidos, únicamente con reparación, cuando estos defectos ya se encuentran en esta etapa son notorios inclusive a simple vista del ojo humano, por lo que su proceso de inspección viene reducido a una inspección visual/manual de las vías.

La herramienta cuenta con la limitación y es que requiere del uso de la suite de software de ofimática Microsoft 365, la cual es de pago, sin embargo, tal y como se expuso en los resultados se decidió utilizar esta plataforma por el uso extendido que tiene a nivel costarricense, muchos de los usuarios y posibles lectores se encuentran relacionados con el funcionamiento y operación de esta plataforma.

De forma general la herramienta cumple con las características necesarias para guiar al usuario en su implementación refiriéndole a fuentes externas o internas que aportan la información necesaria para que este pueda completar de forma satisfactoria su gestión de evaluación/inspección en sus planes de mantenimiento.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El proyecto satisfizo una mayoría de las actividades que se propusieron para esta primera etapa, puntualmente fue posible hacer una revisión exhaustiva de las propiedades que establecen la calidad de la infraestructura estudiada por medio del estudio de las normas alemanas y europeas, algunos de los reglamentos internos de DB, junto también con literatura de autores externos relacionada, el conjunto de esta información permitió conocer las propiedades más relevantes para la evaluación/inspección del balasto, las traviesas y los rieles.

Cada uno de los equipos y maquinaria estudiados fue caracterizado a un nivel de detalle general, así como 4 de estos fueron caracterizados a profundidad, siendo estos los más óptimos y utilizados por la DB en Alemania, de estos no todos son adecuados para su implementación en Costa Rica por la extensión de su red férrea, sin embargo, brindan un amplio panorama de los medios de punta actuales disponibles para las tareas de inspección y evaluación.

En el producto final, incluyendo la matriz (gestor) y el manual se incorporan las conexiones con los equipos estudiados, normas y procedimientos; la plataforma de software seleccionada garantiza una ejecución a nivel informático multiplataforma entre la mayoría de usuarios, gracias a las selección del paquete de Microsoft 365 para el desarrollo de la herramienta, dentro del gestor se alcanzó un alto nivel de detalle para el balasto y traviesas, para los rieles no fue posible desarrollar todos los procesos que tipifican sus defectos.

Considerando que este proyecto desarrolló una primera fase de un posible macroproyecto y a pesar de los inconvenientes que representó no tener acceso a ciertos reglamentos de la DB, fue posible desarrollar una herramienta robusta que guiaría al operador férreo costarricense en las propiedades que debe evaluar, las normas/reglamentos y las investigaciones que debe consultar para poder realizar una evaluación eficiente de la calidad de la infraestructura de su red.

Finalmente, se recuerda que la herramienta no es suficiente por sí sola para la gestión de la infraestructura férrea, esta requiere de ser parte del plan de mantenimiento del sistema de calidad del operador.

Recomendaciones

Se recomienda a INTECO, valorar las oportunidades con aquellos entes normativos internacionales o de otros países la equiparación, adopción o creación de normas en el aspecto técnico para la industria ferroviaria nacional, con el fin de normalizar los procesos no sólo de evaluación/inspección como los abordados en este informe, sino que también se puede normalizar su gestión de infraestructura y administración a nivel general. Para este fin, en la sección de Referencias constan los diferentes entes que a nivel global están a la delantera en esta materia.

Se recomienda a las Universidades públicas costarricenses que imparten carreras profesionales en el sector de la ingeniería civil, Tecnológico de Costa Rica y Universidad de Costa Rica, la incorporación en sus planes de estudio del tópico de ingeniería ferroviaria, dada la necesidad país de avanzar en esta materia.

Para las siguientes etapas de este posible macroproyecto o investigaciones afines, el o los investigadores deberán tomar en cuenta lo siguiente:

- Utilizando como base las normas y reglamentos citados en este informe, de previo será necesario contar una financiación que le permita acceder a la totalidad del contenido de aquellos que no pudieron ser consultados.
- A menos de que se cuente con un equipo de dos o más investigadores, el investigador deberá limitar el alcance del proyecto, es decir, seleccionar solo uno de los elementos y desarrollar el plan piloto solamente para ese. El autor recomienda el balasto, ya que es el elemento en el que se tiene un mayor rango de acción para la experimentación desde la óptica de procesos no normados.
- Cada uno de los procesos propuestos puede ser llevado a un mayor nivel de detalle para entender los pormenores de cada medio de evaluación usado y será necesario para la implementación, realizar la validación de los valores aportados como de referencia, esto según el tipo de infraestructura que posea el operador.

Si la implementación es realizada directamente por un operador férreo, se recomienda encarecidamente que contacte al autor de este trabajo para participar en el proceso y beneficiar no sólo al operador con su sistema, sino también continuar aportando a la sociedad con investigación desde la academia.

Referencias

Agüero, J. (2020). Viaje del recuerdo. Fragmentos de la historia del ferrocarril al pacífico de costa rica. *Revista Herencia*, *33*(1), 7–24. https://doi.org/10.15517/H.V33I1.43299

Amberg Rail Inspection. (s/f). Recuperado el 26 de julio de 2024, de https://ambergtechnologies.com/solutions-services/amberg-rail/amberg-inspection

Amberg Technologies. (2021). *Amberg Tamping Innovative surveying solutions for rail works*.

Amberg Technologies. (2024a). *Amberg inspection IMS relative*.

Amberg Technologies. (2024b). *Amberg Rail Inspection*. https://ambergtechnologies.com/solutions-services/amberg-rail/amberg-inspection

Amberg Technologies. (2024c). *GRP System FX*. https://ambergtechnologies.com/solutions-services/amberg-rail/grp-system-fx

Amberg Technologies. (2024d). *Inspection System for Railway Professionals AMBERG INSPECTION*.

Aritua, B. (2019). *The Rail Freight Challenge for Emerging Economies: How to Regain Modal Share*. World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1381-8

Avendaño-Flores, I. (2018). El tranvía de San José: un fantasma de la memoria histórica urbana y del patrimonio de Costa Rica. En *Artigo PatryTer •*. Artigo. http://www.tramz.com/cr/cr.html

Barrera, M. F. (2023, abril 3). *Los 12 métodos más comunes para el análisis de datos.* | *LinkedIn*. https://www.linkedin.com/pulse/los-12-m%C3%A9todos-m%C3%A1s-comunes-para-el-an%C3%A1lisis-de-datos-fatima-barrera/

Benz, S., & Siggel, S. (2024). *Maschinentechnik der DB Bahnbau Gruppe Für Planer* (6a ed.). DB Bahnbau Gruppe GmbH / Marketing, Kommunikation.

Berggren, E. (s/f). *Railway Track Stiffness Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance Railway Track Stiffness-Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance*.

Brent D. Ogden Kimley-Horn and Associates Inc., & Chelsey Cooper Kimley-Horn and Associates Inc. (2019). *Highway-Rail Crossing HANDBOOK Third Edition*.

Casey, J. (1976). El ferrocarril al Atlántico en Costa Rica 1871-1874. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 291–344. https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/anuario/article/view/3846

Cast-Welding Rail Joints. (1894). En *Street Railway Review* (Vol. 4, pp. 749–753). Windsor & Kenfield Publishers. https://archive.org/details/streetrailwayrev04amer/page/749/mode/1up?view=theater

Cervero, R. (1998). *The transit metropolis: a global inquiry: Vol. XIII*. Island Pr.

Ćetković, J., Lakić, S., Bogdanović, P., Vujadinović, R., & Žarković, M. (2020). Assessing environmental benefits from investment in railway infrastructure. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(3), 2125–2137. https://doi.org/10.15244/pjoes/109849

Chen, F., Ferreira, L., Chen, J., & Zhang, J. (2000). *Railway Infrastructure Management Using a GIS Based Integrated Approach*.

Chen, M., Huang, Z., & Zhang, M. (2012). *A GIS Based Model for Land Use and Transit-Integrated Corridor Optimization*.

Costa Rica Railway Company Ltd. and Northern Railway Company (Northen Raiway Co.). (1954). Fotolitografia Universal de Carlos Federspiel & Co. S.A.

DB Investor Relations. (2024). *Business Units*. https://ir.deutschebahn.com/en/db-group/business-units/

DB Netz AG. (2006). *TL 889.0146 (DBS 918.146) - Technische Lieferbedingungen; Aufgearbeitete Spannbetonschwellen*.

DB Netz AG. (2023). *TL 889.0061 (DBS 918 061) - Technische Lieferbedingungen Gleisschotte*.

Decreto Ejecutivo 6686: Intervención temporal de Ferrocarril Eléctrico al Pacífico y Ferrocarril Nacional al Atlántico (1977). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=5886&nValor3=6244&strTipM=TC

Deutsche Bahn AG. (s/f). *Share of renewable energies in the traction current mix | Deutsche Bahn Annual Report 2023*. Recuperado el 1 de junio de 2024, de https://ibir.deutschebahn.com/2023/en/combined-management-report/green-transformation/climate-protection/share-of-renewable-energies-in-the-traction-current-mix/

Deutsche Bahn AG. (2019). *Deutsche Bahn Daten & Fakten 2018*.

Deutsche Bahn AG Kommunikation. (s/f-a). *Chronik von 1835 bis heute*. Recuperado el 28 de mayo de 2024, de https://www.deutschebahn.com/de/konzern/geschichte/Chronik-von-1835-bis-heute-6879062#

Deutsche Bahn AG Kommunikation. (s/f-b). *DB | Interactive key figure comparison | Fleet and Infrastructure*. Recuperado el 1 de junio de 2024, de https://kpi.deutschebahn.com/en/fleet-and-infrastructure

Deutsche Bahn trains from ICE to Intercity. (s/f). Recuperado el 1 de junio de 2024, de https://int.bahn.de/en/trains/long-distance-trains

European Committee for Standardization. (2003). *EN 13450. Aggregates for railway ballast*.

European Committee for Standardization. (2009a). *EN 14587-2. Railway applications; Track; Flash butt welding of rails; Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant*.

European Committee for Standardization. (2009b). *EN 15594. Railway applications; Track; Restoration of rails by electric arc welding*.

European Committee for Standardization. (2016a). *EN 13230-1. Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 1: General requirements*.

European Committee for Standardization. (2016b). *EN 13230-2. Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 2: Prestressed monoblock sleepers*.

European Committee for Standardization. (2016c). *EN 16729-1. Railway applications; Infrastructure Non-destructive testing on rails in track; Part 1: Requirements for ultrasonic inspection and evaluation principles*.

European Committee for Standardization. (2017a). *EN 13306. Maintenance; Maintenance terminology*.

European Committee for Standardization. (2017b). *EN 13674-1:2012+A1. Railway applications; Track; Rail; Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*.

European Committee for Standardization. (2017c). *EN 14730-1. Railway applications; Track; Aluminothermic welding of rails; Part 1: Approval of welding processes*.

European Committee for Standardization. (2018a). *EN 13231-5. Railway applications; Track; Acceptance of works; Part 5: Procedures for rail reprofiling in plain line, switches, crossings and expansion devices*.

European Committee for Standardization. (2018b). *EN 14587-1. Railway applications; Infrastructure; Flash butt welding of new rails; Part 1: R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT grade rails in a fixed plant*.

European Committee for Standardization. (2018c). *EN 16729-3. Railway applications; Infrastructure; Non-destructive testing on rails in track; Part 3: Requirements for identifying internal and surface rail defects*.

European Committee for Standardization. (2018d). *EN 16729-4. Railway applications Infrastructure; Non-destructive testing on rails in track; Part 4: Qualification of personnel for non-destructive testing on rails*.

European Committee for Standardization. (2019). *EN 17018. Railway applications; Rolling stock maintenance; Terms and definitions*.

European Committee for Standardization. (2020a). *EN 13230-6. Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design*.

European Committee for Standardization. (2020b). *EN 13231-2. Railway applications;Track; Acceptance of works; Part 2: Acceptance of reprofiling rails in plain line, switches, crossings and expansion devices*.

European Committee for Standardization. (2020c). *EN 16729-2. Railway applications; Infrastructure; Non-destructive testing on rails in track; Part 2: Eddy current testing of rails in track*.

European Committee for Standardization. (2020d). *EN 17397-1. Railway applications; Rail defects; Part 1: Rail defect management*.

European Committee for Standardization. (2021a). *EN 13230-4:2016+A1. Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 4: Prestressed bearers for switches and crossings*.

European Committee for Standardization. (2021b). *EN 14730-2. Railway applications; Track; Aluminothermic welding of rails; Part 2: Qualification of aluminothermic welders, approval of contractors and acceptance of welds*.

European Committee for Standardization. (2023). *EN 16729-5. Railway applications; Infrastructure; Non-destructive testing on rails in track; Part 5: Non-destructive testing on welds in track*.

European Committee for Standardization. (2024). *EN 16843. Railway applications; Infrastructure; Mechanical requirements for joints in running rails*.

Fallas, H., Salazar, C., & Ágüero, M. (2017a). Agonía sobre rieles 1ra entrega. *La nacion*. https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/primera_entrega/index.html?desktop=true

Fallas, H., Salazar, C., & Ágüero, M. (2017b). Agonía sobre rieles 2da entrega. *La nacion*. https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/segunda_entrega/index.html?desktop=true

Fallas, H., Salazar, C., & Ágüero, M. (2017c). Agonía sobre rieles 3ra entrega. *La nacion*. https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/tercera_entrega/index.html?desktop=true

Fallas, H., Salazar, C., & Ágüero, M. (2017d). Mapa ruta reactivación [mapa]. En *la nacion*. https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/tercera_entrega/imgs/mapa_ruta_reactivacion.png?hash=16112017v1

Fallas, H., Salazar, C., & Ágüero, M. (2017e). Prioridad sobre asfalto [Gráfico]. En *LA NACION*. https://www.nacion.com/gnfactory/investigacion/2017/trenes/primera_entrega/imgs/carreteraYflota.png?hash=16112017v1

Freystein, H., Muncke, M., & Schollmeier, P. (2015). Oberbau. En *Handbuch Entwerfen von Bahnanlagen : Regelwerke, Planfeststellung, Bau, Betrieb, Instandhaltung* (3a ed., pp. 529–563). Eurailpress in DVV Media Group.

Führer, G. (1979). Oberbauberechnung : [Grundlagen, Schienenbeanspruchung, Schwellenbeanspruchung, Lagesicherheit lückenloser Gleise]. En *Eisenbahnbau*.

Handbuch Eisenbahninfrastruktur. (2019). En L. Fendrich & W. Fengler (Eds.), *Handbuch Eisenbahninfrastruktur* (3a ed.). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56062-4

Hebestreit, F. (s/f). *Electric Railway - Siemens Global*. Recuperado el 29 de mayo de 2024, de https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/on-track.html

INCOFER. (2018). *Plan estratégico institucional 2019-2023*. https://www.incofer.go.cr/transparencia-institucional/plan-estrategico-institucional/

INCOFER. (2023). *Mapa NCOFER [Esquema]*. https://www.incofer.go.cr/wp-content/uploads/2023/07/mapa-incofer.png

ITS Projekt. (2024). *What is the stuttgart-ulm rail project? Infrastructure for the future, much more than a station, facts and figures*. Bahnprojekt stuttgart–ulm e. V. https://www.its-projekt.de/wp-content/uploads/2024/03/ITS_Gesamtprojektbroschuere_EN_2024-02-22_WEB_DS.pdf

Keichel, J. (2021). *Thermit® Schweißen*. https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10002264/ews/2021-wise/2021-10-25-folien.pdf

Ley 7001: Ley Orgánica Instituto Costarricense Ferrocarriles INCOFER [Versión original] (1985). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=5272&nValor3=5590&strTipM=TC

Lichtberger, B. (2010). *Handbuch Gleis : Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit* (3a ed.). Eurailpress, DVV Media Group.

LoPresti, J., & McHenry, M. (2019). *Detection of Concrete Tie Rail Seat Deterioration*.

Ludewig, J., Brickman-Salzedo, D., & Schneider, F. (Eds.). (2008). *European railway legislation handbook* (2a ed.). Eurailpress.

Martínez-Corona, J. I., Palacios-Almón, G. E., & Oliva-Garza, D. B. (2023). Guía para la revisión y el análisis documental: propuesta desde el enfoque investigativo. *Ra Ximhai*, 67–83. https://doi.org/10.35197/rx.19.01.2023.03.jm

MATISA MATÉRIEL INDUSTRIEL S.A. (s/f). *MATISA Matériel Industriel S.A. : AUSCULTATION VEHICLES*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.matisa.ch/en/matisa-auscultation-vehicles.php

MATISA MATÉRIEL INDUSTRIEL S.A. (2015). *M 1200 MATISA / SNCF - YouTube*. https://www.youtube.com/watch?v=LDhUkI3B8-I

MATISA MATÉRIEL INDUSTRIEL S.A. (2019). *MATISA M 10-S / Tokyo Metro - YouTube*. https://www.youtube.com/watch?v=esaHBCpIsmY

Menius, R., & Matthews, V. (2017). Bahnbau und Bahninfrastruktur. En *Bahnbau und Bahninfrastruktur* (9a ed.). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-17177-3

Menius, R., & Matthews, V. (2020). Bahnbau und Bahninfrastruktur. En *Bahnbau und Bahninfrastruktur* (10a ed.). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27733-8

Oden, C. P., Ho, C. L., Kashani, H. F., & Smith, S. S. (2018). *Ballast Fouling Measurement Tool: Phase 1*. http://www.fra.dot.gov.

ONU. (s/f). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 8 de octubre de 2023, de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

ONU. (2022, marzo 14). *Las emisiones mundiales de CO2 repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia*. https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia

Organización Internacional de Normalización. (2012a). *Evaluación de la conformidad - Requisítos para el funcionamiento de diferentes tipos de organismos que realizan la inspección (ISO/IEC 17020:2012)*. https://www.iso.org/standard/52994.html

Organización Internacional de Normalización. (2012b). *Evaluación de la conformidad - Requisitos para organismos que certifican productos, procesos y servicios (ISO/IEC 17065:2012)*. https://www.iso.org/standard/46568.html

Organización Internacional de Normalización. (2017). *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (ISO/IEC 17025:2017)*. https://www.iso.org/standard/66912.html

Organización Internacional de Normalización. (2020). *Evaluación de la conformidad - Vocabulario y principios generales (ISO/IEC 17000:2020)*. https://www.iso.org/standard/73029.html

Pienaar, W. (2003). Rail or road? An overview. *Civil Engineering = Siviele Ingenieurswese*, *11*(8), 18–21.

Plasser & Theurer. (s/f-a). *Plasser & Theurer: Infrastructure - Gemelo digital: EM100VT*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.plassertheurer.com/es/infrastructure/gemelo-digital/em100vt

Plasser & Theurer. (s/f-b). *Plasser & Theurer: Infrastructure - Gemelo digital: EM120VT*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.plassertheurer.com/es/infrastructure/gemelo-digital/em120vt

Plasser & Theurer. (s/f-c). *Plasser & Theurer: Machine - Track recording cars: GMTZ*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.plassertheurer.com/es/machine/vehiculos-de-medicion/gmtz

Plasser & Theurer. (s/f-d). *Plasser & Theurer: Machine - Vehículos de medición: EM80H*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.plassertheurer.com/es/machine/vehiculos-de-medicion/em80h

Plasser & Theurer. (s/f-e). *Plasser & Theurer: Machine - Vehículos de medición: EM100U*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.plassertheurer.com/es/machine/vehiculos-de-medicion/em100u

Plasser & Theurer. (s/f-f). *Plasser & Theurer: Machine - Vehículos de medición: EM160*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.plassertheurer.com/es/machine/vehiculos-de-medicion/em160

Pomareda, F. (2023, septiembre 18). *Alcalde de Paraíso: "No es suficiente, el tren debe llegar hasta el centro de Paraíso"*. Semanario UNIVERSIDAD. https://semanariouniversidad.com/pais/alcalde-de-paraiso-no-es-suficiente-el-tren-debe-llegar-hasta-el-centro-de-paraiso/

Real Academia Española. (2023). *sistema | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE*. https://dle.rae.es/sistema

Sáenz, M. (1911). *Los ferrocarriles en costa rica*.

Schweerbau GmbH & Co. KG. (s/f). *Inicio - Construcción Pesada*. Recuperado el 29 de julio de 2024, de https://www.schweerbau.de/

Selig, E. T., & Li, D. (1994). Transportation Research Record No. 1470, Railroad Research Issues. *Transportation Research Record*, *1470*.

Soporte Técnico Microsoft. (s/f). *Qué hacer si un conjunto de datos es demasiado grande para la cuadrícula de Excel - Soporte técnico de Microsoft*. Recuperado el 31 de julio de 2024, de https://support.microsoft.com/es-es/office/qu%C3%A9-hacer-si-un-conjunto-de-datos-es-demasiado-grande-para-la-cuadr%C3%ADcula-de-excel-976e6a34-9756-48f4-828c-ca80b3d0e15c

Stuart, C., Dersch, M., & Bastos, J. C. (2022). *Concrete Tie Performance in Degraded Track Conditions*.

Stuart, C., Sussmann, T., & Liu Shushu. (2023). *Modeling track mechanical behavior with under tie pads and under ballast mats*.

Trimble Inc. (2024a). *Clearance analysis and as-built surveying | Trimble Track Surveying & Scanning*. https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/clearance-analysis-as-built

Trimble Inc. (2024b). *Download – Trimble Track Survey & Scanning*. https://download.trimble-railway.com/download/#498-515-brochure

Trimble Inc. (2024c). *Hardware | Trimble Track Surveying & Scanning*. https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/hardware

Trimble Inc. (2024d). *Sistema de mapeo móvil Trimble MX90 | Trimble Geospatial*. https://geospatial.trimble.com/es/products/hardware/trimble-mx90

Trimble Inc. (2024e). *Sistemas de mapeo móvil Trimble | Trimble Geospatial*. https://geospatial.trimble.com/es/products/hardware/mobile-mapping

Trimble Inc. (2024f). *Trimble GEDO CE 2.0 | Hardware | Trimble Track Surveying & Scanning*. https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/trimble-gedo-ce-20

Trimble Inc. (2024g). *Trimble GEDO GX50 | Hardware | Trimble Track Surveying & Scanning*. https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/trimble-gedo-gx50

Trimble Inc. (2024h). *Trimble GEDO IMU | Hardware | Trimble Track Surveying & Scanning*. https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/trimble-gedo-imu

Trimble Inc. (2024i). *Trimble GEDO Profiler | Hardware | Trimble Track Surveying & Scanning*. https://gedo.trimble.com/en/products-and-solutions/trimble-gedo-profiler

Unión Internacional de Ferrocarriles. (2024). *RailLexic online*. https://raillexic.termweb.eu/login

Vaatz, A., & Dumitsch, R. (2023). 360°-Multisensorplattform –Gleisgebundene Datensammlung. *Eisenbahningenieur*, *74*(4), 25–31.

Vossloh AG. (s/f). *SoniQ Rail Explorer*. Recuperado el 8 de mayo de 2024, de https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_43968.php

Vossloh AG. (2024a). *HSG-2 grinding train*. https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_20609.php

Vossloh AG. (2024b). *HSG-city Grinding Machine*. https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_20928.php

Vossloh AG. (2024c). *Rail Monitoring*. https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_21188.php

Vossloh AG. (2024d). *Smart Maintenance on the fly'*. https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_21248.php

Vossloh AG. (2024e). *SoniQ Rail Explorer*. https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_43968.php

Watson, I., Ali, A., & Bayyati, A. (2017, junio 23). *An Investigation of the Operational Reliability of High-Speed Railways and Possible Measures to Improve it.* https://openresearch.lsbu.ac.uk/item/86yz5

Wilk, S., & Li, D. (2023). *Relationship of Inspection Methods to Ballast Degradation Models: Phase I*.

Apéndices

Apéndice A.
Equipos de inspección usados en Alemania

CUADRO 9. EQUIPOS DE INSPECCIÓN USADOS EN ALEMANIA, CATEGORIZADOS SEGÚN LOS ELEMENTOS EVALUADOS

Denominación	Cat 4. Elementos Evaluados	Subcat. 4.1 Actividades Balasto	Subcat. 4.2 Actividades Traviesas	Subcat. 4.3 Actividades Rieles	Subcat. 4.4 Actividades Línea/Vía	Comentarios	Referencias
GMTZ	A	Múltiples	Presencia de fisuras / grietas	Múltiples	Alineamiento vertical / horizontal	No fue posible verificar las especificaciones, sin embargo, cuenta con la aprobación de la Autoridad Federal de Ferrocarriles de Alemania (EBA por sus siglas en alemán) y de la propia DB Netz que en su momento fue la empresa que la adquirió. Sus especificaciones sólo son brindadas a empresas de construcción u operación férrea establecidas como tal. Sólo se ha fabricado una en su tipo, no hay producción en serie a este momento.	(Plasser & Theurer, s/f-b)
EM100VT	A	Geometría de la capa	Defectos superficiales	Defectos superficiales	Alineamiento vertical / horizontal	Esta es denominada como una plataforma de ensayos para desarrollar y probar nuevos sistemas de medición, de modo que los ensayos y mediciones que se realicen dependen exclusivamente de lo que sea requerido por el cliente u operador. Las mediciones base las realiza mediante una medición inercial, es decir son medidas relativas, incorpora también el uso de cámaras estereoscópicas para la medición a través de puntos fijos, en su haber cuenta con 4 antenas GNSS. Además de los equipos incluidos pueden acoplarse sensores GPR, sensores LiDAR, cámaras de diversos tipos, entre otros. Actualmente, se recomienda su predecesora la EM120VT, la EM100VT sigue siendo funcional.	(Plasser & Theurer, s/f-a)
EM120VT	A	Múltiples	Presencia de fisuras / grietas	Defectos superficiales	Alineamiento vertical / horizontal	Es la versión mejorada de la EM100VT Revisar hoja P&T EM120VT para consultar las capacidades de esta máquina	(Plasser & Theurer, s/f-a)
EM160	B	Defectos superficiales	Defectos internos		Alineamiento vertical / horizontal	V = 160 km/h No cámaras estereoscópicas, sí aporta cámara estándar 2D hacia los rieles. GNSS Sensores inerciales Línea de curva individual c/riel No video	(Plasser & Theurer, s/f-g)
EM100U	B	Defectos superficiales	Defectos internos		Alineamiento vertical / horizontal	V = 100 km/h No cámaras estereoscópicas, sí aporta cámara estándar 2D hacia los rieles. GNSS Sensores inerciales Línea de curva individual c/riel No video	(Plasser & Theurer, s/f-f)
EM80H	B	Defectos superficiales	Defectos superficiales		Alineamiento vertical / horizontal	V = 80 km/h No cámaras estereoscópicas. GNSS Sensores inerciales Línea de curva individual c/riel No video	(Plasser & Theurer, s/f-e)
EM30	B	Defectos superficiales	Defectos superficiales		Alineamiento vertical / horizontal	V = 30 km/h No cámaras estereoscópicas. Sensores inerciales Línea de curva individual c/riel No video	(Plasser & Theurer, s/f-d)

Denominación	Cat 4. Elementos Evaluados	Subcat. 4.1 Actividades Balasto	Subcat. 4.2 Actividades Traviesas	Subcat. 4.3 Actividades Rieles	Subcat. 4.4 Actividades Línea/Vía	Comentarios	Referencias
MX90	A	Geometría de la capa	Defectos superficiales	Defectos superficiales	Alineamiento vertical / horizontal	El "sensor" MX90, es la mejor configuración de la serie de sistemas de mapeo móvil de Trimble, este sistema ha sido utilizado por DB Netz sobre una P&T EM120. Este equipo no puede ser operado sobre una plataforma manual, requiere de ser instalado sobre una locomotora o auto de ensayos con sistema de ruedas férreas. Sus capacidades vienen dadas en función de los sensores que incorpora, siendo sus resultados del área geométrica, la gran diferencia de este sistema es el nivel de precisión que logra alcanzar, según Trimble se puede alcanzar una precisión con los sensores láser de hasta 3 mm.	(Trimble Inc., 2024a, 2024e, 2024d)
M Series	A	Geometría de la capa	Defectos superficiales	Múltiples	Alineamiento vertical / horizontal	No hay mucha información disponible sobre las capacidades de las máquinas de la serie M, se sabe que según su numeración pueden tener menos o más capacidades instaladas.Pueden contar con sensores de contacto y/o sin contacto, respectivamente sensores ópticos láser y cámaras, así como ruedas neumáticas que simulan el paso de una rueda real.La M10 alcanza velocidades de medición de hasta 80 km/h, la M1200 de hasta 120 km/h, esta última puede incorporar sensores ultrasónicos que permiten diagnosticar defectos internos.Las máquinas registran la ubicación de los defectos de los rieles con el uso de pintura sobre estos, así como en los datos recopilados.	(MATISA MATÉRIEL INDUSTRIEL S.A., s/f, 2015, 2019)
GRP System FX	D	Alineamiento vertical / horizontal				Amberg Technologies ha desarrollado la plataforma GRP System FX, un equipo modular al cual se le pueden adaptar un amplia diversa gama de sensores y equipos de otros proveedores o propios, Amberg Technologies ofrece mediante sus programas computacionales la integración y procesamiento de los datos recopilados para el análisis y toma de decisiones por parte del operador férreo. A la plataforma GRP System FX se le pueden acoplar sensores inerciales, estaciones totales, antenas GNSS, sensor de inclinación, odómetro y otros. La configuración del equipo depende de las necesidades del operador férreo, el odómetro, s. de inclinación y medidor de ancho de vía son parte estándar en la plataforma, los demás sensores pueden ser alternados o combinados mediante dos plataformas, siendo en este caso la GRP System FX II. Sus resultados principalmente son geométricos, no es posible obtener datos respecto del estado interno de los elementos, no hay constancia de facilidades para acoplar sensores GPR o ultrasónicos	(Amberg Technologies, 2021, 2024b, 2024c, 2024d, 2024a)
GEDO CE 2.0	B	Geometría de la capa		Defectos superficiales	Alineamiento vertical / horizontal	La plataforma GEDO CE 2.0 es la versión mejorada del sistema, a esta se puede acoplar una diversa gama de sensores, tales como reflectores para medición en campo, sensores GNSS inerciales, sensores laser, estaciones totales y demás, estos en diversas configuraciones según el nivel de detalle deseado, ofrece mediciones principalmente geométricas como lo son el ancho de vía, inclinación, defectos superficiales en rieles, mapeo 3D del entorno y la vía y el aspecto más relevante puede ser la determinación del alineamiento de la vía tanto a nivel vertical como horizontal, el fabricante ofrece sus integraciones de software también para la interpretación y análisis de los datos.	(Trimble Inc., 2024c, 2024b, 2024f, 2024g, 2024h, 2024i)
SRE	D			Múltiples		SRE son las siglas para SoniQ Rail Explorer. Este equipo es un equipo portátil y de operación manual, el equipo es de uso específico para evaluar los defectos internos que pueda tener el riel, analiza y graba en video la geometría superficial del riel, sin embargo, gracias a sus nueve sensores ultrasónicos orientados en diferentes ángulos le es posible establecer y crear una imagen volumétrica altamente precisa del riel, al igual que las máquinas de Vossloh los datos pueden ser cargados en la nube y ahí llevar un registro histórico de la evolución de los rieles. El equipo cuenta, además de los sensores ultrasónicos, con cámaras de video integradas, sensores GNSS y conexión a redes inalámbricas para la transmisión de datos. Los datos y evaluación pueden ser visualizados por pantalla en tiempo real, esto le permite al técnico experto identificar el estado del riel de forma inmediata, y en caso necesario ajustar el equipo para generar datos más detallados de una zona específica.	(Vossloh AG, 2024c, 2024e)

Denominación	Cat 4. Elementos Evaluados	Subcat. 4.1 Actividades Balasto	Subcat. 4.2 Actividades Traviesas	Subcat. 4.3 Actividades Rieles	Subcat. 4.4 Actividades Línea/Vía	Comentarios	Referencias
HSG-city	D			Múltiples		HSG son las siglas para High Speed Grinding. Este equipo no sólo cuenta con la capacidad de evaluar y contrastar en tiempo real la geometría de la cabeza del riel, sino que también puede en simultáneo reperfilar mediante esmerilado las secciones del riel que lo requieran para satisfacer los límites respectivos. La HSG-city es una versión remolcable de tamaño reducido pensada para su uso en metros, trenes ligeros y afines que circulen por ciudades. Su funcionamiento se basa en el uso de tecnología láser, los sensores se ubican al frente y en la parte posterior de la máquina; los primeros determinan el estado de la vía, los segundos se encargan de verificar la condición después del reperfilado, las esmeriladoras se ubican y ajustan al centro de la máquina. EL equipo no verifica condiciones internas del riel u otros elementos. El procesamiento y registro de datos se ejecuta de forma simultánea en la nube y en local, según el deseo del cliente los datos de condición actual de la vía pueden ser almacenados históricamente para determinar patrones de desgaste de la vía. Los sensores de la máquina son sensores laser, GNSS y conexión 4G.	(Vossloh AG, 2024d, 2024b)
HSG-2	D			Múltiples		HSG son las siglas para High Speed Grinding.Este equipo es de mayores dimensiones respecto de la HSG-city y cuenta con mayor autonomía y capacidades de medición, estas relativas a elementos circundantes a la vía, no propiamente elementos de la superestructura.El valor agregado de la HSG-2 respecto de la HSG-city es la incorporación de un set de 3 conjuntos de esmeriladoras que operan en serie, permitiendo realizar las correcciones al riel en menor tiempo mientras se mantiene una velocidad de hasta 60 km/h.Esta máquina requiere del uso de una locomotora externa, ya que no es autopropulsada.	(Vossloh AG, 2024a, 2024d)

Anexos

Anexo A.
EN 13230-1:2016. Anexo F (Informativo)

Anexo F (Informativo)

Control de calidad durante la fabricación. Ensayos de rutina y frecuencia de los ensayos

F.1 Generalidades

Este anexo proporciona directrices para la organización de los ensayos de rutina y propuestas para la frecuencia de los ensayos.

Este anexo es de aplicación para la producción en serie de las traviesas.

En caso de cantidades más pequeñas, se puede modificar la frecuencia de los ensayos.

F.2 Datos de las traviesas a verificar

Las tablas F.1, F.2 y F.3 definen los datos más importantes de las traviesas de hormigón que se deben verificar en los ensayos de rutina.

Tabla F.1 – Materias primas

Material	Descripción	Norma de referencia
Cemento	Certificados del proveedor del cemento	EN 197-1
Áridos	Análisis petrográficos	EN 12620
Acero	Certificados del proveedor del acero	EN 10080/FprEN 10138 (todas las partes)
Componentes del sistema de sujeción	Certificados de los proveedores de los componentes	

Tabla F.2 – Proceso de fabricación

Material	Descripción	Norma de referencia
Hormigón	Resistencia a la compresión a los 7 y a los 28 días Relación agua/cemento Resistencia a la compresión en la transferencia del pretensado	EN 206
Acero	Posición del acero con respecto a la posición nominal	
Curado	Ciclo de curado acelerado y temperatura máxima	Registro de la curva en comparación con la curva de diseño de curado
Fuerza de pretensado	Fuerza de pretensado aplicada (directa o indirecta, de acuerdo con el proceso de fabricación)	

Tabla F.3 – Producto acabado

Material	Descripción	Norma de referencia
Traviesa	Ensayo de rutina de carga estática en el asiento de carril	EN 13230-2:2016, EN 13230-3:2016, EN 13230-4:2016
Acabado de la superficie y aspecto general	Inspección visual de la traviesa	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
Sistema de sujeción	Ensayos de rutina relacionados con el sistema de sujeción	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
b_1, b_2	Anchura de la parte superior e inferior del elemento de hormigón	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
hr	Profundidad en cualquier punto a lo largo de la longitud total del elemento de hormigón armado, medido según el plan de calidad	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
hp	Profundidad en cualquier punto a lo largo de la longitud total del elemento de hormigón pretensado, medido según el plan de calidad	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
L_1	Distancia entre los puntos de referencia de la sujeción del carril	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
L	Longitud total de la traviesa o soporte	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
i	Inclinación del asiento de carril (véase el anexo D)	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
f	Planitud de cada área de asiento del carril con respecto a dos puntos separados 150 mm (solamente traviesas monobloque y bibloque)	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
T	Torsión relativa entre asientos de carril (sólo soportes monobloque, bibloque y elementos de hormigón) (véase el anexo D)	Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
Masa		Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador
Desviación vertical de la traviesa		Parte del plan de calidad del fabricante, que tiene que ser aprobado por el comprador

F.3 Ejemplos de la frecuencia de los ensayos

La frecuencia de los ensayos en las materias primas y en el proceso de fabricación y los productos durante la fabricación es una elección del fabricante, con el acuerdo del comprador.

Para la inspección de los productos acabados se pueden utilizar varios métodos, tales como el muestreo, etc.

En Europa hay un acuerdo general para la producción en serie. Una inspección geométrica de los elementos principales del 1,5% de los productos acabados da una idea clara de la calidad del producto. El rango se puede ajustar entre el 1% y el 2%.

La frecuencia de los ensayos de rutina de carga en el asiento del carril está ligada al proceso de fabricación.

Anexo B.
EN 17397-1:2021. Anexos A y B (Informativos)

Anexo A (Informativo)

Descripción de los defectos del carril

A.1 Definición y descripción de los defectos del carril

En la tabla A.1 se muestra el sistema general de codificación de los defectos del carril, y la clasificación de los diferentes tipos de defectos.

Los códigos de la tabla A.1 se aplican únicamente al carril de Vignole.

Tabla A.1 – Sistema de codificación de defectos del carril

<table>
<tr><th>1er dígito</th><th>2° dígito</th><th>3er dígito</th><th>4° dígito</th></tr>
<tr><td>Estado</td><td>Ubicación</td><td>Modelo, naturaleza</td><td rowspan="3">Características y diferencias adicionales</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1. Extremos del carril
2. Carriles lisos</td><td>0. Tramo completo
1. Cabeza del carril
3. Alma
5. Patín</td><td>0. Origen desconocido
1. Transversal
2. Horizontal
3. Vertical longitudinal
4. Corrosión
5. Pasa a través de un orificio
6. No pasa a través de un orificio
9. Abrasión</td></tr>
<tr><td>2. Superficie de la cabeza del carril</td><td>0. Desgaste
1. Defectos en la superficie de rodadura
2. Defectos en la esquina del ancho
3. Aplastamiento
4. Golpes localizados
5. Quemaduras de las ruedas
7. Fisuras y hundimiento local de la superficie de rodadura
8. Gotas de agua</td></tr>
<tr><td>Estado</td><td>Localización</td><td>Origen, causa</td><td>(Sin el 4° dígito)</td></tr>
<tr><td>3. Defectos causados por daños en el carril</td><td>0. Tramo completo</td><td>1. Magulladuras
2. Mecanizado defectuoso
3. Deformación permanente</td><td></td></tr>
<tr><td>Estado</td><td>Método de soldadura</td><td>Modelo, naturaleza</td><td rowspan="2">Características adicionales y diferenciaciones</td></tr>
<tr><td>4. Soldadura y renovación Defectos</td><td>1. Soldadura a tope por chispas
2. Soldadura alúmino-térmica
3. Soldadura por arco eléctrico
4. Soldadura por oxiacetileno (autógeno)
5. Soldadura por gas a presión
6. Soldadura por inducción
7. Revestimiento
8. Otros métodos de soldadura</td><td>1. Transversal
2. Horizontal o shelling (exfoliaciones)
5. Quemaduras de las ruedas
7. Fisuras y hundimiento local de la superficie de rodadura</td></tr>
</table>

Numeración de los defectos del carril.

A cada defecto del carril se le asigna un número que se muestra en la tabla A.2.

Tabla A.2 – Numeración de los defectos del carril

1	**Defectos en los extremos del carril**			
	11/12	Cabeza		
		111	Fisuras transversales	
		112	Fisuras horizontales	
		113	Fisuras verticales longitudinales	
		114	Corrosión	
		121	Defectos en la superficie	
			1211	*Spalling* (desconchado)
			1212	Rodada larga
			1213	Abrasión por rodadura
		122	*Shelling* (exfoliaciones) de la superficie de rodadura	
			1221	*Flaking* (escamada)
			1222	*Shelling*
			1223	*Head checking* (agrietamiento superficial)
		123	Aplastamiento	
		124	Golpes localizados en la superficie de rodadura	
		125	Quemadura de rueda aislada	
		127	*Squat* (hundimiento), fisuras y depresión local de la superficie de rodadura	
	13	Alma		
		132	Fisuras horizontales	
			1321	en el radio del filete de la cabeza y alma
			1322	en el radio del filete de la cabeza y alma
		133	Fisuras verticales longitudinales (tuberías)	
		134	Corrosión	
		135	Fisuras en los orificios de los bulones de vía	
		139	Abrasión	
	15	Patín		
		153	Fisuras verticales longitudinales	
		154	Corrosión	
2	**Defectos en los carriles lisos**			
	20	Tramo completo		
		200	Fisuras transversales sin origen identificado	
	21/22	Cabeza		
		211	Fisuras transversales	

		212	Fisuras horizontales	
		213	Fisuras verticales longitudinales	
		214	Corrosión	
		220	Desgaste	
			2201	Corrugación de paso corto
			2202	Corrugación de onda corta y onda larga
			2203	Desgaste lateral excesivo
			2204	Desgaste vertical excesivo
		221	Defectos en la superficie de rodadura	
			2211	*Spalling*
			2212	Rodada larga
			2213	Abrasión por rodadura
		222	Defectos en la esquina del ancho	
			2221	*Flaking*
			2222	*Shelling*
			2223	*Head checking* (agrietamiento superficial)
		223	Aplastamiento	
		224	Golpes localizados en la superficie de rodadura	
		225	Quemadura de las ruedas	
			2251	Quemaduras de rueda aisladas
			2252	Múltiples quemaduras de ruedas
		227	*Squat* (hundimiento), fisuras y depresión local de la superficie de rodadura	
		228	Depresión local de la superficie de rodadura causada por el goteo de agua en túneles	
	23	Alma		
		232	Fisuras horizontales	
			2321	en el radio del filete de la cabeza y alma
			2322	en el radio del filete de la cabeza y alma
		233	Fisuras verticales longitudinales (tuberías)	
		234	Corrosión	
		235	Fisuras alrededor de orificios que no son bulones de vía	
		236	Fisuras diagonales	
		239	Abrasión	
	25	Patín		
		251	Fractura transversal del carril mecanizado	
		253	Fisuras verticales longitudinales	
		254	Corrosión	

3	**Defectos causados por daños en el carril**		
	30	Tramo completo	
		301	Magulladuras
		302	Mecanizado defectuoso
		303	Deformación permanente
4	**Defectos de soldadura y revestimiento**		
	41	Soldadura a tope por chispas	
		411	Fisuras transversales del perfil
		412	Fisuras horizontales del alma
		417	*Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura
	42	Soldadura alúmino-térmica	
		421	Fisuras transversales del perfil
		422	Fisuras horizontales del alma
		427	*Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura
	43	Soldadura por arco eléctrico	
		431	Fisuras transversales del perfil
		432	Fisuras horizontales del alma
		437	*Squat*, fisuras y depresión local en la superficie de rodadura
	47	Revestimiento	
		471	Fisuras transversales en la cabeza del carril
		472	Separación o *shelling* de la porción repavimentada
	48	Otros métodos de soldadura	
		481	Fisuras transversales en el carril desde la conexión eléctrica

A.2 Caracterización de los defectos del carril

A.2.1 Fisuras transversales

A.2.1.1 Generalidades

Tabla A.3 – Fisuras transversales

Tipo de defecto
Fisuras transversales
Números de código y nombres
111 Fisuras transversales 211 Fisuras transversales 411 Fisuras transversales en soldaduras a tope por chispas 421 Fisuras transversales en soldaduras alúmino-termicas 431 Fisuras transversales en soldaduras de arco eléctrico

A.2.1.2 Apariencia, causas y ubicación - Fisuras transversales

Tabla A.4 – Fisuras transversales

Fisuras transversales (111 / 211)
Las fisuras transversales se inician en el centro de la cabeza del carril o en la esquina del ancho. Son un defecto de fabricación causado por inclusiones internas o microfisuras de hidrógeno. Las cargas de impacto son factores de desarrollo de las fisuras. Cuando se produce una rotura del carril antes de que el defecto se haga visible, se puede observar un parche en forma de riñón suave y brillante. Cuando la fisura llega a la superficie de la cabeza del carril, la superficie de la fisura se comienza a oxidar. En esta etapa la ruptura del carril es inminente. No se tiene que confundir con fisuras transversales en la superficie de la cabeza del carril, por ejemplo, *head checks* (grietas superficiales) o *shelling*, con fisuras transversales bajo el revestimiento (471), ni con fisuras transversales en las soldaduras (411).

Figura A.1 – 211 – Origen central

Figura A.2 – 211 – Origen en la esquina del ancho

Tabla A.5 – Fisuras transversales en las soldaduras

Fisuras transversales en las soldaduras (411 / 421 / 431)
Las fisuras transversales en las soldaduras se inician en las soldaduras a tope por chispas, en las soldaduras aluminotérmicas y en las soldaduras de arco eléctrico. Es un defecto de fabricación causado por el diseño y proceso de soldadura, o por inclusiones internas. No se tiene que confundir con un arco repentino cerca de la soldadura, por ejemplo, magulladuras (301).

Figura A.3 – 411 – Defecto interno de la cabeza en la soldadura

Figura A.4 – 421 – Defecto interno del patín en la soldadura

Figura A.5 – 421 – Fisura situada en gran parte en el plano vertical

Figura A.6 – 421 – Fisura de la grieta en el plano vertical de la soldadura

Figura A.7 – 431 – Fisuras transversales del perfil en la soldadura de la junta del arco eléctrico

A.2.2 Fisuras horizontales

A.2.2.1 Generalidades

Tabla A.6 – Fisuras horizontales

Tipo de defecto
Fisuras horizontales
Números de código y nombres
112 Fisuras horizontales en la cabeza en el extremo del carril
132 Agrietamiento horizontal en el alma en el extremo del carril
1321 Fisuras horizontales en el radio del filete de la cabeza-alma en el extremo del carril
1322 Fisuras horizontales en el radio del filete alma-patín en el extremo del carril
212 Fisuras horizontales en la cabeza del carril liso
232 Fisuras horizontales en el alma del carril liso
2321 Fisuras horizontales en el radio del filete cabeza-alma en el carril liso
2322 Fisuras horizontales en el radio del filete alma-patín en carril liso
412 Fisuras horizontales en el alma en la soldadura a tope por chispas
422 Fisuras horizontales en el alma en la soldadura alúmino-térmica
432 Fisuras horizontales en el alma en soldadura de arco eléctrico

A.2.2.2 Apariencia, causas y ubicación

A.2.2.2.1 Fisuras horizontales en la cabeza

Tabla A.7 – Fisuras horizontales en la cabeza

Fisuras horizontales en la cabeza (112 / 212)
Las fisuras horizontales en la cabeza se inician en la cabeza y progresan paralelas a la superficie de rodadura.
El desarrollo se acelera por las cargas de impacto en las juntas en condiciones deficientes.
Puede dar lugar a la depresión local en la superficie de rodadura, que se puede caracterizar con un parche oscuro contrastando con la superficie brillante de la banda de rodadura.
Aparece una pequeña fisura en una o ambas caras de la cabeza, y en la cara del extremo en la separación de la junta de expansión.
Puede ir acompañada de una fisura vertical, o avanzar hacia una fisura transversal. En una etapa posterior, se puede romper un trozo de metal.
No se tiene que confundir con fisuras verticales longitudinales o con *shelling* (2222) de la superficie de rodadura.

Figura A.8 – 212 – Fisuras horizontales en la cabeza de los carriles lisos

Figura A.9 – 212 – Fisuras horizontales en la cabeza de los carriles lisos con una expansión de fisuras transversales

Figura A.10 – 212 – Fisuras horizontales en la cabeza de los carriles lisos

A.2.2.2.2 Fisuras horizontales en el alma

Tabla A.8 – Fisuras horizontales en el alma

Fisuras horizontales en el alma (132 / 1321 / 1322 / 232 / 2321 / 2322)
Las fisuras horizontales en el alma comienzan en cualquier posición del alma. Si se inician en un carril liso, son un defecto de fabricación. El inicio en el extremo del carril se debe a esfuerzos entre la brida y el carril producidas por el movimiento vertical de la junta al pasar los trenes, provocadas por una geometría deficiente de la vía, de la calidad de la junta o por un chapado incorrecto de la brida, separando la cabeza o el patín del alma. Progresa en paralelo a la superficie de rodadura, y se puede curvar hacia arriba o hacia abajo haciendo que la cabeza o el patín se desprendan, o se fragmente el carril. No se tiene que confundir con fisuras de orificios (135, 235) en los casos en que se desarrolla a través de un orificio.

Figura A.11 – 1321 – Fisuras horizontales en el filete de la cabeza y alma

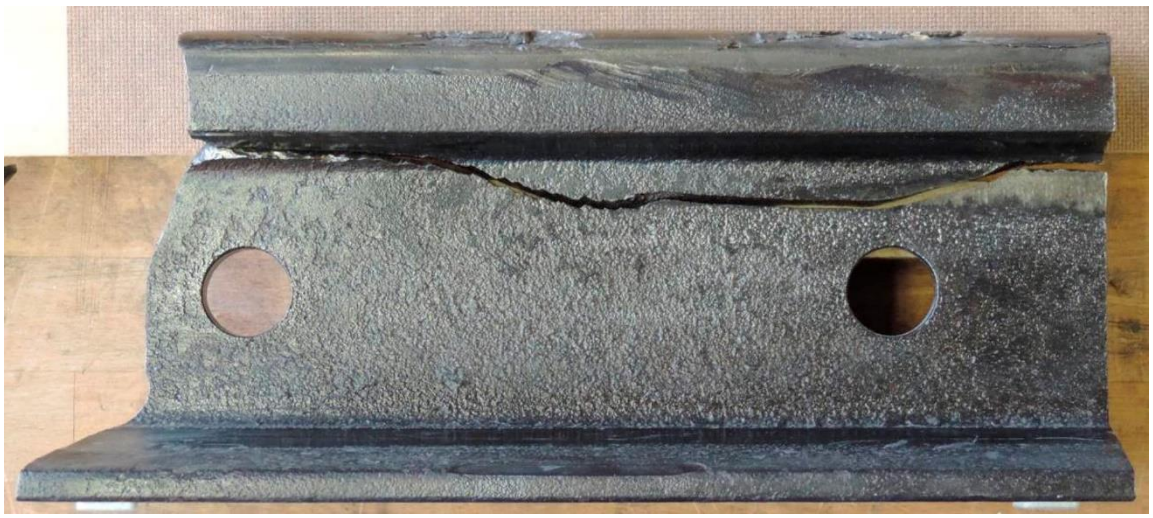


Figura A.12 – 1321 – Fisuras horizontales en el ama – filete de la cabeza

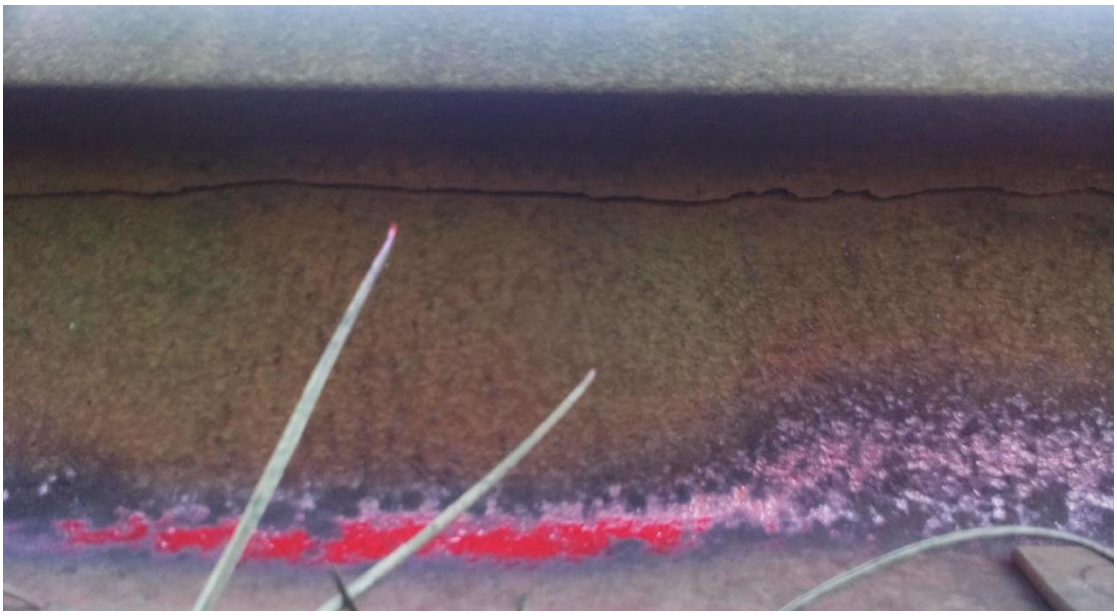


Figura A.13 – 2321 – Fisuras horizontales en el radio del filete de la cabeza y alma

A.2.2.2.3 Fisuras horizontales del alma en las soldaduras

Tabla A.9 – Fisuras horizontales del alma en soldaduras

Fisuras horizontales del alma en las soldaduras (412 / 422 / 432)
Las fisuras horizontales del ama en las soldaduras, se inician en cualquier posición del alma en las soldaduras. Son un defecto de fabricación provocado por el diseño y proceso de soldadura, o por inclusiones internas. Pueden estar influidas por orificios demasiado cerca de la soldadura. Progresan en paralelo a la superficie de rodadura, y se pueden curvar hacia arriba y/o hacia abajo haciendo que la cabeza o el patín se rompan, o que el carril se fragmente.

Figura A.14 – 422 – Fisuras horizontales del alma en una soldadura alúmino-térmica

Figura A.15 – 422 – Fisuras horizontales de la banda en una soldadura alúmino-térmica

Figura A.16 – 422 – Fisuras horizontales del alma en una soldadura alúmino-térmica

A.2.3 Fisuras verticales longitudinales

A.2.3.1 Fisuras verticales longitudinales de la cabeza

Tabla A.10 – Fisuras longitudinales de la cabeza

Tipo de defecto
Fisuras verticales longitudinales de la cabeza
Números de código y nombres
113 Fisuras verticales longitudinales de la cabeza en los extremos del carril 213 Fisuras verticales longitudinales de la cabeza en los carriles lisos
Apariencia, causas y ubicación
Fisuras verticales longitudinales de la cabeza (113 / 213)
Las fisuras verticales longitudinales de la cabeza se inician en varias ubicaciones a lo largo del carril, y se pueden propagar por una soldadura. Se trata de un defecto de fabricación, causado por inclusiones rodadas en el carril, principalmente por el proceso de fundición de lingotes. Progresan en paralelo a la red ferroviaria, y tienden a dividir gradualmente la cabeza del carril en dos partes. A medida que avanzan, se pueden ver en diferentes lugares: como una línea negra en la superficie cuando llega a la superficie de rodadura, una depresión de la superficie de rodadura y un ensanchamiento de la cabeza del carril correspondiente a la apertura de la fisura, o como una línea brillante o una fisura en el radio del filete de la cabeza y alma, a ambos lados del alma. No se tienen que confundir con la abrasión por rodadura (1213, 2213).

Figura A.17 – 213 – Fisura vertical longitudinal visible a lo largo de la superficie superior del carril a)

Figura A.18 – 213 – Fisura vertical longitudinal visible a lo largo de la superficie superior del carril b)

Figura A.19 – 213 – Fisura vertical longitudinal de la cabeza

A.2.3.2 Fisura vertical longitudinal del alma

Tabla A.11 – Fisuras verticales longitudinales en el alma

Fisuras verticales longitudinales en el alma (133 / 233)
Las fisuras verticales longitudinales son un defecto de fabricación causado por inclusiones rodadas en el carril realizadas principalmente por el proceso de fundición de lingotes. Se inician en varias ubicaciones a lo largo del carril, y se puede propagar a través de una soldadura. Tiende a dividir gradualmente el alma del carril en dos partes, siguiendo un plano paralelo al alma del carril. Se caracterizan por una discontinuidad vertical a lo largo de la longitud del alma del carril. Las fisuras verticales longitudinales que alcanzan la cabeza del carril se pueden romper en el radio del filete superior. En casos excepcionales, se puede observar un abultamiento en ambas caras del alma, con una ligera depresión de la superficie de rodadura en los ángulos rectos con el defecto.

Figura A.20 – 233 – Fisuras verticales longitudinales en el alma

A.2.3.3 Fisuras verticales longitudinales del patín

Tabla A.12 – Fisuras verticales longitudinales en el patín

Fisuras verticales longitudinales en el patín (153 / 253)
Las fisuras verticales longitudinales en el patín se inician alrededor de la parte media inferior del patín. Se causan por la fabricación y suceden durante el rodamiento en carriles de lingotes fundidos. Progresan por la carga de tráfico. Son difíciles de detectar y generalmente son oblicuas, particularmente en el alma, y parten el carril súbitamente. Se pueden desarrollar en varias partes del mismo carril, y dan lugar a la formación de una brecha extensa producida por múltiples roturas, adquiriendo la forma de una epidemia en los carriles de la misma fundición.

Figura A.21 – 253 – Fisuras verticales longitudinales del patín

A.2.4 *Squat* (hundimiento)

Tabla A.13 – *Squat*

Tipo de defecto
Squat
Números de código y nombres
127 *Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura en el extremo del carril 227 *Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura en el carril liso 228 Depresión local de la superficie de rodadura causada por el goteo de agua 417 *Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura en la soldadura a tope por chispas 427 *Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura, en la soldadura alúmino-térmica 437 *Squat*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura en la soldadura de arco eléctrico

Apariencia, causas y ubicación
***Squats*, fisuras y depresión local de la superficie de rodadura (127 / 227 / 228 / 417 / 427 / 437)**
Los *squats* se inician por la fatiga de contacto por rodadura con múltiples causas. Se pueden iniciar en soldaduras en la zona afectada por el calor, en juntas y en el carril liso. Están causados por el aumento local en los esfuerzos de fricción y/o la resistencia disminuida en la fuerza del material, por ejemplo, producido por irregularidades en la superficie. A menudo, se considera que las fuerzas altas de tracción y de rotura provocadas por los trenes, son factores influyentes. Se produce principalmente en la parte superior de la superficie de rodadura y, a menudo, en las zonas corrugadas. La carga de impacto en las juntas del carril puede ser un factor. También se pueden causar por el goteo constante del agua en la superficie de rodadura (por ejemplo, túneles y estructuras). Progresan dentro de la cabeza al principio, en un ángulo poco profundo a la superficie. Tras alcanzar una profundidad de 3 a 5 mm, el ángulo de propagación cambia de una dirección horizontal a una vertical. Son visibles en la superficie de rodadura de la cabeza del carril, como un ensanchamiento y una depresión local de la banda de contacto del carril/rueda. Cuando se propagan, va acompañados de un punto oscuro y puede contener grietas con forma de arco circular o V.

Figura A.22 – 227 – *Squat* y depresión local en la superficie de rodadura en carriles lisos

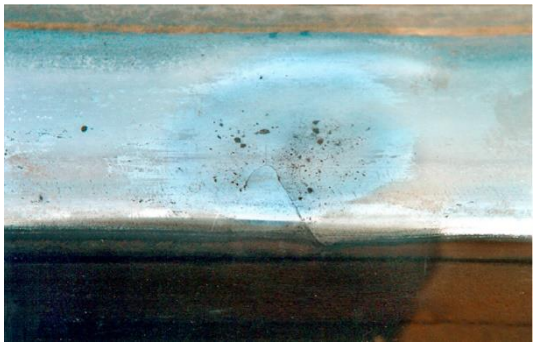


Figura A.23 – 227 – *Squat*

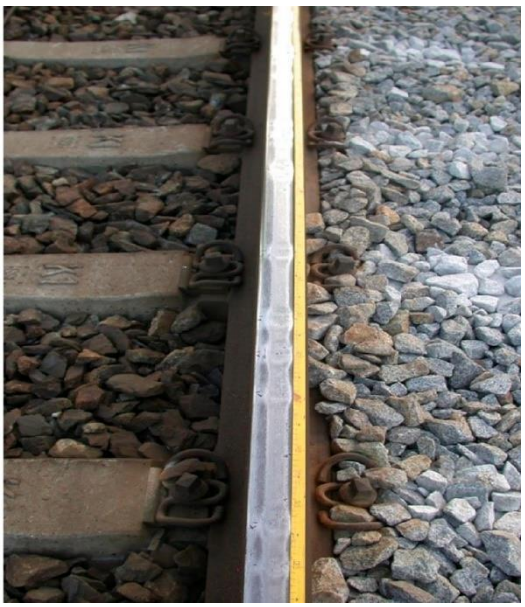


Figura A.24 – 227 – Varios *squats*

Figura A.25 – 227 – Fractura del carril producida por un *squat*

Figura A.26 – 417 – Fisuras y depresión local de la superficie de rodadura en soldaduras a tope por chispas

Figura A.27 – 427 – Fisuras y depresión local de la superficie de rodadura en soldaduras alúmino-térmicas

Figura A.28 – 228 – Depresión local de la superficie de rodadura causada por el goteo de agua

A.2.5 *Head checks* (grietas superficiales de la cabeza del carril)

Tabla A.14 – *Head checks*

Tipo de defecto
Head checks
Números de código y nombres
1223 *Head checks* en el extremo del carril 2223 *Head checks* en el carril liso
Apariencia, causas y ubicación
***Head checks* (1223 / 2223)**
Las *head checks* se inician por la fatiga del contacto de rodadura en la esquina del ancho del carril alto en las curvas. En la vía tangente, las *head checks* pueden ocurrir alternativamente en ambos carriles. Están causadas por esfuerzos de cizallamiento excesivos, que suceden en el punto de contacto del carril/rueda. En las vías tangentes se debe a un centrado insuficiente de los vehículos. Avanza en las etapas siguientes: 1. Aparecen fisuras en la esquina del ancho del carril; 2. Aparecen zonas oscuras a lo largo de las fisuras, lo que indica que las fisuras están progresando en el interior de la cabeza del carril; 3. De la superficie se desprenden trozos del carril pequeños; 4. Las fisuras transversales se propagan en la cabeza del carril. Se ven en la esquina del ancho de la cabeza del carril como pequeñas fisuras paralelas. La distancia entre las fisuras, varía de 1 mm a varios cm. El desarrollo de las *head checks* está influido por la calidad del acero, las características locales y las condiciones de rodadura.

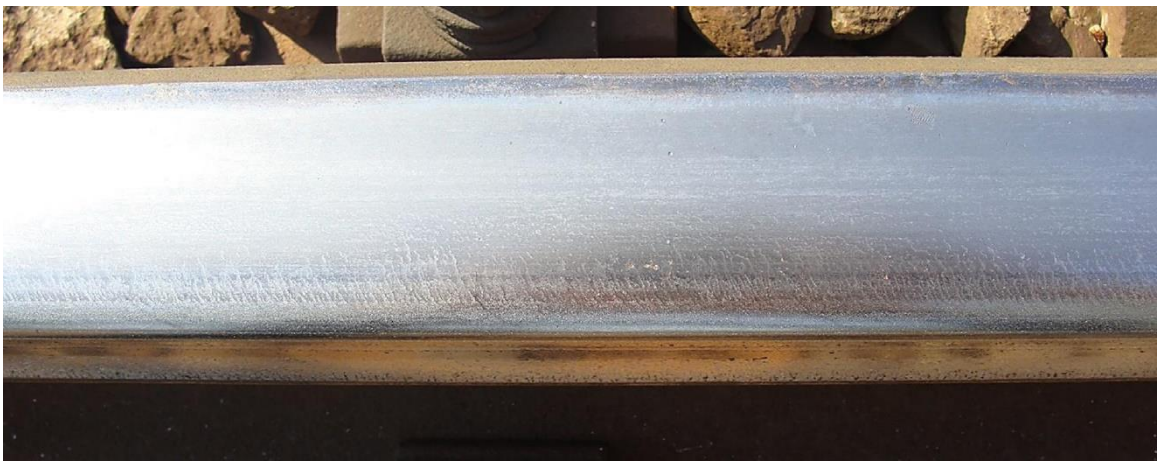


Figura A.29 – 2223 – *Head checks* en la fase 1ª

Figura A.30 – 2223 – *Head checks* en la fase 2ª

Figura A.31 – 2223 – *Head checks* en la fase 3ª

A.2.6 Otros estados de la superficie de la cabeza del carril

A.2.6.1 Generalidades

Tabla A.15 – Otros estados de la superficie de la cabeza del carril

Tipo de defecto	
Otros estados de la superficie de la cabeza del carril	
Números de código y nombres	
121	Defectos superficiales en la cabeza de los extremos del carril
1211	*Spalling* (desconchado)
1212	Rodadas largas
1213	Abrasión por rodadura
122	Defectos en la esquina del ancho
1221	*Flaking* (escamada)
1222	*Shelling* (exfoliación)
123	Aplastamiento
124	Golpes localizados en la superficie de rodadura
125	Quemaduras de las ruedas
1251	Quemadura de rueda aislada
1252	Quemadura de rueda repetida
221	Defectos de superficie en la cabeza de los carriles lisos
2211	*Spalling*
2212	Rodadas largas
2213	Abrasión por rodadura
222	Defectos en la esquina del ancho
2221	*Flaking*
2222	*Shelling*
223	Aplastamiento
224	Golpes localizados en la superficie de rodadura
225	225 Quemadura de las ruedas
2251	Quemadura de rueda aislada
2252	Quemadura de rueda repetida
301	Magulladuras
302	Mecanizado defectuoso
303	Deformación permanente
472	Separación o *shelling* de la porción repavimentada

A.2.6.2 Apariencia, causas y ubicación

A.2.6.2.1 Defectos superficiales en la cabeza de los extremos del carril

A.2.6.2.1.1 *Spalling* (desconchado)

Tabla A.16 – *Spalling* (desconchado)

Spalling (desconchado) (1211 / 2211)
El Spalling se inicia por la fatiga de contacto de rodadura, principalmente en la superficie de rodadura de los carriles bajos en curvas pronunciadas, pero puede aparecer en vías tangentes. Está provocado por esfuerzos muy altos de contacto. Progresa desde fisuras en la superficie de rodadura del carril, a una pérdida del material en la superficie del carril. Es visible y generalmente superficial, y tiende a propagarse longitudinalmente y a unirse para formar una red de fisuras. A veces se les llama piel de serpiente. No se tiene que confundir con *flaking* (escamada) (2221), *head checks* (2223), quemaduras de las ruedas (2251) ni *squats* (hundimientos) (227).

Figura A.32 – 2211 – *Spalling* a)

Figura A.33 – 2211 – *Spalling* b)

A.2.6.2.1.2 Rodada larga

Tabla A.17 —Rodada larga

Rodada larga (1212 / 2212)
La rodada larga se inicia en la superficie, con fisuras superficiales de rodadura en el carril.
Está causada por la fatiga del contacto de rodadura, o con la fabricación.
Progresa a una pérdida del material de anchura más o menos constante en la superficie del carril, y puede tener varios metros de longitud. La profundidad no supera unos pocos milímetros.
Es visible en la superficie de rodadura del carril.
No se tiene que confundir con fisuras verticales longitudinales (213).

Figura A.34 – 2212 – Rodada larga

A.2.6.2.1.3 Abrasión por rodadura

Tabla.18 – Abrasión por rodadura

Abrasión por rodadura (1213 / 2213)
La abrasión por rodadura es un defecto de fabricación, longitudinal que no supera los 3 mm de profundidad. Se puede ver poco después de que el carril se coloque en la vía. Generalmente tiende a desaparecer gradualmente a medida que se desgasta la superficie de rodadura.

Figura A.35 – 2213 – Abrasión por rodadura a)

Figura A.36 —2213 – Abrasión por rodadura b)

A.2.6.2.2 Defectos en la esquina del ancho

A.2.6.2.2.1 *Flaking* (escamada)

Tabla A.19 – *Flaking*

***Flaking* (1221 / 2221)**
Flaking se inicia por la fatiga de contacto de rodadura y forma escamas finas desde la esquina del ancho de la cabeza del carril.
Está provocado por un mal esmerilado o por un sistema de lubricación inadecuado.
Progresa a partir de escamas individuales a lo largo de un borde de esmerilado, que se conectan juntos creando una cavidad longitudinal. Puede progresar a fisuras transversales.
Es visible en la esquina del ancho de la cabeza del carril, generalmente en los carriles exteriores en curvas.
No se tiene que confundir con *shelling* (exfoliación) (2222), ya que *flaking* se inicia en la esquina del ancho del carril y no es tan profundo como el *shelling*.

Figura A.37 —2221 – *Flaking* a)

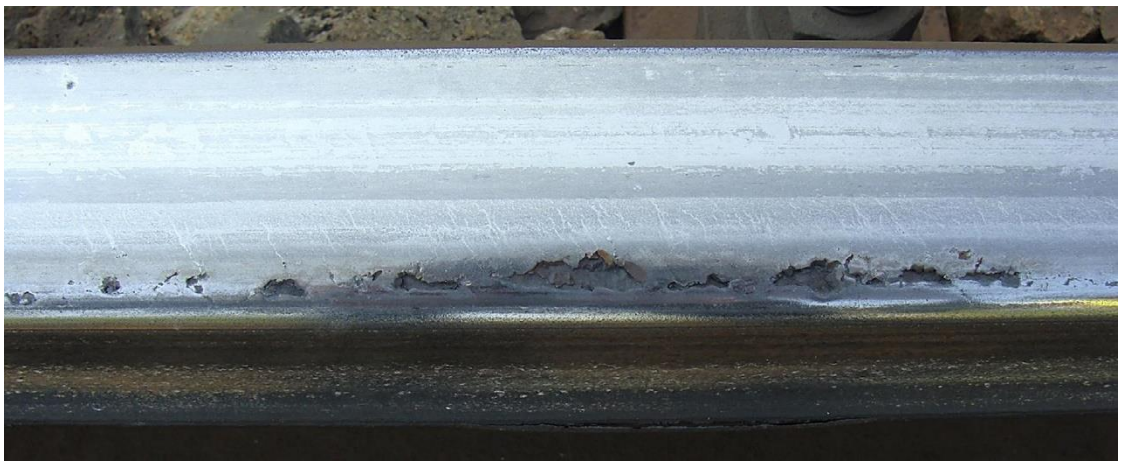


Figura A.38 —2221 – *Flaking* b)

Figura A.39 – 2221 – *Flaking* c)

A.2.6.2.2.2 *Shelling*

Tabla A.20 – *Shelling*

***Shelling* (exfoliación) (1222 / 2222)**
Shelling se inicia con irregularidades metalúrgicas en la esquina del ancho de la cabeza del carril. Avanza en las etapas siguientes: 1. Puntos oscuros largos espaciados al azar sobre la esquina del ancho de la cabeza del carril. Estas manchas son signos tempranos de degradación subyacente del metal 2. Las cargas de tráfico que causan el deslizamiento del metal forman los bordes y fisuras laterales a la cabeza del carril 3. Se produce *shelling* en la esquina del ancho 4. Las fisuras transversales se propagan en la cabeza del carril Se ve en la esquina del ancho del carril exterior en curvas. No se tiene que confundir con el *head checks* (2223), *flaking* (2221) ni *spalling* (2211).

Figura A.40 – 2222 – Ejemplo de *shelling* en la 1ª etapa

Figura A.41 – 2222 – Ejemplo de *shelling* en la 2ª etapa

Figura A.42 – 2222 – Sección transversal de *shelling*

A.2.6.2.2.3 Aplastamiento

Tabla A.21 – Aplastamiento

Aplastamiento (123 / 223)
El aplastamiento se inicia como un flujo de plástico del metal del carril bajo carga de tráfico, lo que resulta en una deformación permanente del perfil transversal de la cabeza del carril.
Está provocado por el diseño de la vía, el fallo de geometría y el cambio en la rigidez de la vía, y generalmente se puede encontrar en calidades de acero inferiores.
Puede progresar hacia una separación vertical de la cabeza del carril.
Se pueden ver en una sola ubicación o intermitentemente a lo largo de toda una curva, generalmente en el carril bajo.
No se tiene que confundir con los golpes localizados en la superficie de rodadura (124, 224) ni con el desgaste vertical excesivo (2204).

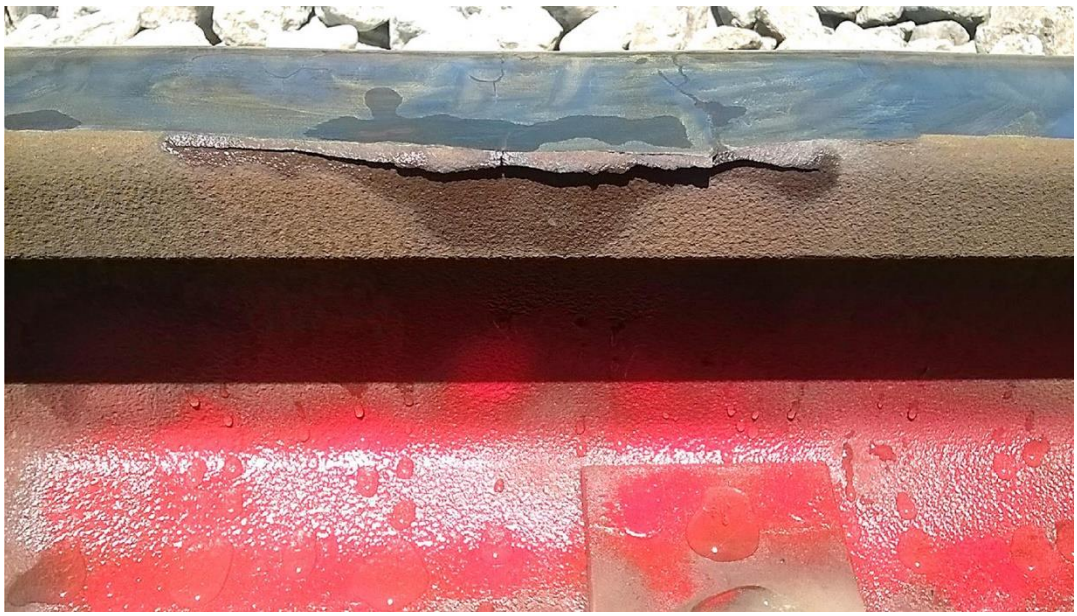


Figura A.43 – 223 – Aplastamiento a)

Figura A.44 – 223 – Aplastamiento b)

A.2.6.2.3 Golpes localizados en la superficie de rodadura

Tabla A.22 – Golpes localizados en la superficie de rodadura

Golpes localizados en la superficie de rodadura (124 / 224)
Los golpes localizados en la superficie de rodadura están causados por el impacto dinámico de las ruedas que pasan por la cabeza del carril, normalmente en las juntas. Se ven como huecos aislados, bastante cortos, que generalmente están acompañados de un ensanchamiento de la banda de rodadura. Pueden progresar hacia una pequeña porción de la superficie de rodadura que se rompe. No se tienen que confundir con fisuras horizontales (112, 212), defectos de superficie (121, 221), aplastamiento (123, 223) ni con quemaduras de ruedas (125, 225).

Figura A.45 – 124 – Golpes localizados en la superficie de rodadura

A.2.6.2.4 Quemadura de las ruedas

Tabla A.23 – Quemadura de las ruedas

Quemadura de las ruedas (125 / 225 / 2251 / 2252)
La quemadura de las ruedas está provocada por el deslizamiento de una rueda que da lugar a la formación de una capa con forma elíptica que va desapareciendo. Una quemadura de rueda aislada está causada por el deslizamiento de un eje motor cuando el tren está parado. Las múltiples quemaduras de rueda están causadas por el deslizamiento repetido de las ruedas producidas por el frenado o deslizamiento del eje motor ,mientras el vehículo está en movimiento, a menudo antes de las señales y en las estaciones. La capa con forma elíptica puede desaparecer o progresar bajo cargas de tráfico repetidas, ya sea por fisuras horizontales poco profundas, que causan la eliminación local de virutas de metal que no se desarrollan en profundidad causando la depresión de la superficie de rodadura; o fisuras transversales que causan una fisura interna que progresa hacia el alma acompañada de una depresión de la superficie de rodadura sin otras alteraciones locales. No se tiene que confundir con *spalling* (2211), *squat* (227) ni las fisuras transversales (211).

Figura A.46 – 2251 – Quemadura de ruedas aislada

Figura A.47 – 2252 – Quemaduras de rueda repetidas

A.2.6.2.5 Magulladuras

Tabla A.24 – Magulladuras

Magulladuras (301)
Las magulladuras se inician por el daño del impacto de un objeto extraño como rueda dañada, descarrilamientos, uso inadecuado de la herramienta; manejo inadecuado, huellas de balasto, incrustación de chatarra dura en las ruedas, arqueo, arrastre de partes de vehículos o material que cae de los trenes. Está provocado por las ruedas y puede ocurrir a intervalos regulares en varios carriles consecutivos del mismo trecho, a veces sobre una distancia considerable. Las magulladuras con un perfil afilado pueden tener un efecto de muesca y ser el origen de fisuras y roturas.

Figura A.48 – 301 – Magulladuras en la cabeza del carril a)

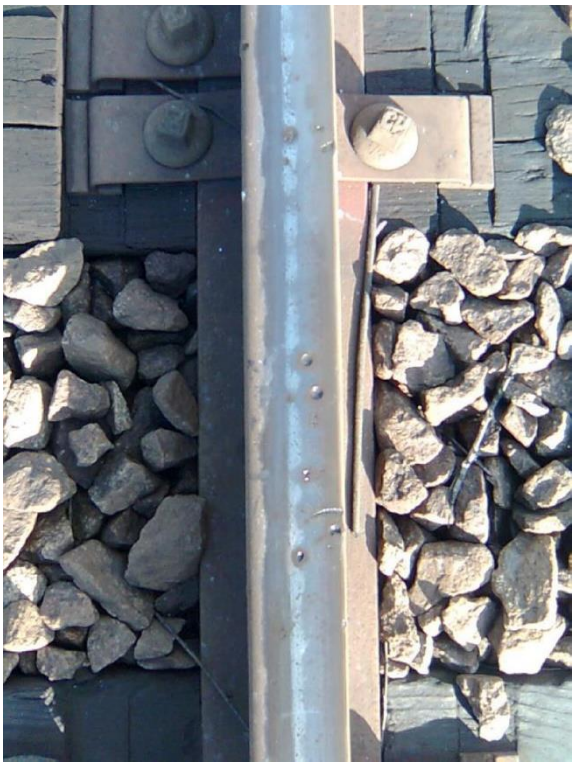


Figura A.49 – 301 – Magulladuras múltiples b)

A.2.6.2.6 Mecanizado defectuoso

Tabla A.25 – Mecanizado defectuoso

Mecanizado defectuoso (302)
El mecanizado defectuoso se debe a la aplicación incorrecta de una técnica, y puede provocar fisuras y roturas del carril, ya sea por efecto de muesca o por reducción del perfil.

Figura A.50 – 302 – Mecanizado defectuoso a)

Figura A.51 – 302 – Mecanizado defectuoso b)

A.2.6.2.7 Deformación permanente

Tabla A.26 – Deformación permanente

Deformación permanente (303)
La deformación permanente está provocada por accidentes, descarrilamientos, manejo defectuoso u otras causas externas. Se trata, generalmente, de un carril deformado u otra deformación geométrica aplicada al carril, como una viga. Puede progresar hacia otros defectos producidos por el incremento de los esfuerzos de la vía y también puede causar esfuerzos residuales en el carril.

A.2.6.2.8 Separación o *shelling* de la porción repavimentada

Tabla A.27 – Separación o *shelling* de la parte repavimentada

Separación o *shelling* de la porción repavimentada (472)
La separación o *shelling* de la porción repavimentada se inicia dentro de la soldadura o en la zona de soldadura. Está provocada por un mal control del proceso de soldadura, y puede dar lugar a una falta de fusión u otros defectos de soldadura (porosidad, inclusiones, fisuras en la contracción, fisuras en el cráter, etc.) Puede progresar hacia fisuras transversales en el metal de origen que se repara y son difíciles de detectar y evaluar con precisión mediante ensayos ultrasónicos.

Figura A.52 – 472 – Defecto de repavimentación

A.2.7 Corrosión

A.2.7.1 Generalidades

Tabla A.28 – Corrosión

Tipo de defecto
Corrosión
Números de código y nombres
114 Corrosión de la cabeza en los extremos del carril 134 Corrosión del alma en los extremos del carril 154 Corrosión del patín en los extremos del carril 214 Corrosión de la cabeza en los carriles lisos 234 Corrosión del alma en los carriles lisos 254 Corrosión del patín del carril en los carriles lisos

A.2.7.2 Apariencia, causas y ubicación

A.2.7.2.1 Corrosión de la cabeza del carril

Tabla A.29 – Corrosión de la cabeza del carril

Corrosión de la cabeza del carril (114 / 214)
La corrosión de la cabeza del carril está provocada por la oxidación del carril por falta de uso de la vía, o en un ambiente corrosivo como un túnel húmedo o cerca del mar. Puede provocar un aislamiento eléctrico entre la rueda y el carril.

Figura A.53 – 234 – Corrosión en la cabeza del carril

A.2.7.2.2 Corrosión del alma del carril

Tabla A.30 – Corrosión del alma del carril

Corrosión del alma del carril (134 / 234)
La corrosión del alma del carril está provocada por la oxidación del acero del carril en un entorno corrosivo, como un túnel, un cruce a nivel o cerca del mar. Se puede observar un deterioro acelerado en las zonas donde se utiliza corriente directa. Progresa hacia exfoliaciones en el óxido que se rompen gradualmente del alma, y disminuye el espesor del alma.

Figura A.54 – 234 – Corrosión del alma del carril

A.2.7.2.3 Corrosión del patín del carril

Tabla A.31 – Corrosión del patín del carril

Corrosión del patín del carril (154 / 254)
La corrosión del patín del carril está producida por la oxidación del acero del carril en un entorno corrosivo, como túneles, paso a nivel, balasto ensuciado o cerca del mar. Se puede observar un deterioro acelerado en las zonas donde se utiliza corriente directa. Progresa hacia una reducción del perfil, delaminación o picaduras como iniciación de fisuras transversales en el patín.

Figura A.55 – 254 – Corrosión del patín del carril

Figura A.56 – 254 – Corrosión del patín del carril - fisuras por fatiga iniciadas de un foso de corrosión

Figura A.57 – 254 – Corrosión del patín del carril: Lado corroído de las puntas del patín a)

Figura A.58 – 254 – Corrosión del patín del carril: Lado corroído de las puntas del patín b)

A.2.8 Desgaste

A.2.8.1 Generalidades

Tabla A.32 – Desgaste

Tipo de defecto
Desgaste
Números de código y nombres
220 Desgaste de la cabeza 2201 Corrugación de paso corto 2202 Corrugación de onda corta y onda larga 2203 Desgaste lateral excesivo 2204 Desgaste vertical excesivo

A.2.8.2 Apariencia, causas y ubicación

A.2.8.2.1 Corrugación de paso corto

Tabla A.33 – Corrugación de paso corto

Corrugación de paso corto (2201)
La corrugación de paso corto está provocada por mecanismos de desgaste derivados de la interacción dinámica de la vía del tren, en función de las propiedades de rigidez del sistema de vía/vehículo. Se caracteriza por una secuencia pseudo-periódica de crestas brillantes y huecos oscuros en la superficie de rodadura, generalmente varía de 10 mm a 100 mm entre las crestas. Puede ocurrir en cualquier lugar.

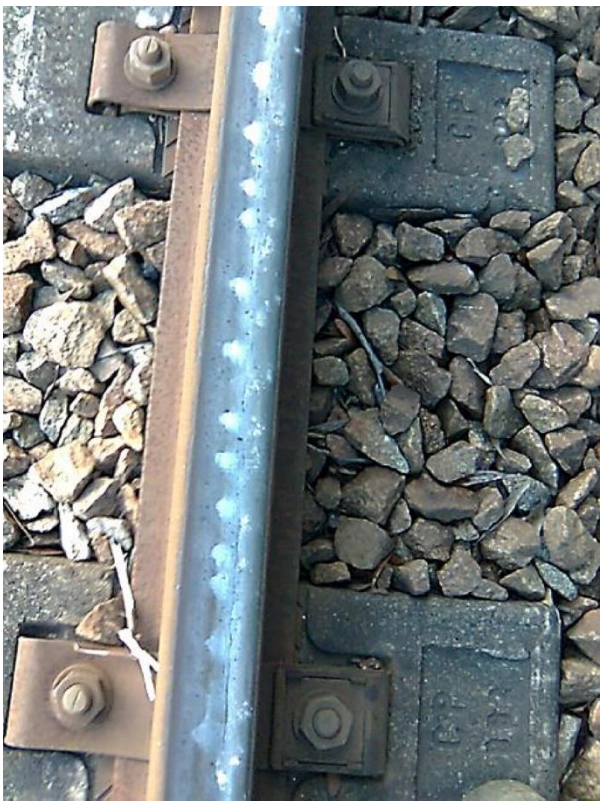


Figura A.59 – 2201 – Corrugación de paso corto

A.2.8.2.2 Corrugación de onda corta y onda larga

Tabla A.34 – Corrugación de onda corta y onda larga

Corrugación de onda corta y onda larga (2202)
La corrugación de paso largo está provocada por la carga de tráfico y el progreso depende del radio de curva, la deficiencia/exceso de peralte de la vía, la calidad del acero, las características de fricción y las características del vehículo. Se caracteriza por depresiones en la superficie de rodadura, que son más o menos pronunciadas y desiguales, si se comparan con un perfil rectilíneo ideal y generalmente entre 30 mm y 1 000 mm entre los pasos. Generalmente ocurre en el carril inferior en curvas y en la vía tangente.

Figura A.60 – 2202 – Corrugación de onda corta y onda larga

A.2.8.2.3 Desgaste lateral excesivo (desgaste lateral)

Tabla A.35 – Desgaste lateral excesivo (desgaste lateral)

Desgaste lateral excesivo (desgaste lateral) (2203)
El desgaste lateral excesivo está provocado por la fricción entre la rueda y el carril a consecuencia de las funciones del concepto (tráfico mixto).
Progresa en función del radio de curvatura, deficiencia/exceso de peralte de la vía, calidad del acero, deficiencia de lubricación y separación de las ruedas de los vehículos.
Se caracteriza por la reducción del perfil del carril en la esquina del ancho.
Constituye un defecto cuando su alcance es perjudicial para el mantenimiento de la vía (ensanchamiento excesivo del ancho), que puede provocar rotura por debilitamiento del perfil (que afecta al filete inferior de la cabeza), o deterioro de la geometría de contacto hasta tal punto que la formación de RCF aumenta significativamente.
Se encuentra principalmente en los tramos exteriores de curvas de radio pequeño, producidos por una fricción alta de la rueda/carril. El desgaste lateral desigual puede ocurrir alternativamente en ambos carriles en líneas rectas, generado por las maniobras de los vehículos.

Figura A.61 – 2203 – Desgaste lateral excesivo

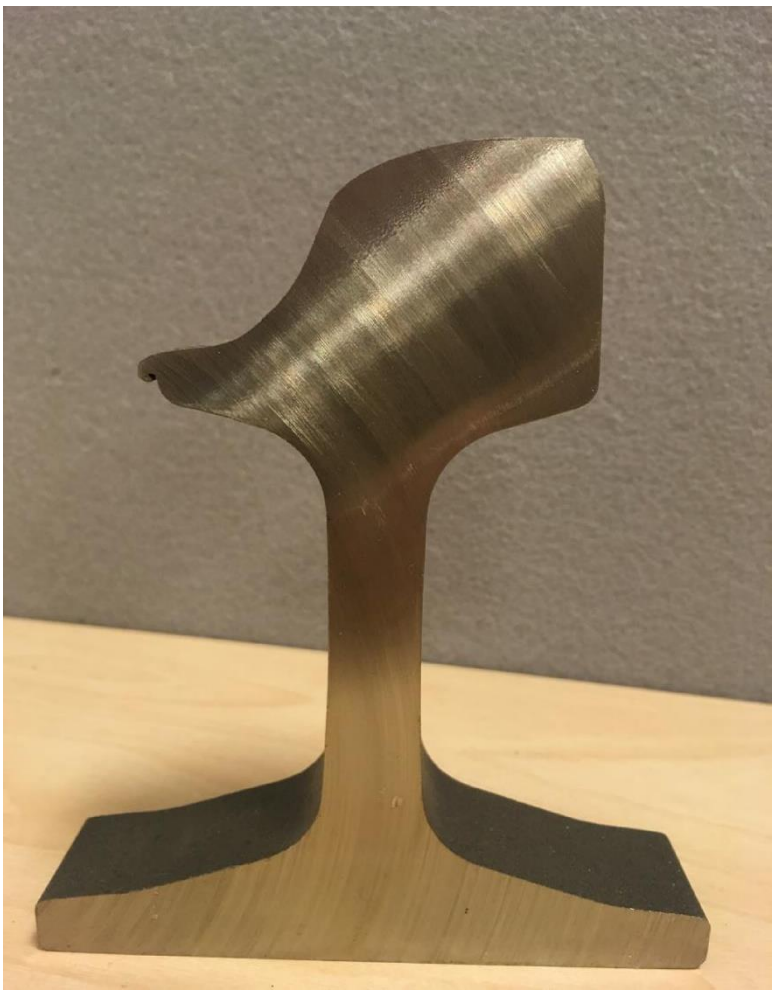


Figura A.62 – 2203 – Desgaste lateral excesivo

A.2.8.2.4 Desgaste vertical excesivo

Tabla A.36 – Desgaste vertical excesivo

Desgaste vertical excesivo (2204)
El desgaste vertical excesivo está provocado por las cargas de tráfico y la calidad inadecuada del acero en relación con el tráfico. Avanza con la carga de tráfico y el reperfilado de los trenes. Se produce en el carril inferior de curvas con un radio pequeño, a consecuencia de las funciones del concepto. No se tiene que confundir con la trituración (223).

Figura A.63 – 2204 – Desgaste vertical excesivo

A.2.9 Otros defectos del carril

A.2.9.1 Generalidades

Tabla A.37 – Otros defectos del carril

Tipo de defecto
Otros defectos del carril
Números de código y nombres
135 Fisuras de los bulones de vía en el alma 235 Fisuras alrededor de orificios en el alma diferentes a los orificios de los bulones de vía 139 Abrasión en el alma de los extremos del carril 239 Abrasión en el alma de los carriles lisos 153 Fisuras verticales longitudinales del patín en los extremos del carril 253 Fisuras verticales longitudinales del patín en los carriles lisos 200 Roturas transversales sin origen identificado 236 Fisuras diagonales en el alma 251 Fracturas transversales del carril mecanizado en el patín 471 Fisuras transversales en el área del revestimiento de la cabeza del carril 481 Fisuras transversales bajo la conexión eléctrica

A.2.9.2 Apariencia, causas y ubicación

A.2.9.2.1 Fisuras verticales longitudinales

A.2.9.2.2 Fisuras de orificios en el alma

Tabla A.38 – Fisuras de orificios en el alma

Fisuras de orificios en el alma (135 / 235)
Las fisuras de orificios en el alma se inician desde un orificio del perno. Están provocadas por la calidad de la perforación, esfuerzos dentro de la junta, extremo del carril y las fuerzas propias de la circulación. Si se genera por el corte de la llama causa endurecimiento localizado y esfuerzos, lo que también produce la propagación de fisuras. Progresa en un ángulo de unos 45° y se propaga progresivamente. No se tiene que confundir con una fisura horizontal en el extremo del carril (132).

Figura A.64 – 135 – Fisuras en los orificios de los bulones de vía

Figura A.65 – 135 – Fisuras en los orificios de los bulones de vía

A.2.9.3 Abrasión

Tabla A.39 – Abrasión

Abrasión (139 / 239)
Una abrasión está causada por la fabricación. Es un defecto de superficie extremadamente raro caracterizado por una línea paralela al eje de rodadura en una de las superficies del carril, generalmente en el alma o en la región del radio de la cabeza del alma, o del filete del alma-patín. Se ve como un exceso de metal doblado y presionado a lo largo del carril durante el proceso de laminado de fundición. Todos los carriles del mismo molde pueden tener el mismo defecto. No se tiene que confundir con una fisura vertical longitudinal (213) en el filete de la cabeza del alma.

A.2.9.4 Rotura transversal sin origen identificado

Tabla A.40 – Rotura transversal sin origen identificado

Rotura transversal sin origen identificado (200)
La rotura transversal sin origen identificado tiene un origen no identificado que ocurre repentinamente. Es más probable que se produzca a temperaturas muy bajas, temperatura de neutralización incorrecta en CWR, impactos dinámicos excesivos de las ruedas planas o desviación de nivel longitudinal (p. ej. soldaduras por inmersión). No se tiene que confundir con fisuras transversales progresivas (211), quemaduras en las ruedas (2251, 2252), corrosión (234, 254), fisuras longitudinales verticales del patín (253), magulladuras (301), mecanizado defectuoso (302), soldadura manual por arco, etc.

Figura A.66 – 200 – Rotura transversal sin origen identificado

A.2.9.5 Fisuras diagonales

Tabla A.41 – Fisuras diagonales

Fisuras diagonales (236)
La fisura diagonal se inicia a partir de las marcas de rodadura. Está provocada por la fabricación, pero es rara. Progresa localmente a lo largo del radio del filete, y curva hacia arriba o hacia abajo. Tiende a separar la cabeza o el patín del alma del carril. No se tiene que confundir con las fisuras horizontales en el radio del filete de la cabeza y el alma (2321).

Figura A.67 – 236 – Fisuras diagonales

A.2.9.6 Fractura transversal del carril mecanizado

Tabla A.42 – Fractura transversal del carril mecanizado

Fractura transversal del carril mecanizado (251)
La fractura transversal del carril mecanizado se inicia principalmente en la parte reducida del patín de un carril mecanizado, como una desviación o una expansión. Está provocada por la concentración del esfuerzo en el borde de corte. La concentración del esfuerzo puede estar provocada por irregularidades o anomalías de fabricación, corrosión, mal acabado del ángulo de arista (chaflán), magulladuras en el borde, cargas altas en las agujas.

Figura A.68 – 251 – Fractura transversal del carril mecanizado

A.2.9.7 Fisuras transversales en la zona de revestimiento de la cabeza del carril

Tabla A.43 – Fisuras transversales en el área de revestimiento de la cabeza del carril

Fisuras transversales en la zona de revestimiento de la cabeza del carril (471)
Las fisuras transversales en la zona de revestimiento de la cabeza del carril son fisuras transversales que atraviesan la sección soldada, originada en un núcleo generalmente situado en la base del depósito de soldadura.
Se inician desde una inclusión o una discontinuidad local producida por la inestabilidad en el proceso de soldadura.
Se propagan más rápido que otros defectos transversales, probablemente debido al esfuerzo residual.
También se pueden iniciar a partir de un proceso de reparación de soldadura inadecuado en el que un defecto preexistente no se elimina completamente.
Puede ser difícil de detectar y evaluar durante los ensayos ultrasónicos automáticos.
Las fisuras transversales en la zona del revestimiento de la rotura de la cabeza del carril aparecen como un parche liso y brillante que se originan en el metal de depósito.
No se tienen que confundir con la fisura por fatiga en forma de riñón (211) o con la quemadura de rueda aislada (2251).

Figura A.69 – 471 – Fisuras transversales de la cabeza del carril (revestimiento)

A.2.9.8 Fisuras transversales bajo conexión eléctrica

Tabla A.44 – Fisuras transversales bajo conexión eléctrica

Fisuras transversales bajo conexión eléctrica (481)
Las fisuras transversales bajo conexión eléctrica se inician en cualquier cara exterior del carril en ángulos rectos con una conexión eléctrica para la corriente de retorno. Están provocadas por un endurecimiento localizado producido por un arco eléctrico (por ejemplo, equipo de soldadura o conexión deficiente de un cable de tracción). Progresan hacia una fisura transversal por fatiga.

Figura A.70 – 481 – Fisuras transversales bajo conexión eléctrica

Figura A.71 – 481 – Fisuras transversales bajo conexión eléctrica