



Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Desarrollo de una herramienta para el cálculo y
validación de gálibo en tranvías

English tittle:

A tool development for tram's gauge calculation
and validation

Autor/es

Pedro Marco Morales

Director/es

Sergio Lafuente Zabal
Emilio Larrodé Pellicer

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2017

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Pedro Marco Morales

con nº de DNI 73004236M en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado, (Título del Trabajo)
Desarrollo de una herramienta para el cálculo y validación de gálibo en tranvías

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 20 de Noviembre de 2017

Edo: Pedro Marco Morales

RESUMEN

Desarrollo de una herramienta para el cálculo y validación de gálibo en tranvías

El trabajo que se ha llevado a cabo en el presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo la creación de una herramienta de cálculo para la obtención del perfil dinámico de los vehículos tipo tranvía actualmente en fabricación por la empresa CAF, Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles S.A.

El único antecedente similar es el software de cálculo de gálibo DIMA de la Tecknische Universität Dresden, empleado actualmente por las compañías SIEMENS, ALSTOM o BOMBARDIER. Este programa, sin embargo, sólo calcula gálibo UIC y EBO, no siendo válido por tanto para su uso en tranvías. La falta de soluciones comerciales para este tipo de vehículos radica en dos motivos: por un lado, la complejidad del análisis de sistemas articulados, y por otro, las particularidades de cada sistema y las soluciones adoptadas por cada fabricante, que hacen la creación de un software comercial genérico inviable.

Para la realización de esta herramienta se adaptaron las directrices de la norma de gálibo alemana BOStrab al cálculo de los vehículos tranvía examinados en este proyecto. Esta adaptación es compleja, debido a que el comportamiento de las unidades articuladas difiere notablemente del caso genérico presentado en la norma.

Posteriormente, se tradujo esta formulación en un programa informático que desarrolla toda la metodología de creación, cálculo y validación del gálibo para tranvías.

Además, esta herramienta fue validada y presentada al departamento de ingeniería, que será el encargado de su explotación en el futuro.

En cuanto a este documento, en primer lugar, se introducen los conceptos más importantes y necesarios para la comprensión del trabajo realizado, a modo de definiciones y glosario.

En segundo lugar, tras una breve introducción al proceso de gálibo, se analiza la norma BOStrab para adaptarla al cálculo del gálibo de las tipologías de vehículo consideradas en este proyecto. Además, se desarrollan metodologías que facilitan su implementación en la herramienta. A lo largo del análisis de la norma se introducen, por otra parte, todas aquellas peculiaridades que estos vehículos presentan y que son necesarias para la correcta determinación de la envolvente de la unidad.

En tercer lugar, se analizan los conceptos auxiliares de diseño, como son la superficie de partes bajas y el afilado de cabina, y su cálculo empleando la citada norma.

En cuarto lugar, se introduce la herramienta y sus funcionalidades.

Finalmente, localizado en anexos, se explica el proceso de validación de dicha herramienta y se introduce ésta al equipo técnico de CAF.

Índice

GLOSARIO	9
DEFINICIONES	11
1 INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO	17
1.2 NECESIDAD DEL PROYECTO.....	18
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	19
2 PROCESO GENERAL DE GÁLIBO	20
2.1 TIPOS DE PROCESOS DE GESTIÓN DE GÁLIBO	20
2.1.1 <i>Comparativos:</i>	21
2.1.2 <i>Definido:</i>	22
2.1.3 <i>Absoluto:</i>	22
2.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO ASOCIADA AL PROCESO DE GÁLIBO.....	23
3 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL PERFIL DINÁMICO DE ACUERDO CON LA NORMA BOSTRAB	24
3.1 METODOLOGÍA	24
3.1.1 <i>Localización del vehículo en una curva</i>	25
3.1.1.1 Adaptación del cálculo de factores de articulación a los vehículos CAF	27
3.1.1.1.1 URBOS 100	27
3.1.1.1.2 URBOS AXL	27
3.1.1.1.2.1 Ejemplo demostración del cálculo de factores en Urbos AXL	28
3.1.1.2 <i>Selección de perfiles estáticos del vehículo.....</i>	30
3.1.1.3 <i>Factores de influencia BOStrab</i>	31
3.1.1.4 <i>Composición del gálibo del vehículo</i>	32
3.2 SALIENTE GEOMÉTRICA DEL VEHÍCULO	33
3.2.1 <i>Introducción</i>	33
3.2.2 <i>Antecedentes en el cálculo de los salientes laterales para URBOS 100 y AXL.....</i>	34
3.2.2.1 Saliente geométrico del bogie.....	34
3.2.2.2 Saliente geométrico del vehículo	35
3.2.2.2.1 URBOS 100	35
3.2.2.2.2 URBOS AXL	37
3.2.3 <i>Problema con el procedimiento de cálculo tradicional</i>	37
3.2.3.1 Propuesta de formulación para el cálculo de salientes geométricos en curva horizontal	37
3.2.3.2 Implementación de algoritmia	40
3.2.3.3 Tipología AXL, transiciones curva-recta	40
3.2.4 <i>Saliente geométrica vertical</i>	41
3.2.4.1 Cálculo del saliente en curva colina según norma BOStrab	42
3.2.4.2 Cálculo del saliente en curva valle según norma BOStrab.	42
3.2.4.3 Formulación para el cálculo de salientes geométricos en curva vertical	43
3.3 DESPLAZAMIENTOS DEBIDO A FACTORES DE INFLUENCIA	44
3.3.1 <i>Desplazamientos debido al juego de vía</i>	45
3.3.2 <i>Desplazamientos debido a factores de influencia técnicos del vehículo</i>	46
3.3.2.1 Desplazamientos transversales	46
3.3.2.2 Desplazamientos verticales.....	50
3.3.3 <i>Desplazamientos debido a factores de influencia técnicos de la vía</i>	53
3.3.3.1 Desplazamientos transversales	53
3.3.3.2 Desplazamientos verticales.....	54
3.3.4 <i>Balanceos.....</i>	56
3.3.5 <i>Cabeceos</i>	60
4 GÁLIBO DEL VEHÍCULO	61
4.1 GÁLIBO LATERAL.....	61
4.2 GÁLIBO DE PARTES BAJAS.....	64

4.3	AFILADO DE CABINA	65
4.3.1	<i>Cálculo del afilado.</i>	65
5	DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA	67
5.1	ENTRADAS DEL PROGRAMA.....	68
5.1.1	<i>Datos geométricos del vehículo</i>	68
5.1.2	<i>Datos del vehículo.....</i>	69
5.1.3	<i>Parámetros de la infraestructura.....</i>	71
5.2	SECCIONES DEL VEHÍCULO.....	72
5.3	SECCIONES DE INFRAESTRUCTURA. VALIDACIÓN DEL GÁLIBO.....	73
5.4	SALIDAS DEL PROGRAMA	73
5.5	OTROS DATOS	73
5.6	VALIDACIÓN Y MANUAL DE UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA	73
6	CONCLUSIONES	74
7	BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO I. CÁLCULO DE SALIENTES EN CURVA PARA AXL EN15273		I
ANEXO II RELACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS CONSIDERADOS EN BOSTRAB		III
ANEXO III. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO		V
1.	FACTORES DE ARTICULACIÓN	V
3.	SECCIONES MÁS PERJUDICADAS	XII
4.	DESPLAZAMIENTOS BOSTRAB	XIII
5.	CÁLCULO DEL PERFIL DINÁMICO	XIV
6.	VALIDACIÓN/TESTING.....	XVI
ANEXO IV. MANUAL DE USO DE LA HERRAMIENTA DE GÁLIBO		XVII
ANEXO V. NORMA GÁLIBO BOSTRAB.....		XVIII

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 0.1.1 REPRESENTACIÓN DE LOS CONCEPTOS BÁSICOS TÉCNICOS DE GÁLIBO. TOMADA DE LA NORMA BOSTRAB-GÁLIBO. TRADUCIDA.....	11
ILUSTRACIÓN 0.1.2 SISTEMA DE COORDENADAS DEL CÁLCULO. REFERIDO AL SEMIANCHO DE ESTE. FUENTE BOSTRAB (TRADUCIDA)	12
ILUSTRACIÓN 0.1.3 EMPATE DE CAJA, A, Y EMPATE DE BOGIE, P, EN UN VEHÍCULO URBOS 100.....	12
ILUSTRACIÓN 0.1.4 VISTA LATERAL Y SUPERIOR DEL AFILADO DE CABINA.....	13
ILUSTRACIÓN 0.1.5 VEHÍCULO STANDARD EN CURVA. EN ROJO INDICADOS LOS SALIENTES MÁXIMOS INTERIORES Y EXTERIORES.....	13
ILUSTRACIÓN 0.1.6 INSCRIPCIÓN DE UN VEHÍCULO EN UNA CURVA VERTICAL. EN CURVA VALLE, LAS ZONAS DE EMPATE MEDIO SUFREN UN ALEJAMIENTO DE LA VÍA. (DGE) MIENTRAS QUE EN LOS VOLADIZOS SUFREN UN ACERCAMIENTO. (DGI).....	14
ILUSTRACIÓN 0.1.7 DESPLAZAMIENTOS TRANSVERSALES EN UN VEHÍCULO. FUENTE: BOSTRAB	14
ILUSTRACIÓN 0.1.8 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN UN VEHÍCULO. FUENTE: BOSTRAB.....	15
ILUSTRACIÓN 0.1.9 DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL Y VERTICAL DE UN PUNTO P DEBIDO A UN BALANCEO. FUENTE: BOSTRAB.....	15
ILUSTRACIÓN 1.1 FOTO QUE ILUSTRA CLARAMENTE LOS RIESGOS DE UN PROCESO DE GÁLIBO DEFICIENTE. FUENTE: CAF.....	17
ILUSTRACIÓN 1.2 VEHÍCULOS URBOS 100 DE CAF PARA LA CIUDAD FRANCESA DE BESANÇON. FUENTE: CAF.....	18
ILUSTRACIÓN 1.3 TIPOLOGÍAS DE TRANVÍAS URBOS 100 (FOTO: Utrecht) Y AXL (FOTO: TALLIN) OBJETO DE ESTE PROYECTO. FUENTE: CAF.	19
ILUSTRACIÓN 2.1 APARTADOS FUNDAMENTALES DE UN PROYECTO DE GÁLIBO PARA UN VEHÍCULO FERROVIARIO.	20
ILUSTRACIÓN 2.2 TIPOS DE PROCESOS DE GESTIÓN DE GÁLIBO.	21
ILUSTRACIÓN 2.3 MUESTRA DE GÁLIBO COMPARATIVO. EL PERFIL DEL VEHÍCULO EN PROYECTO SE COMPARA CONTRA EL PERFIL DEL VEHÍCULO EXISTENTE EN LA LÍNEA. FUENTE: EN15273	21
ILUSTRACIÓN 2.4 CONOCIMIENTO Y DIFICULTAD NECESARIO PARA LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS.....	22
LEYENDA ILUSTRACIÓN 2.5.....	22
ILUSTRACIÓN 2.6 VISIÓN GENERAL DE UN PROCESO DE GÁLIBO ABSOLUTO. FUENTE: EN15273	22
ILUSTRACIÓN 2.7 DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO DE GÁLIBO HABITUAL	23
ILUSTRACIÓN 3.1 CÁLCULO DE FACTORES SEGÚN LA NORMA BOSTRAB. FUENTE BOSTRAB: TRADUCIDA.....	25
ILUSTRACIÓN 3.2 DISPOSICIÓN DEL VEHÍCULO EN CUERDA.	26
ILUSTRACIÓN 3.3 DISPOSICIÓN DEL VEHÍCULO EN POSICIÓN CRUZADA.	26
ILUSTRACIÓN 3.4 EMPLEO DE LOS FACTORES DE ARTICULACIÓN EN URBOS AXL.....	28
ILUSTRACIÓN 3.5 DISTANCIAS EMPLEADAS Y NUMERACIÓN DE BOGIES EN ESTE CÁLCULO EJEMPLO.....	28
ILUSTRACIÓN 3.6 SECCIONES TIPO OBLIGATORIAS EMPLEADAS PARA HALLAR LA ENVOLVENTE DE GÁLIBO EN EL CASO DE UN VEHÍCULO URBOS 100.....	30
ILUSTRACIÓN 3.7 PARA EL URBOS AXL, LA SECCIÓN MÁS PERJUDICADA EN EL INTERIOR DE UNA CURVA NO TIENE POR QUÉ CORRESPONDERSE CON EL SEMIEMPATE DE CAJA, TAL Y COMO PUEDE VERSE EN EL DIAGRAMA.....	31
ILUSTRACIÓN 3.8 COMPOSICIÓN DEL PERFIL DINÁMICO DEL VEHÍCULO.	32
ILUSTRACIÓN 3.9 INSCRIPCIÓN TÍPICA DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO EN CURVA Y SUS PROYECCIONES.....	33
ILUSTRACIÓN 3.10 SALIENTE EN CURVA (DGI) INTERIOR DE RADIO R DEBIDO AL EMPATE DE BOGIE P.	34
ILUSTRACIÓN 3.11 NOMENCLATURA DE MÓDULOS EN URBOS 100.	35
ILUSTRACIÓN 3.12 CALCULO DEL SALIENTE GEOMÉTRICO PARA UN MÓDULO CABINA.	35
ILUSTRACIÓN 3.13 INSCRIPCIÓN DEL CONJUNTO MÓDULOS C, S Y R EN UNA CURVA HORIZONTAL DE RADIO R.	36
ILUSTRACIÓN 3.14 TIPOS DE MÓDULOS EN URBOS AXL.	37
ILUSTRACIÓN 3.15 TIPOS DE MÓDULOS EN URBOS 100.	37
ILUSTRACIÓN 3.16 INSCRIPCIÓN DE UN MÓDULO SUSPENDIDO EN UNA CURVA CUALQUIERA.....	38
ILUSTRACIÓN 3.17 INSCRIPCIÓN DE UN MÓDULO DE BOGIE SIMPLE EN CURVA.	39
ILUSTRACIÓN 3.18 INSCRIPCIÓN DE UN MÓDULO C DE LA TIPOLOGÍA AXL EN CURVA	39
ILUSTRACIÓN 3.19 INSCRIPCIÓN DE UN MÓDULO N EN CURVA.	40
ILUSTRACIÓN 3.20 MÓDULOS C Y N EN LA PEOR TRANSICIÓN RECTA CURVA POSIBLE.	41
ILUSTRACIÓN 3.21 SALIENTES GEOMÉTRICOS EN CURVA VERTICAL TIPO "COLINA" FUENTE: BOSTRAB.....	42
ILUSTRACIÓN 3.22 SALIENTES GEOMÉTRICOS EN CURVA VERTICAL TIPO "VALLE". FUENTE: BOSTRAB.....	42
ILUSTRACIÓN 3.23 EQUIVALENCIA DEL VEHÍCULO PARA MOVIMIENTOS VERTICALES.	43
ILUSTRACIÓN 3.24 ILUSTRACIÓN 3.5 EQUIVALENCIA DEL VEHÍCULO PARA MOVIMIENTOS VERTICALES PARA URBOS 100 7 MÓDULOS.	44
ILUSTRACIÓN 3.25 IZQUIERDA: JUEGO CARRIL-PESTAÑA. CENTRO: DESGASTE DE PESTAÑA. DERECHA: DESGASTE DE CARRIL..	45

ILUSTRACIÓN 3.26 BOGIE DE TIPO Y25 CON CONEXIÓN BOGIE-CAJA DE TIPO PIVOTE. FUENTE: HTTP://THE-CONTACT-PATCH.COM/BOOK/RAIL/R1114-RAILWAY-SUSPENSION	47
ILUSTRACIÓN 3.27 TÍPICA SUSPENSIÓN PRIMARIA DE CAMPANA DE CAUCHO COMO LA EMPLEADA EN BOGÍES URBOS. FUENTE: HTTP://THE-CONTACT-PATCH.COM/	48
ILUSTRACIÓN 3.28 LOCALIZACIÓN DE LOS TOPES DE GOMA EN EL BOGIE URBOS. FUENTE: PLANO BOGIE URBOS Q.40. CAF	49
ILUSTRACIÓN 3.29 DESPLAZAMIENTO QUE SUFRIRÍA UN PUNTO DEL VEHÍCULO EN EL MÓDULO S DEBIDO A LOS GIROS A EN BOGIE/BOGIE EN EL COCHE C Y R (EXAGERADO)	50
ILUSTRACIÓN 3.30 MUESTRA DEL PEOR CABECEO POSIBLE DEBIDO A DINÁMICOS EN PARA UNA SECCIÓN SITUADA EN P.	52
ILUSTRACIÓN 3.31 DESCENSOS DEBIDO A FLEXIÓN DE CAJA POR CARGA. URBOS 100.....	52
ILUSTRACIÓN 3.32 DESCENSOS DEBIDO A FLEXIÓN DE CAJA POR CARGA. URBOS AXL.....	53
ILUSTRACIÓN 3.33 EL DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL DE LA VÍA PROVOC A SU CENTRO UN DESPLAZAMIENTO DEL EJE REAL DE LA VÍA RESPECTO AL TEÓRICO QUE ES NECESARIO TENERLO EN CUENTA.....	53
ILUSTRACIÓN 3.34 DESGASTE VERTICAL EN LA CABEZA DEL RAIL. FUENTE: EN15273	55
ILUSTRACIÓN 3.35 DESPLAZAMIENTO VERTICAL DE LA VÍA DEBIDO AL FUNCIONAMIENTO.....	55
ILUSTRACIÓN 3.36 MOVIMIENTO DE UN VEHÍCULO AL BALANCEO FUENTE: EN15273.....	56
ILUSTRACIÓN 3.37 LA SOUPLESSE DE UN VEHÍCULO ES LA FLEXIBILIDAD DE ESTE FRENTE A UN BALANCEO. UN VALOR DE COEFICIENTE DE SOUPLESSE DE 0 INDICARA QUE EL VEHÍCULO NO BALANCEA FRENTE A UNA INCLINACIÓN.....	56
ILUSTRACIÓN 3.38 A LA IZQUIERDA, UN VEHÍCULO CON INSUFICIENCIA DE PERALTE. A LA DERECHA, CON EXCESO.	57
ILUSTRACIÓN 3.39 GIROS DEBIDO A MANTENIMIENTO POBRE PUEDE CREAR UNA DIFERENCIA DE ALTURAS ENTRE CARRILES, CUYO RESULTADO ES UN BALANCEO DEL VEHÍCULO.	59
ILUSTRACIÓN 3.40 DESCENSO DE UN PUNTO P EN VOLADIZO DEBIDO A LA VARIACIÓN EN DESPLAZAMIENTO VERTICAL ENTRE EL EMPATE.	60
ILUSTRACIÓN 3.41 MARCADO EN ROJO, LAS ZONAS QUE SE VERÍAN AFECTADAS EN EL CASO DE UNA VARIACIÓN VERTICAL DE VÍA ENTRE R Y C2.....	60
ILUSTRACIÓN 4.1 CÁLCULO DEL PERFIL DINÁMICO A PARTIR DEL PERFIL ESTÁTICO	61
ILUSTRACIÓN 4.2 PROCESO GENERAL DE GENERACIÓN DEL PERFIL DE GÁLIBO PARA UN CASO TÍPICO DE URBOS 100.....	63
ILUSTRACIÓN 4.3 SUPERFICIE CATIA DE ACERCAMIENTOS DE VÍA PARA EL CONJUNTO DE MÓDULOS C, S Y R DEL TRANVÍA DE ÁMSTERDAM. GENERADO AUTOMÁTICAMENTE CON EL SOFTWARE DE CÁLCULO DE GÁLIBO FRUTO DE ESTE PROYECTO.....	64
ILUSTRACIÓN 4.4 DIAGRAMA EJEMPLO DEL POSIBLE AFILADO DE CABINA PARA UN VEHÍCULO DE TIPOLOGÍA URBOS AXL.....	65
ILUSTRACIÓN 4.5 3D DE AFILADOS DE CABINA GENERADOS AUTOMÁTICAMENTE MEDIANTE LA HERRAMIENTA CREADA EN ESTE PROYECTO.	66
ILUSTRACIÓN 5.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO.....	67
ILUSTRACIÓN 5.2 DIMENSIONES A INTRODUCIR. URBOS 100 5 MÓDULOS.....	68
ILUSTRACIÓN 5.3 DIMENSIONES A INTRODUCIR. URBOS 100 7 MÓDULOS.....	68
ILUSTRACIÓN 5.4 DIMENSIONES A INTRODUCIR. URBOS AXL 3 MÓDULOS.....	68
ILUSTRACIÓN 5.5 DIMENSIONES A INTRODUCIR. URBOS AXL 4 MÓDULOS.....	68
ILUSTRACIÓN 5.6 SECCIONES OBLIGATORIAS URBOS 100 5 MÓDULOS.....	72
ILUSTRACIÓN 5.7 SECCIONES OBLIGATORIAS URBOS AXL 3 MÓDULOS.....	72
ILUSTRACIÓN ANEXO III 1 CAPTURA DE PANTALLA DE LA HERRAMIENTA, QUE MUESTRA LOS RESULTADOS DE FACTORES ESPERADOS DEL EJEMPLO.	V
ILUSTRACIÓN ANEXO III 2 CAPTURA DE LA SALIDA DEL PROGRAMA	VI
ILUSTRACIÓN ANEXO III 3 CAPTURA DE LOS DATOS INTRODUCIDOS (GEOMÉTRICOS).	VII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 4 CAPTURA DE LA SALIDA PARA RADIO 20M.....	VII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 5 CAPTURA DE LA FORMULACIÓN DE LA NORMA PARA EL MÓDULO C.	VIII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 6 CAPTURA DE LA GEOMETRÍA INTRODUCIDA.	VIII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 7 CAPTURA DE LA SALIDA.	VIII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 8 DATOS GEOMÉTRICOS INTRODUCIDOS.....	IX
ILUSTRACIÓN ANEXO III 9 CAPTURAS DE PANTALLA DE LAS SECCIONES CALCULADAS CON EL MÉTODO GRÁFICO.....	X
ILUSTRACIÓN ANEXO III 10 CAPTURA DE LA SALIDA. EJEMPLO COCHE N.	XI
ILUSTRACIÓN ANEXO III 11 CAPTURA DE LA SALIDA PARA CURVAS VERTICALES. EJEMPLO COCHE N.	XII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 12 DIBUJO CAD PARA VALIDAR LOS CÁLCULOS GEOMÉTRICOS DE LA TIPOLOGÍA AXL 4	XII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 13 CAPTURA DEL PROGRAMA: EL CÁLCULO ES CORRECTO.	XIII
ILUSTRACIÓN ANEXO III 14 CAPTURAS DE PANTALLA MOSTRANDO LOS DESCENSOS DEBIDO A FLEXIÓN. IMAGEN SUPERIOR: U100. INFERIOR: AXL.....	XIII

ILUSTRACIÓN ANEXO III 15 COMPARACIÓN GRÁFICA DE SOLUCIONES. (LOS CÁLCULOS TRADICIONALES NO CONSIDERABAN LOS BALANCEOS EN Z)	XIV
ILUSTRACIÓN ANEXO III 16 COMPARACIÓN GRÁFICA DE SOLUCIONES.....	XV
ILUSTRACIÓN ANEXO III 17 COMPARACIÓN GRÁFICA DE SOLUCIONES.....	XV

Índice de tablas

TABLA 3.1 POSICIONES EXTREMAS DE UN COCHE DE DOS BOGÍES EN LA VÍA. FUENTE: BOSTRAB (TRADUCIDA).....	25
TABLA 3.2 FACTORES DE ARTICULACIÓN PARA URBOS 100.....	27
TABLA 3.3 SOBREANCHOS Y DESGASTES CONSIDERADOS EN LA NORMA. FUENTE: BOSTRAB (MODIFICADA).....	45
TABLA 3.4 CONSIDERACIONES BOSTRAB PARA CADA UNO DE LOS TIPOS DE VÍA. FUENTE: BOSTRAB (MODIFICADA).....	53
TABLA 5.1 PARÁMETROS PRINCIPALES NECESARIOS DEL VEHÍCULO.....	69
TABLA 5.2 PARÁMETROS DE JUEGOS Y TOLERANCIAS LATERALES DE ENTRADA.....	69
TABLA 5.3 PARÁMETROS DE JUEGOS Y TOLERANCIAS VERTICALES DE ENTRADA.....	69
TABLA 5.4 DATOS LATERALES DE ENTRADA DE SUSPENSIONES.....	70
TABLA 5.5 DATOS VERTICALES DE ENTRADA DE SUSPENSIONES.	70
TABLA 5.6 DATOS DE ENTRADA PARA CÁLCULO DE DISIMETRÍAS DEL VEHÍCULO	70
TABLA 5.7 PRINCIPALES DATOS DE LA LÍNEA.....	71
TABLA 5.8 DATOS DE DESGASTES EN LA LÍNEA.	71
TABLA 5.9 DATOS DE DESPLAZAMIENTOS DEBIDOS A LA ACCIÓN DEL VEHÍCULO EN LA VÍA.....	71
TABLA 5.10 DATOS DE DESPLAZAMIENTOS COMO CONSECUENCIA DE MANTENIMIENTO.	72

Glosario

Denominación	Unidad de medida	Concepto
<i>Conceptos técnicos de la vía</i>		
S	mm	Ancho de vía
ΔS	mm	Desgaste de carriles incluyendo ensanchamiento de vía
ΔS_a	mm	parte de ΔS correspondiente al lado exterior de curva
ΔS_i	mm	parte de ΔS correspondiente al lado interior de curva
σ ≈ S - d	mm	Juego de vía (holgura carril-rueda)
máx. σ	mm	Juego de vía máximo
α_s	mm/m	Desviación del desgaste de carril
<i>Conceptos técnicos del vehículo</i>		
a	mm	Empate entre bogíes
p	mm	Empate de bogie
d	mm	Separación entre las caras interiores de las pestañas
Δd	mm	Desgaste de pestaña
C		Centro de balanceo de la caja
s		Coeficiente de Souplesse
f_{SUMA}		Factor de articulación suma
P		Punto de contorno del vehículo
<i>Cuyas coordenadas son: Ver ilustración 0.6</i>		
x	mm	Distancia del punto P al eje de coordenadas del vehículo en el eje longitudinal.
b	mm	Semiancho del vehículo en el punto P.
h	mm	Altura de un punto del vehículo P con respecto a la posición teórica de la vía.
h_s	mm	Altura del centro de gravedad de la caja de vagón
h_w	mm	Altura del centro de presión del viento.
h_c	mm	Altura del centro de balanceo del vehículo

η		Ángulo de balanceo
<i>Conceptos técnicos de la vía</i>		
R	mm	Radio de la curva horizontal de la vía
R_{VALLE}	mm	Radio de la curva de acuerdo vertical cóncava
R_{COLINA}	mm	Radio de la curva de acuerdo vertical convexa
u	mm	Peralte de la vía
Δu	mm	Divergencia de las altitudes recíprocas de los carriles
Δh	mm	Desgaste vertical de la cabeza de carril
α_q	mm/m	Desviación del desplazamiento transversal de la vía
α_v	mm/m	Desviación del desplazamiento vertical de la vía
<i>Conceptos técnicos del gálibo</i>		
b'	mm	Saliente geométrica del vehículo debido a una curva horizontal
(x_c, y_c)	mm	Centro de la curva de acuerdo con los ejes del vehículo
dg_i	mm	Saliente geométrica interior del vehículo debido a una curva
dg_e	mm	Saliente geométrica exterior del vehículo debido a una curva
<i>Velocidades, aceleraciones, fuerzas</i>		
v	km/h	Velocidad de circulación permitida
g	m/s^2	Aceleración de la gravedad
m_s	Kg	Masa del vehículo que descansa en un bogie
a_q	m/s^2	Aceleración no compensada
a_s	m/s^2	Aceleración transversal debido a dinámica (<i>hunting</i>)
p_w	N/m^2	Presión del viento
A_w	m^2	Área del vehículo expuesta a la acción del viento

Definiciones

- Envolvente dinámica del vehículo, gálibo

Es el perfil que engloba el vehículo y sus movimientos. Garantiza que cualquier elemento fuera de este no presentará un riesgo de interferencia.

Las dimensiones del semiancho del gálibo se calculan tomando como referencia la línea central de la vía y su superficie de rodadura (GFT) según el proyecto técnico de la línea. De aquí en adelante se denominarán eje central de vía y superficie de rodadura teóricos.

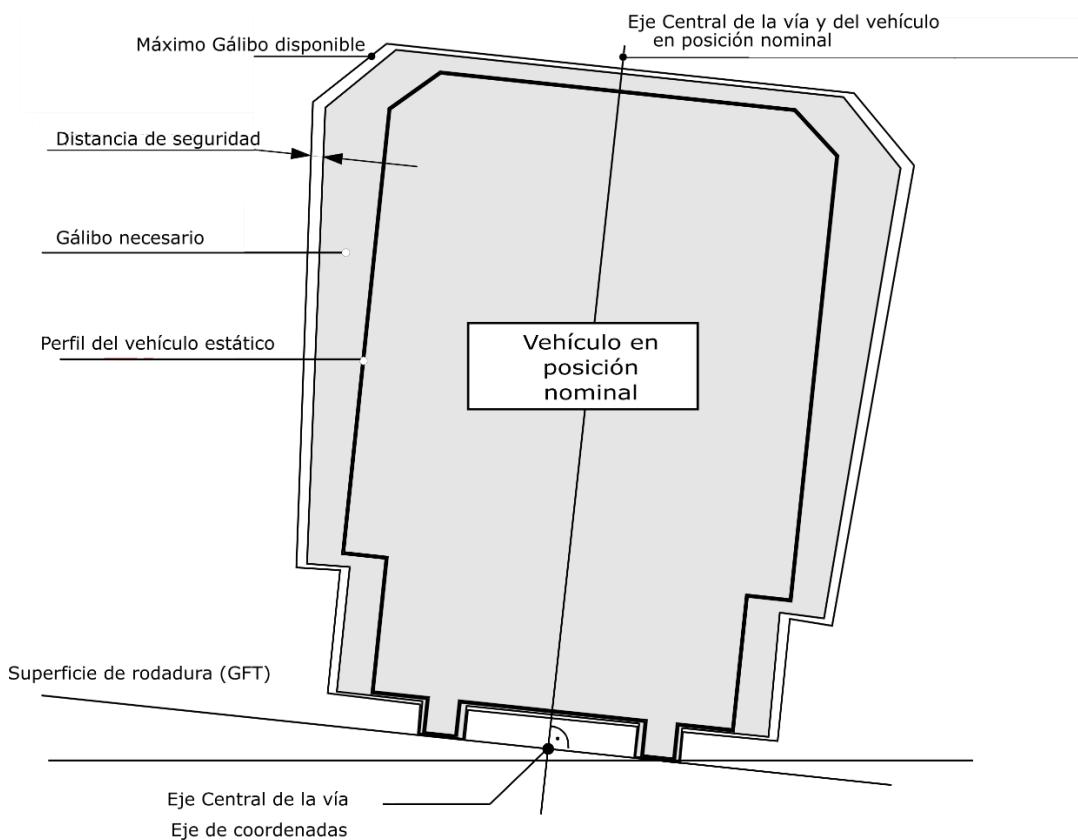


Ilustración 1.1 Representación de los conceptos básicos técnicos de gálibo. Tomada de la norma BOStrab-Gálibo. Traducida.

- Eje central del vehículo

En un corte transversal del vehículo, es el eje vertical situado de forma perpendicular al eje longitudinal del vehículo. Se sitúa de forma perpendicular a la superficie de rodadura.

- Eje longitudinal del vehículo

Es la recta de unión entre dos puntos de articulación pertenecientes a un módulo.

- Superficie de rodadura (GFT)

Es el plano tangencial a la vía teórica.

- Punto del contorno del vehículo. Sistema de coordenadas de la norma BOStrab:

Es un punto P en la línea de contorno del vehículo. Está determinado por tres coordenadas

- x, medida desde el centro de los puntos de articulación de la caja del módulo.
- b, medida desde la línea central del vehículo.
- h, medida desde la tangente de superficie de rodadura conjunta (GFT).

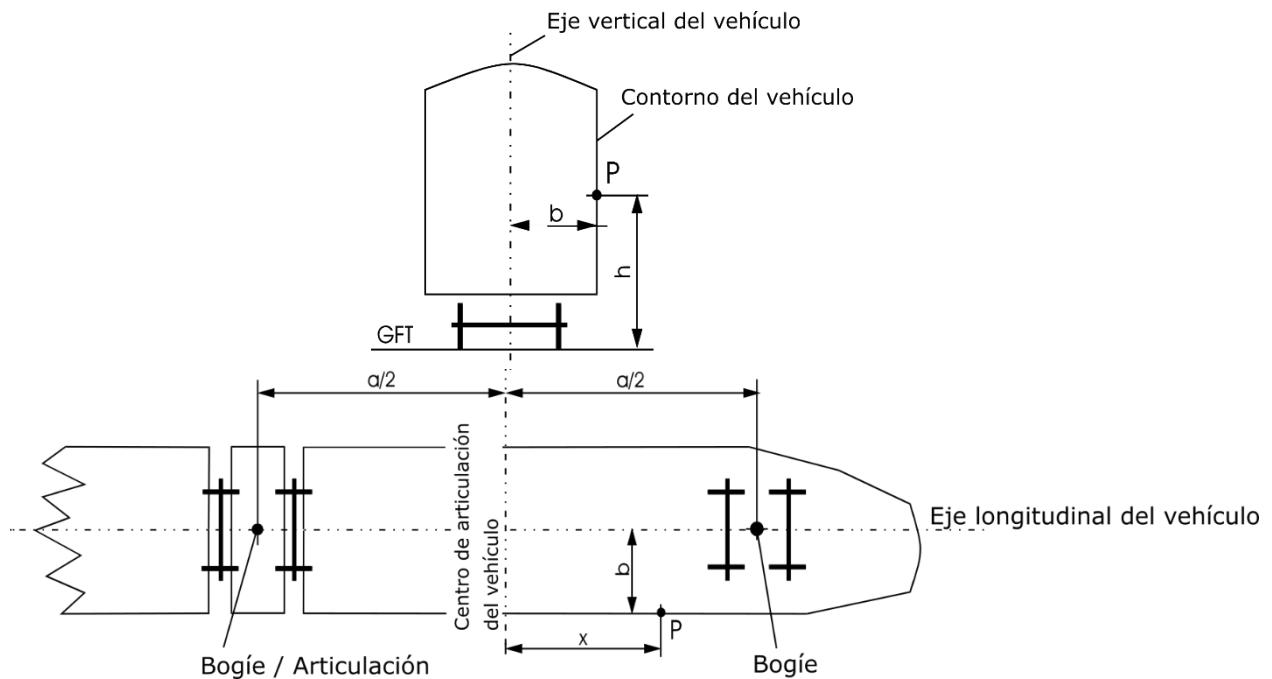


Ilustración 0.1.2 Sistema de coordenadas del cálculo. Referido al semiancho de este. Fuente BOStrab (traducida)

- Empate de caja

Es la distancia entre dos bogies de un vehículo.

- Empate de bogíes

Es la distancia entre ambos ejes de un mismo bogie.

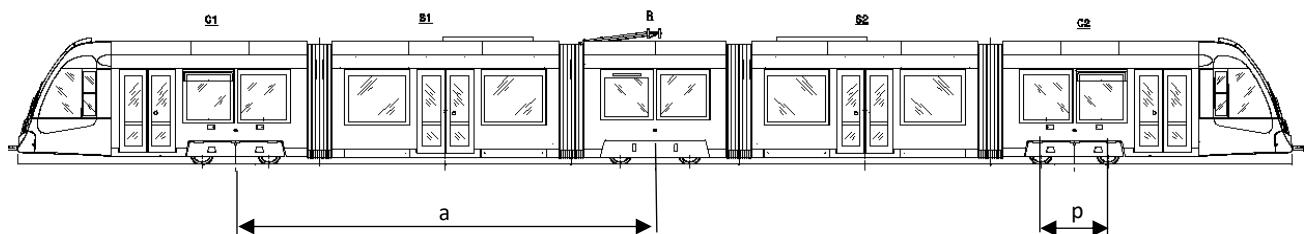


Ilustración 0.1.3 Empate de caja, a, y empate de bogie, p, en un vehículo URBOS 100.

- Afilado de cabina

Se denomina afilado a la reducción en anchura y altura de la cabina, a fin de garantizar que los elementos localizados en esta no produzcan una envolvente mayor que la del resto de la unidad.

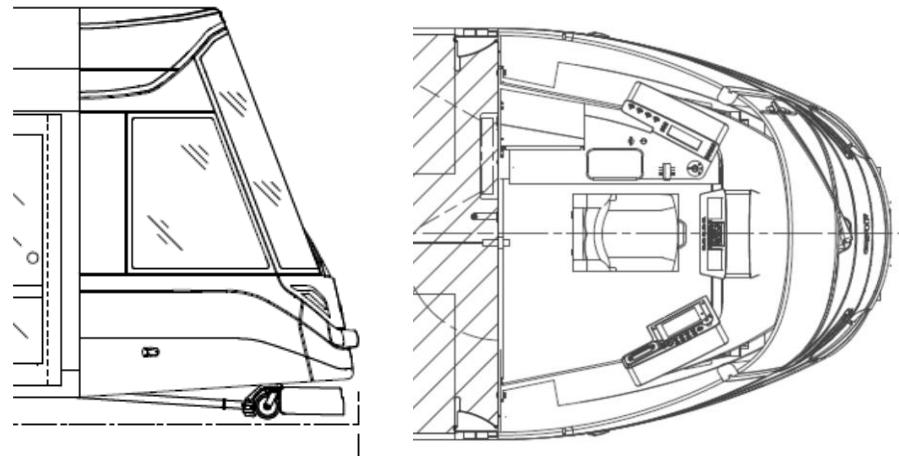


Ilustración 0.1.4 Vista lateral y superior del afilado de cabina

- Posición central del vehículo

Es la posición del vehículo en la que los juegos de vía reales están distribuidos simétricamente y en que todos los parámetros se hallan en posición nominal.

- Saliente geométrica en curva

Es el desplazamiento lateral de un punto del vehículo con respecto al eje de la vía que resulta exclusivamente de la geometría de curva. Medido hacia el interior de la curva.

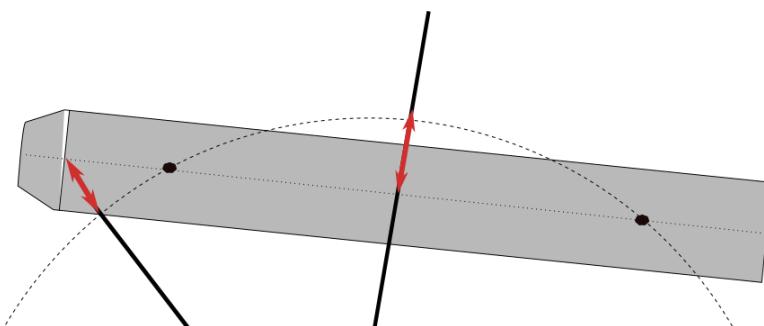


Ilustración 0.1.5 Vehículo standard en curva. En rojo indicados los salientes máximos interiores y exteriores.

- **Saliente geométrica vertical**

Es el desplazamiento vertical de un punto del vehículo con respecto a la GFT que resulta exclusivamente de la geometría de curva. Se distingue entre el provocado por curvas en valle y en cima.

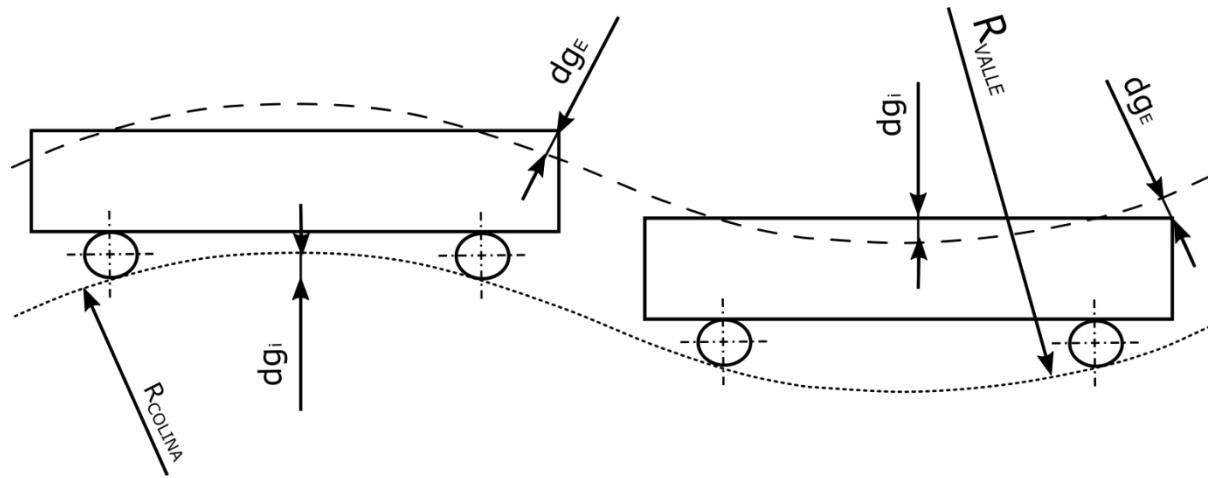


Ilustración 0.1.6 Inscripción de un vehículo en una curva vertical. En curva valle, las zonas de empate medio sufren un alejamiento de la vía. (dg_E) mientras que en los voladizos sufren un acercamiento. (dg_I)

- **Desplazamiento transversal**

Es el desplazamiento del vehículo paralelo a la GFT debido a tolerancias de la construcción y de la posición por agotamiento de juegos, desgastes y recorridos de resortes en el vehículo y en la vía.

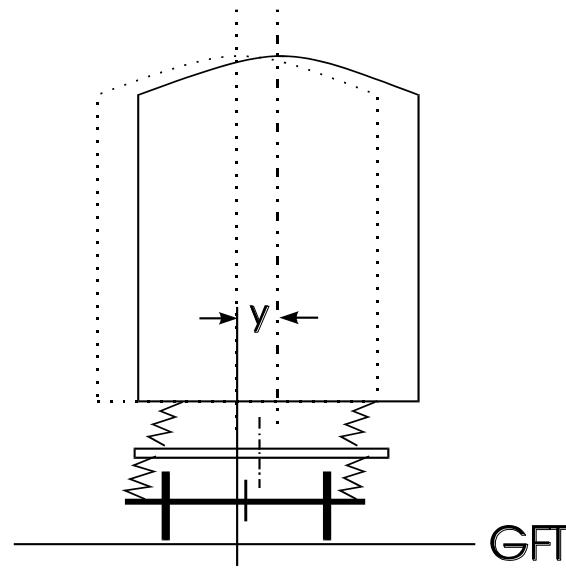


Ilustración 0.1.7 Desplazamientos transversales en un vehículo. Fuente: BOStrab

- Desplazamiento vertical

Es el desplazamiento transversal del vehículo perpendicular a la GFT debido a tolerancias de la construcción y de la posición por agotamiento de juegos, desgastes y recorridos de resortes en el vehículo y en la vía.

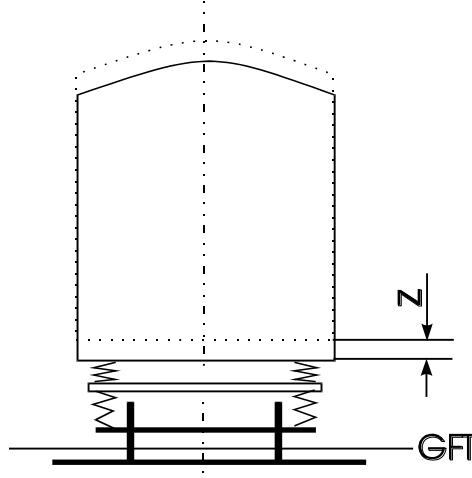


Ilustración 0.1.8 Desplazamientos verticales en un vehículo. Fuente: BOStrab

- Transposición de balanceos

Es el componente de recorrido de los puntos del vehículo según el proyecto técnico que resulta del balanceo del vehículo debido a fuerzas (impactos laterales, fuerza centrífuga, fuerza del viento), a tolerancias de la construcción y de la posición por agotamiento de juegos, desgastes y recorridos de resortes en el vehículo y en la vía. Produce tanto un movimiento vertical como transversal.

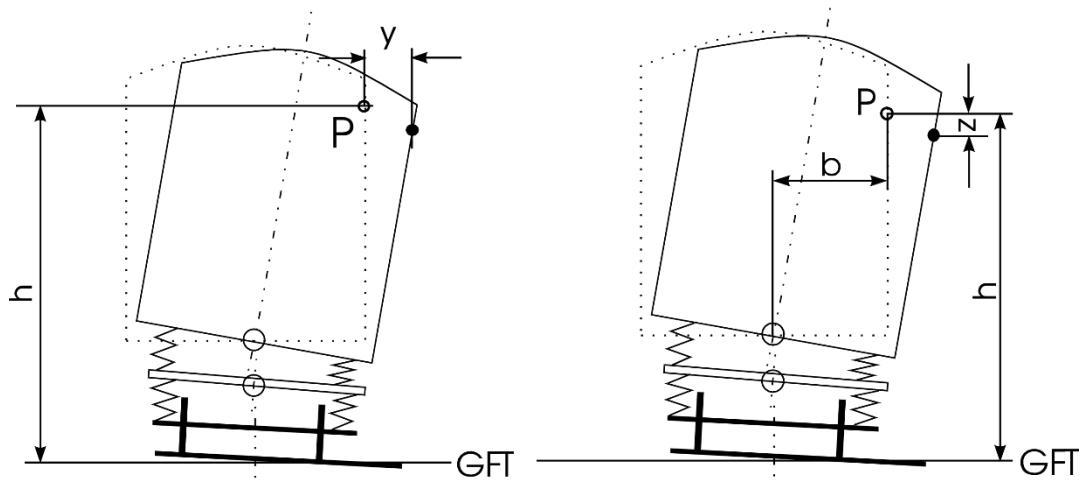


Ilustración 0.1.9 Desplazamiento transversal y vertical de un punto P debido a un balanceo. Fuente: BOStrab

- Centro de giro del vehículo

En el corte transversal de un vehículo es el punto alrededor del cual gira la línea central del vehículo durante el balanceo de la caja.

- Eje de la vía

Es el eje de referencia de la vía según el proyecto técnico. Se corresponde al centro de la vía en posición teórica.

El eje central de la vía constituye la línea de referencia para el ancho técnico del gálibo.

- Ensanchamiento de vía

Es un aumento del tamaño del ancho de vía nominal fabricado o condicionado por el desgaste.

- Juego de vía

Es la diferencia entre el ancho de vía y la medida de la separación entre las caras interiores de las pestañas.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO

Dentro de todo proyecto ferroviario, es elemental examinar la compatibilidad mecánica entre el vehículo y la infraestructura a la que este se va a destinar.

Este **proceso**, denominado Gálibo, garantiza que el material rodante es adecuado para circular en una infraestructura ferroviaria sin riesgo de interferencia con los elementos fijos de la misma y con otros vehículos que puedan circular en vías contiguas.

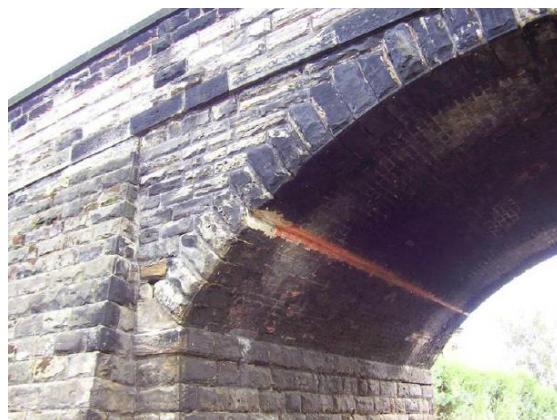


Ilustración 1.1 Foto que ilustra claramente los riesgos de un proceso de gálibo deficiente. Fuente: CAF

En el nuevo desarrollo de un vehículo o proyecto, el estudio de gálibo se realiza en un primer lugar en fase de ofertas, previa a la asignación final de un contrato.

Este estudio es vital, pues da a lugar al llamado perfil de construcción máxima del vehículo, es decir, define la posición de elementos tal como cámaras, retrovisores o equipos de bajo bastidor del vehículo para asegurar que el tren no presentará un riesgo para la infraestructura.

El cálculo de gálibo, además, es particularmente exigente en tranvías, dado que estos carecen de gálibos definidos como otros vehículos UIC. Añadido a esto último, la infraestructura en la que se encuentran este tipo de vehículos suele estar prestada a un menor mantenimiento, así como estar menos documentada por estar dentro de un entorno tan dinámico como es una ciudad.

En cuanto a las necesidades del vehículo, los vehículos ligeros como los tranvías presentan una arquitectura mucho más difícil de analizar, tal y como se describirá más adelante.

1.2 NECESIDAD DEL PROYECTO

Actualmente en la empresa CAF, el proceso de cálculo de gálibo se realiza mediante hojas de cálculo.

La metodología aplicada para el cálculo en estas Excel es una metodología propia basada en la norma europea EN 15273, una norma general de ferrocarril no realizada para tranvías por lo que no incorpora al cálculo aspectos técnicos propios de estas tipologías. Además, el método actual cuenta con muy pocos parámetros de entrada, lo que lleva a mayorar estos para dar seguridad al cálculo. Por ejemplo, no se considera el mantenimiento de la infraestructura, lo que incapacita al método actual para realizar cálculos de galibos absolutos.

Otros inconvenientes que presenta el método actual son:

- Imposibilidad de hacer estudios avanzados (Varias secciones de vehículo).
- Escaso número de parámetros considerados. Necesidad de modificar el cálculo para cada proyecto.
- Necesidad de conocimiento amplio del proceso de gálibo.
- Laboriosa exportación manual de datos (3D, superficies...).
- Empleo de varias hojas para cada tipología de vehículo.
- Compleja y laboriosa validación del gálibo.
- Necesidad de demostración del cálculo de gálibo a cliente (La formulación adoptada, aunque es perfectamente válida, no está basada en ninguna norma en concreto)

Por todo ello, se planteó al departamento de ingeniería de CAF la realización de una herramienta informática que mejorara las prestaciones del método actual solucionando los problemas anteriormente nombrados.

Particularmente, además, se quiere adaptar el método de cálculo actual del gálibo a la Norma Alemana Trrab., referente para vehículos ligeros como tranvías y que considera un altísimo número de parámetros posibles, tanto de vehículo como de infraestructura, dando una flexibilidad inmensa al cálculo y validación de gálibo.

Estas normas se consideran la norma técnica general reconocida para la construcción y el funcionamiento de tranvías y concretan los requisitos fundamentales de la Ordenanza sobre la construcción y el funcionamiento de los tranvías (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung, BOStrab).

Están fijadas por el Comité Técnico de los Estados Federados Alemanes (Bund-Länderfachausschuss) para la BOStrab (BLFA BOStrab) y publicadas por el Ministerio Federal de Transportes e Infraestructuras Digitales en su Boletín Oficial, el Verkehrsblatt.

Dentro de estas normas, la norma TRStrab Lichtraum especifica directrices y recomendaciones para el cálculo de movimientos en tranvías. De aquí en adelante se referirá a esta norma como BOStrab. Esta norma no es de obligatorio cumplimiento, sino que sólo contiene directrices generales para evaluar el galib, siendo libre su implementación por parte del diseñador.

La traducción de la norma se encuentra en su integridad para su consulta en el Anexo V.



Ilustración 1.2 Vehículos URBOS 100 de CAF para la ciudad francesa de Besançon. Fuente: CAF

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este Proyecto Fin de Grado es el desarrollo de una herramienta para el cálculo y validación del gálibo, que permita a la empresa CAF evaluar para nuevos proyectos las posibles interferencias de sus vehículos URBOS 100 y AXL con la infraestructura. Esta nueva herramienta deberá acelerar notablemente el proceso de cálculo de gálibo, al mismo tiempo que facilitar su validación.

Esta herramienta deberá fundamentarse en el cálculo de galibio a partir de la norma BOStrab.

Para la creación de la herramienta, se necesitará adaptar la metodología de la norma a los vehículos considerados en este proyecto:

- URBOS 100 (5 y 7 módulos)
- URBOS AXL (3 y 5 módulos)

Sumado a esto, habrá que desarrollar una formulación que permita su implementación en métodos programables.

En lo referente al programa informático, este deberá:

- Realizar los cálculos del perfil dinámico del vehículo de todas las tipologías de tranvía producidas actualmente por CAF.
- Facilitar la validación del diseño.
- Simplificar el proceso de generación del afilado de cabina.
- Posibilitar la exportación de planos y 3Ds.

Finalmente, se introducirá la herramienta de cálculo al equipo de Ingeniería de CAF.



Ilustración 1.3 Tipologías de tranvías Urbos 100 (foto: Utrecht) y AXL (foto: Tallin) objeto de este proyecto. Fuente: CAF.

2 PROCESO GENERAL DE GÁLIBO

El fin de un estudio de gálibo es la validación de un diseño en cuanto a compatibilidad mecánica con una infraestructura en particular.

De manera general, el proceso de gálibo consta de 4 partes:

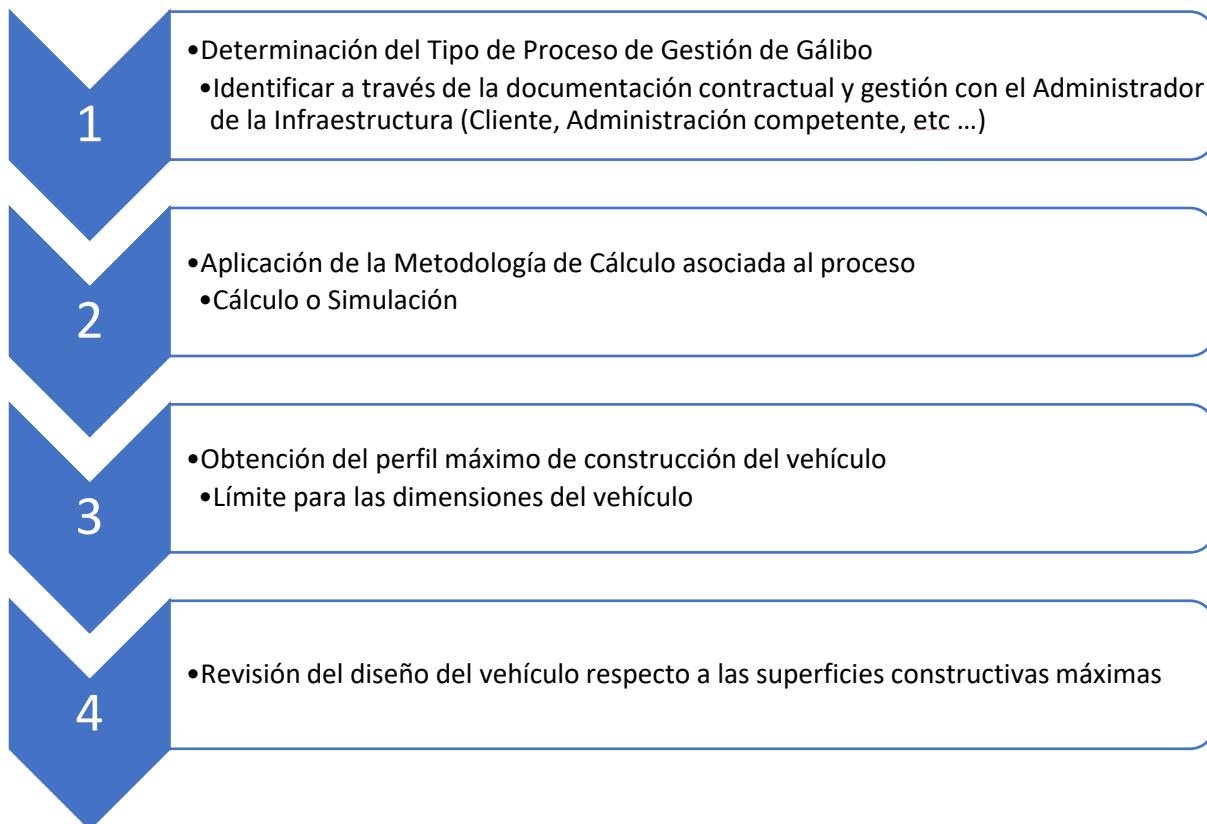


Ilustración 2.1 Apartados fundamentales de un proyecto de gálibo para un vehículo ferroviario.

2.1 TIPOS DE PROCESOS DE GESTIÓN DE GÁLIBO

La determinación del proceso a seguir en un Proyecto ferroviario depende tanto de la tipología del vehículo, como de la línea a la que va a estar destinada el vehículo (si la línea es de nuevo proyecto o si ya está siendo empleada por vehículos existentes).

En la mayoría de proyectos ferroviarios, la determinación del gálibo del vehículo y su validación con respecto a la infraestructura existente (o proyectada) viene impuesta en el pliego de condiciones, documento redactado por el cliente del proyecto.

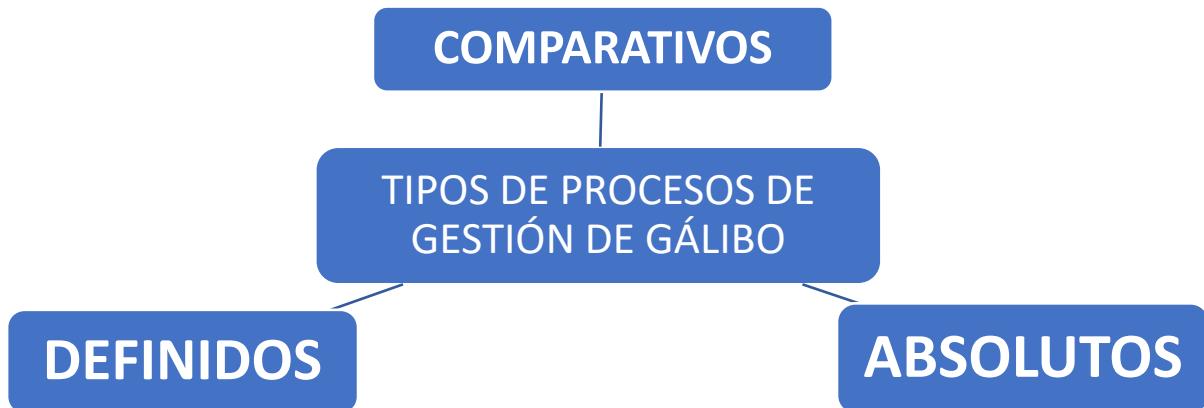


Ilustración 2.2 Tipos de procesos de gestión de gálibo.

2.1.1 Comparativos:

En proyectos destinados a una red existente con una tipología de vehículo muy similar, es posible garantizar la compatibilidad con la infraestructura si el perfil máximo del vehículo es capaz de inscribirse en el perfil del material rodante actual.

El proceso se encuentra fundamentado en comparar la envolvente cinemática del material rodante objeto de diseño, con la equivalente de un vehículo que circula por la infraestructura.

No requiere conocimiento de la infraestructura, pero sí del vehículo de referencia (comparador):

- Conociendo sus dimensiones y los parámetros determinantes de su comportamiento dinámico (juegos, rigidez y disposición de la suspensión, masa, etc. ...)
- Conociendo su envolvente y las hipótesis en las que ha sido determinada.

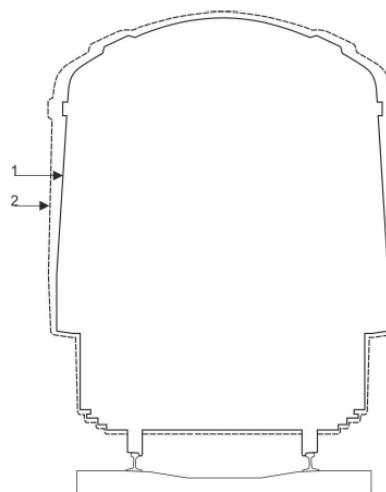


Ilustración 2.3 Muestra de gálibo comparativo. El perfil del vehículo en proyecto se compara contra el perfil del vehículo existente en la línea. Fuente: EN15273

2.1.2 Definido:

Proceso de Gálibo enfocado a reducir en mayor o menor medida la necesidad de conocer el diseño y mantenimiento de la infraestructura para poder determinar el perfil constructivo máximo del material rodante y viceversa.

El proceso se encuentra fundamentado en un perfil de referencia y un método de cálculo ligado al mismo, perfectamente definidos, a partir de los cuales es posible obtener de forma inequívoca:

- El perfil constructivo máximo del material rodante
- El perfil límite para la instalación fija de la infraestructura

El método de cálculo asociado al contorno de referencia para obtener el perfil de construcción del vehículo utiliza parámetros asociados al diseño y mantenimiento del vehículo

Estos métodos de cálculo pueden ser simples, como gálibos estáticos o complejos y avanzados, como simulaciones dinámicas.

2.1.3 Absoluto:

En el caso de no existir un proyecto de gálibo en la red de destino del vehículo, es posible realizar un estudio de gálibo absoluto. En éste, se genera el perfil dinámico máximo del vehículo teniendo en cuenta todos los movimientos relativos tanto al vehículo como a la infraestructura y se compara éste con las secciones pertinentes de la línea, a fin de garantizar la ausencia de interferencias.

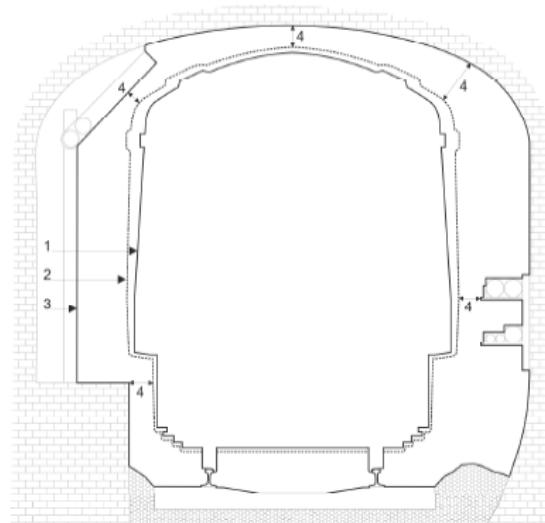
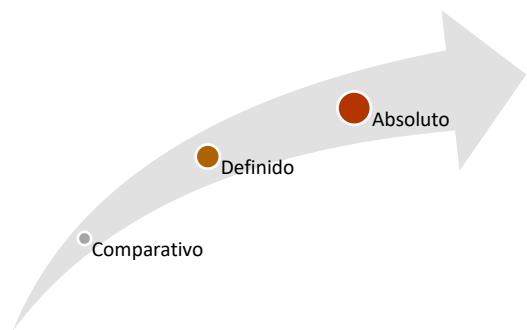


Ilustración 2.4 Conocimiento y dificultad necesario para las diferentes metodologías.

Leyenda Ilustración 2.5

1. Perfil del vehículo estático
2. Perfil dinámico del vehículo (Gálibo)
3. Perfil de infraestructura

Ilustración 2.6 Visión general de un proceso de gálibo absoluto. Fuente: EN15273

2.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO ASOCIADA AL PROCESO DE GÁLIBO

Este proceso consiste en el cálculo de los movimientos dinámicos del vehículo. La suma de estos movimientos al perfil estático del vehículo da lugar a la envolvente máxima del vehículo. Es esta envolvente la que será necesaria para comparar con la infraestructura para dar como válido el gálibo.

Para hallar el gálibo del vehículo es necesario partir del perfil estático del vehículo. En el caso que nos concierne, lo habitual es partir de un perfil genérico URBOS e ir adaptando éste mediante aquellos parámetros sobre los que se tiene cierto poder para que éste cumpla con el gálibo especificado por pliego.

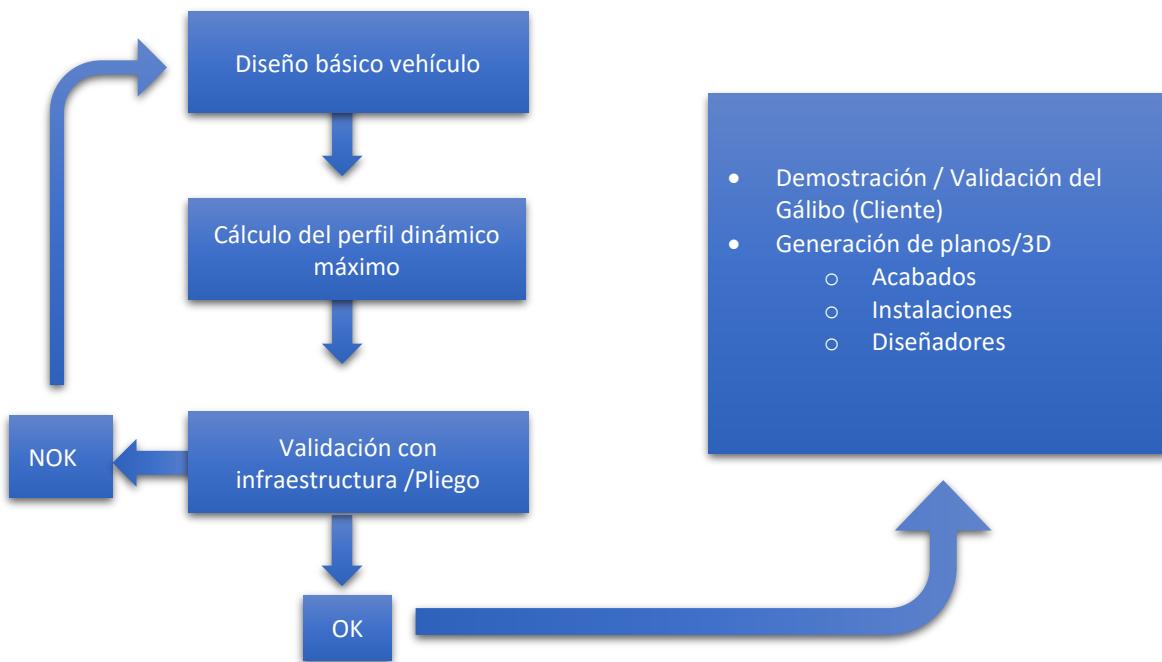


Ilustración 2.7 Diagrama de flujo de un proceso de gálibo habitual

Este proceso suele descomponerse en varias partes para las que el cálculo difiere en método de cálculo o condiciones impuestas:

- Partes bajas
- Partes laterales
- Partes altas
- Gálibo en estación (Parada)

Es importante tener en cuenta que el proceso de cálculo de gálibo no solo tiene interés de cara a la compatibilidad con la infraestructura y vehículos existentes, sino que también tiene implicaciones en el diseño del vehículo por parte de otros departamentos en la empresa.

Concretamente, en CAF, el 3D de partes bajas, así como el 3D de afilado son empleados por departamento de Instalaciones y el diseñador de cabina respectivamente para garantizar que sus diseños y colocación de equipos de bajo bastidor como compresores, sopladores de los areneros, depósitos de aceite o receptores no sobresalen del perfil máximo y por ello no presentan un riesgo para la compatibilidad.

3 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL PERFIL DINÁMICO DE ACUERDO CON LA NORMA BOSTRAB.

3.1 METODOLOGÍA

La norma BOStrab, al contrario que otras normas referencia como la UIC 505, no contiene una metodología rigurosa a seguir para el cálculo del gálibo del vehículo, sino que especifica una serie de parámetros mínimos que se han de tener en cuenta para la evaluación del galibio a partir del perfil estático del vehículo.

Estos parámetros (o también llamados factores de influencia) son evaluados de forma independiente y posteriormente son sumados de acuerdo con su origen para dar lugar al perfil dinámico de la unidad.

Corresponde al constructor del vehículo la evaluación de los desplazamientos a partir de los factores de influencia, aunque la norma contiene una metodología en líneas generales. Esto es, para un vehículo ferroviario general (coche de dos bogías), tipología con unos movimientos absolutamente diferentes a los movimientos que tienen lugar en unidades articulares como el Urbos 100.

Es por ello por lo que, en este trabajo de fin de grado, será necesario interpretar cada uno de estos desplazamientos y adaptarlos al tranvía siendo evaluado, para la correcta implementación de la norma en la herramienta.

Además, habrá que introducir aquellos fenómenos que la BOStrab no considera, pero que si tienen lugar en los vehículos aquí estudiados.

En primer lugar, es necesario comentar la posición del vehículo en la vía, dado que esta tiene grandes afecciones en el gálibo del vehículo. Ej. tren cruzado en la vs completamente centrado.

Estas posiciones tienen su origen en la movilidad lateral (desplazamientos) en trenes de rodaje respecto al eje teórico de la vía.

Es preciso pues, valorar cada uno de los desplazamientos provocados por factores de influencia en la posición más desfavorable del vehículo en la vía, que viene a su vez determinada por la peor combinación de los desplazamientos en los bogías.

Aunque este apartado esta comentado en la norma BOStrab, es necesario la adaptación del concepto a las tipologías de vehículo aquí calculadas, dado que como se ha comentado, estas no se asimilan a lo contemplado por ésta.

3.1.1 Localización del vehículo en una curva

Como se ha comentado antes, la posición del vehículo en una curva deriva de los desplazamientos en los distintos bogies y la dirección de estos.

Para el cálculo más simple (para el vehículo teórico de 2 bogies) es importante comprender que existen 2 posiciones extremas a ser examinadas, que dan a lugar a las peores condiciones de gálibo para diferentes partes del vehículo.

Estas son:

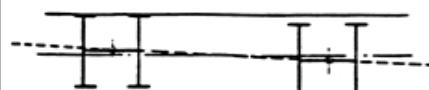
	Posición cruzada	Posición “en cuerda”
Curva		
Recta		

Tabla 3.1 Posiciones extremas de un coche de dos bogies en la vía. Fuente: BOStrab (Traducida)

En concepto de cálculo, esto será igual a sumar todos los desplazamientos posibles en direcciones opuestas para el caso de posición cruzada y a sumarlos en el mismo sentido para el caso de “cuerda”.

Es evidente que para aquellas secciones que se encuentren en empate, el cálculo más perjudicial será aquel con el vehículo en “cuerda” y para aquellas secciones alejadas del bogie (en voladizo) será necesario un cálculo en posición cruzada.

Para facilitar el cálculo de gálibo en estas posiciones, la norma BOStrab introduce en sus directrices el cálculo de “Anlenkpunkten” o factores de articulación. Estos factores aumentan el efecto de un determinado desplazamiento lateral de un bogie sobre una sección en particular para tener en cuenta las afecciones entre bogies.

Extraído de la norma BOStrab; el cálculo del factor de articulación 1 en una sección situada en el punto P es:

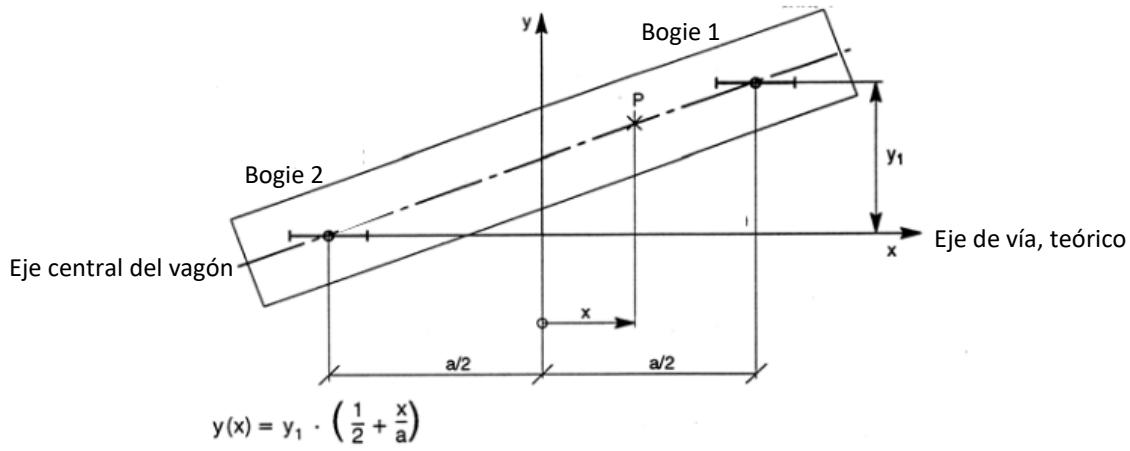


Ilustración 3.1 Cálculo de factores según la norma BOStrab. Fuente BOStrab: Traducida.

Así pues, de sufrir un desplazamiento “ y_1 ” el bogie 1, la sección en P se vería afectada por un factor de “ $f1$ ”.

Es sencillo ver, que el factor es tan solo una medida geométrica de cercanía de un punto o a otro. De situarse la sección P en el bogie 1, por ejemplo, el factor del bogie 1 sería:

$$f1 = \frac{1}{2} + \frac{x}{a} = \frac{1}{2} + \frac{\frac{a}{2}}{a} = 1$$

(Esta aproximación es posible dado que $y \ll a$)

Lo cual es coherente, dado que una sección situada en un bogie solo se puede ver afectada por el bogie sobre el que sitúa.

Se puede ver también, y está demostrado en la página 40 de la Norma de gálibo BOStrab, que el factor respecto al otro bogie, para este caso, no es más que el complementario;

$$f2 = 1 - f1$$

Así pues, referenciándonos al anterior caso, un punto P situado en una sección sobre el bogie 1, se verá afectada por $1-1=0$ de los desplazamientos que ocurran en el bogie 2.

Una vez tenido estos factores en cuenta, es necesario saber cómo emplearlos para el cálculo del vehículo en posición de “cuerda” o en posición cruzada.

En el caso de una sección en empate, el peor gálibo lo dará la suma de ambos desplazamientos en el bogie 1 y 2 simultáneamente:

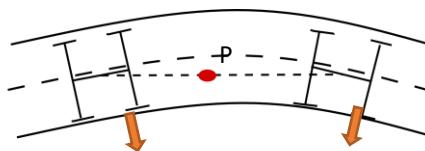


Ilustración 3.2 Disposición del vehículo en cuerda.

Por tanto, para el caso de una sección que se encuentre entre 2 bogies o articulaciones, los desplazamientos habrán de sumarse de manera simultánea. Debido a que estos desplazamientos son los mismos (mismas condiciones de cálculo y bogies en una misma unidad), podemos sencillamente multiplicar este desplazamiento por 1 para sumárselo al punto P.

De cara a la programación de algoritmos, y siendo que los factores son complementarios, podremos multiplicar el desplazamiento por la suma de ambos factores, dado que este siempre será igual a 1.

Para el caso de una sección en voladizo, en cambio, la posición del vehículo más perjudicial será la suma de los desplazamientos en direcciones opuestas.

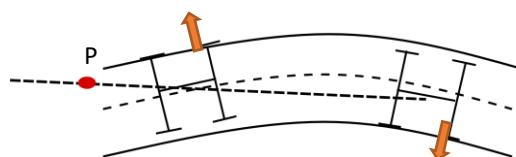


Ilustración 3.3 Disposición del vehículo en posición cruzada.

Gráficamente se puede comprobar, que efectivamente el punto P se verá afectado en gran medida por un desplazamiento en el bogie más cercano (de hecho, el factor será mayor que 1). Así pues, un desplazamiento en el bogie más lejano en la misma dirección devolverá el caso a uno del vehículo en “cuerda”, mientras que en la dirección opuesta agravará aún más el efecto.

Dado que como se ha dicho anteriormente, los desplazamientos en ambos bogíes son iguales, bastará con multiplicar el desplazamiento por la suma del valor **absoluto** de los factores de articulación de esa sección.

Esta suma del valor absoluto de los factores de articulación respecto de una sección se le denominara aquí en adelante **factor de articulación suma**, o **f_{SUMA}**.

3.1.1.1 *Adaptación del cálculo de factores de articulación a los vehículos CAF.*

La norma BOStrab, al igual que casi todas las normas de gálibo, solo contempla el caso más general (y sencillo), siendo este el coche de dos bogíes. En cambio, la arquitectura de los vehículos ligeros actualmente en fabricación por la empresa CAF presentan articulaciones entre los módulos, haciendo que el caso general no pueda ser utilizado sin antes ser adaptado. Dado que URBOS 100 y URBOS AXL presentan arquitecturas diferentes, se realizará la adaptación a cada vehículo por separado.

3.1.1.1.1 URBOS 100

Las unidades de la tipología Urbos 100 son articuladas, con movimiento libre en el eje vertical entre módulos. Esto implica que cualquier acción sobre un bogie no tiene una repercusión inmediata en otro módulo que no sea el propio. Por ello, una sección localizada en un módulo cabina o un módulo R solo se puede ver afectada por los desplazamientos en su propio bogie, siendo por lo tanto el factor de articulación suma siempre 1.

Para el caso de una sección en empate (módulo suspendido S), la configuración del vehículo más perjudicial para el gálibo es la de “cuerda”, y por ello el factor suma también será de 1, tal y como se ha visto anteriormente.

SECCIÓN URBOS 100		Factores de articulación
MÓDULO S		$f_{SUMA} = 1$
MÓDULOS R, C		$f_{SUMA} = 1$

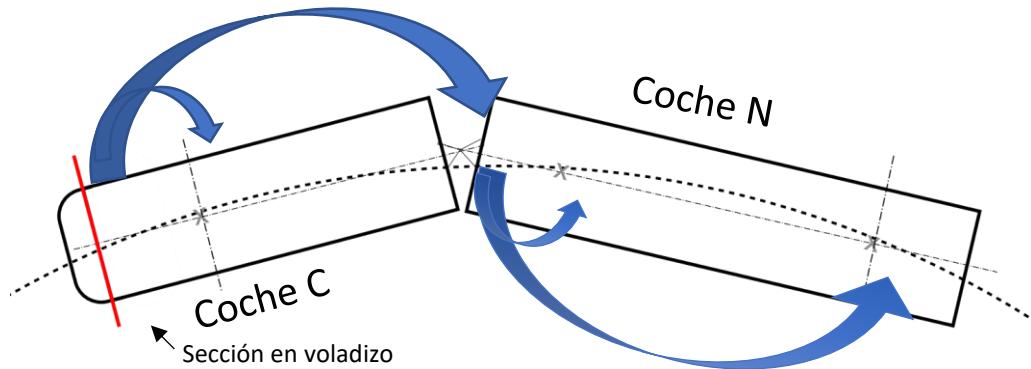
Tabla 3.2 Factores de articulación para Urbos 100.

3.1.1.1.2 URBOS AXL

En el caso del URBOS AXL, los módulos o coches sí tienen posibilidad de giro libre. Para el caso de una sección localizada en el módulo N, el cálculo será exacto al general de la norma, puesto que solo dependerá de los desplazamientos en los bogíes de su coche.

Para módulos articulados, como el C o el R, en cambio, se verán afectados tanto por los desplazamientos del bogie en C como por los desplazamientos de la articulación, que a su vez se ve afectada por los movimientos de los bogíes en N.

En este caso específico, los movimientos de un punto en la sección de cabina se ven afectados por los movimientos del bogie y de la articulación N-C



Los movimientos de la articulación vienen determinados a su vez por los movimientos en los bogies de N

Ilustración 3.4 Empleo de los factores de articulación en Urbos AXL.

Así pues, para cada sección será necesario calcular sus factores respecto a los puntos de apoyo del coche que pertenece, y si el movimiento de uno de los puntos viniera determinado por otro coche, los factores de éste.

3.1.1.1.2.1 Ejemplo demostración del cálculo de factores en Urbos AXL.

Como ayuda para la visualización de este concepto, se ejemplifica el cálculo de factores para la sección en cabina del módulo C del tranvía de Tallin.

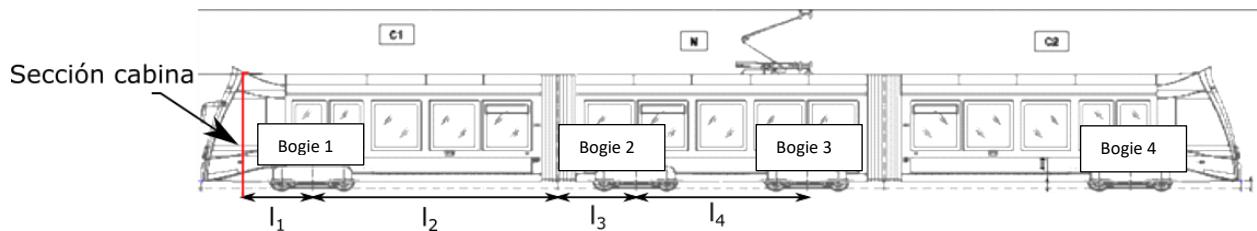


Ilustración 3.5 Distancias empleadas y numeración de bogies en este cálculo ejemplo.

Donde:

- l_1 : 2200 mm
- l_2 : 7300 mm
- l_3 : 2300 mm
- l_4 : 5100 mm

Empleando la formulación de la norma, los factores serán:

$$f_{\text{BOGÍE } 1} = \frac{1}{2} + \frac{x}{a} \xrightarrow{a=l_2} \frac{1}{2} + \frac{l_1 + \frac{l_2}{2}}{l_2} = \frac{1}{2} + \frac{2200 + \frac{7300}{2}}{7300} = 1.30$$

$$f_{\text{ARTICULACIÓN } C1-N} = 1 - f_{\text{BOGÍE } 1} = -0.30$$

Dado que los desplazamientos en la articulación están gobernados por los bogíes 2 y 3, será necesario calcular el factor de estos respecto de la articulación C1-N:

$$f_{\text{BOGÍE } 2, \text{ respecto de la articulación}} = \frac{1}{2} + \frac{x}{a} \xrightarrow{a=l_4} \frac{1}{2} + \frac{\frac{l_3+l_4}{2}}{l_4} = \frac{1}{2} + \frac{2300 + \frac{5100}{2}}{5100} = 1.451$$

$$f_{\text{BOGÍE } 3, \text{ respecto de la articulación}} = 1 - f_{\text{BOGÍE } 2} = -0.451$$

Trasladando estas afecciones sobre la articulación a la sección de cálculo (cabina):

$$f_{\text{BOGÍE } 2} = f_{\text{ARTICULACIÓN } C1-N} \cdot f_{\text{BOGÍE } 2, \text{ respecto de la articulación}} = -0.30 \cdot 1.451 = -0.435$$

$$f_{\text{BOGÍE } 3} = f_{\text{ARTICULACIÓN } C1-N} \cdot f_{\text{BOGÍE } 3, \text{ respecto de la articulación}} = -0.30 \cdot -0.451 = 0.135$$

El bogie 4 no está enlazado con el módulo C, luego: $f_{\text{BOGÍE } 4} = 0$

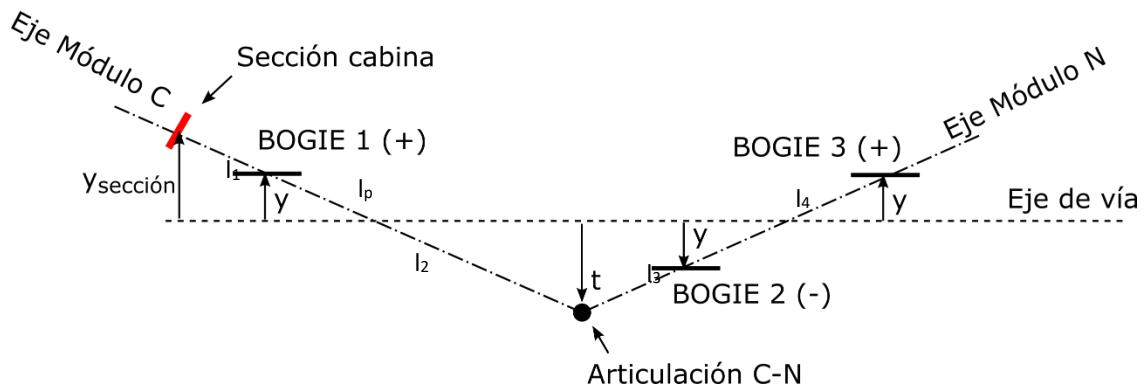
Así pues, el f_{SUMA} será:

$$f_{\text{SUMA}} = |f_{\text{BOGÍE } 1}| + |f_{\text{BOGÍE } 2}| + |f_{\text{BOGÍE } 3}| + |f_{\text{BOGÍE } 4}| = 1.87$$

Lo que se traduce en que un desplazamiento en los bogíes de valor y afectará en la peor combinación posible 1.87 veces más a la sección cabina.

Gráficamente podemos demostrar toda esta formulación si dibujamos lo calculado anteriormente:

(El signo del factor da el sentido del desplazamiento en cada bogie):



Aplicando semejanza de triángulos:

$$t = \frac{-y}{\frac{l_4}{2}} \cdot \left(l_3 + \frac{l_4}{2} \right) = -1.902 \cdot y$$

$$l_p = \frac{y \cdot (l_2 - l_p)}{-t} \Rightarrow l_p = \frac{y \cdot l_2}{y - t} = \frac{y \cdot l_2}{y + 1.902 \cdot y} = 2515.51 \text{ mm}$$

$$y_{\text{sección}} = y \cdot \frac{l_1 + l_p}{l_p} = 1.87 \cdot y$$

Demostrando así el origen de la metodología de los *Anlenkpunkten*, sobre la cual, a modo de crítica, la formulación BOStrab profundiza muy poco en origen y uso, y nada en su ampliación a unidades articuladas.

Por último, es necesario pasar la formulación anterior de los ejes de coordenadas empleados en la norma (centro de coche) a los ejes de cálculo en la herramienta informática, que por comodidad a la hora de programación se encontrarán en una de las articulaciones en dirección al interior del módulo:

$$f1 = \frac{1}{2} + \frac{x}{a} = \frac{1}{2} + \frac{-x' + \frac{a}{2}}{a} = \frac{a - x'}{a}$$

3.1.2 Selección de perfiles estáticos del vehículo

Si bien es necesaria para comparar con la infraestructura la envolvente dinámica del vehículo completo, ésta viene dada por aquellas secciones que sobresalen más en una curva, tanto como para el interior como para el exterior de la curva. Estas secciones constituyen por tanto las secciones más perjudicadas del tranvía y serán sobre las que se calcula el gálibo del vehículo.

Por ello, la envolvente dinámica de la unidad para una curva vendrá determinada por aquellas secciones que en curva tienen los mayores salientes geométricos. Para el caso interior de curva, será por tanto la sección que se encuentra situada en el centro del empate de caja. Para el caso de curva exterior será la sección de voladizo o cabina.

No obstante, debido a que estas secciones difieren entre si (a menudo la sección de cabina incorpora otros elementos salientes como cámaras), será necesario hallar el perfil dinámico para ambas y su superposición para cada uno de los casos de curva (interior o exterior), a fin de hallar la envolvente absoluta.

Adicionalmente, es necesario introducir cualquier sección que incorpore elementos que sobresalgan, para obtener con seguridad este perfil dinámico máximo.

Para el caso de Urbos 100, estas secciones más desfavorables son la sección de cabina y la sección de semiempate del coche S. Si el empate de caja se mantiene, la envolvente producida por la sección central S de un URBOS 5 módulos será la misma que la sección central del coche S3 del Urbos 7 módulos. Existe además simetría en el vehículo, por lo que es suficiente el análisis de medio vehículo para el gálibo lateral.

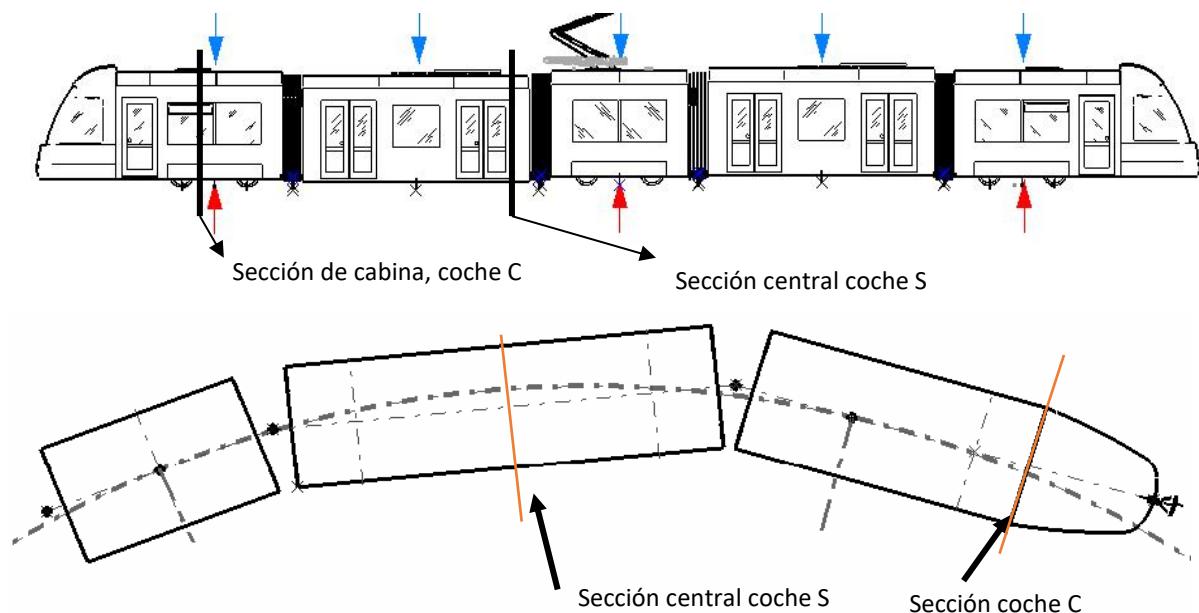


Ilustración 3.6 Secciones tipo obligatorias empleadas para hallar la envolvente de gálibo en el caso de un vehículo Urbos 100.

Para el caso del URBOS AXL, las secciones a escoger son todas las de semiempate, así como las secciones de los voladizos.

Una peculiaridad es la existencia de secciones centrales en los módulos C y R cuyos salientes interiores en curva son mayores que el producido por el empate del N, y por ello han de ser incluidas al cálculo de gálibo. La localización de estas secciones respecto de la articulación depende de la geometría del vehículo:

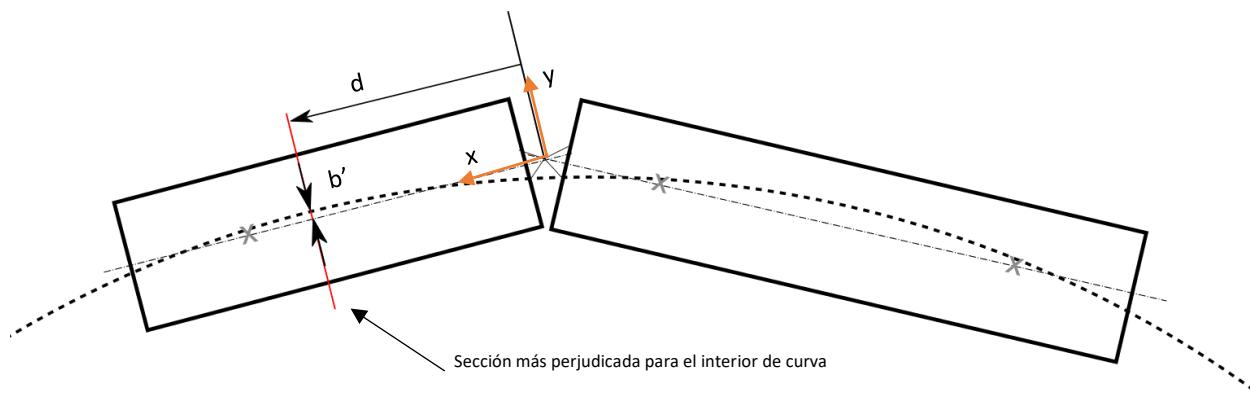


Ilustración 3.7 Para el Urbos AXL, la sección más perjudicada en el interior de una curva no tiene por qué corresponderse con el semiempate de caja, tal y como puede verse en el diagrama.

Siendo el origen de coordenadas en el extremo del módulo articulado, tal y como se ve en la figura, y estando este inscrito en una curva de radio R, con centro en (x_c, y_c) , el saliente de curva a lo largo del módulo vendrá dado por:

$$b' = R - \sqrt{(x - x_c)^2 + y_c^2}$$

Maximizando b;

$$\frac{db'}{dx} = \frac{d}{dx} \left(R - \sqrt{(x - x_c)^2 + y_c^2} \right) = \frac{(x - x_c)}{\sqrt{(x - x_c)^2 + y_c^2}} = 0 \rightarrow x = x_c$$

Lo cual era esperable, dado que esta inscripción representa una cuerda y su flecha máxima se encuentra en la mitad de esta.

Así pues, la posición de estas secciones depende solo de la geometría del vehículo y para hallar ésta bastará con saber el centro de la curva donde se inscribe el módulo (cuyo cálculo se razonará más adelante).

Dado que las posiciones de estas secciones no son conocidas hasta que toda la geometría del vehículo ha sido introducida, éstas se preguntarán al usuario del programa justo antes de iniciar el cálculo.

En total, son necesarias 5 secciones para el vehículo AXL de 3 módulos y 8 secciones para el vehículo de 4 módulos.

3.1.3 Factores de influencia BOStrab

Los llamados factores de influencia pueden ser debidos al vehículo o a la infraestructura. Se clasifican en factores casuales y no casuales. Los factores no casuales son considerados como probables y por ello son combinados aritméticamente.

Ejemplos de factores considerados como **no casuales** son juegos, desgastes o recorridos de suspensión, ya sean en carga o en vacío.

Por otro lado, los efectos de los factores **casuales** son aquellos que se considera poco probable que actúen en combinación y son por ello sumados como la raíz cuadrada de la suma de sus cuadrados apoyándose en la ley de Gauss de la propagación de errores. Ejemplos de factores casuales son tolerancias, fuerzas externas (viento lateral por ej.) o efectos dinámicos.

3.1.4 Composición del gálibo del vehículo

Como se ha dicho anteriormente, el gálibo final del vehículo se compondrá del ancho del vehículo, del saliente geométrico en curva y de los efectos debido a factores de influencia casuales y no casuales.

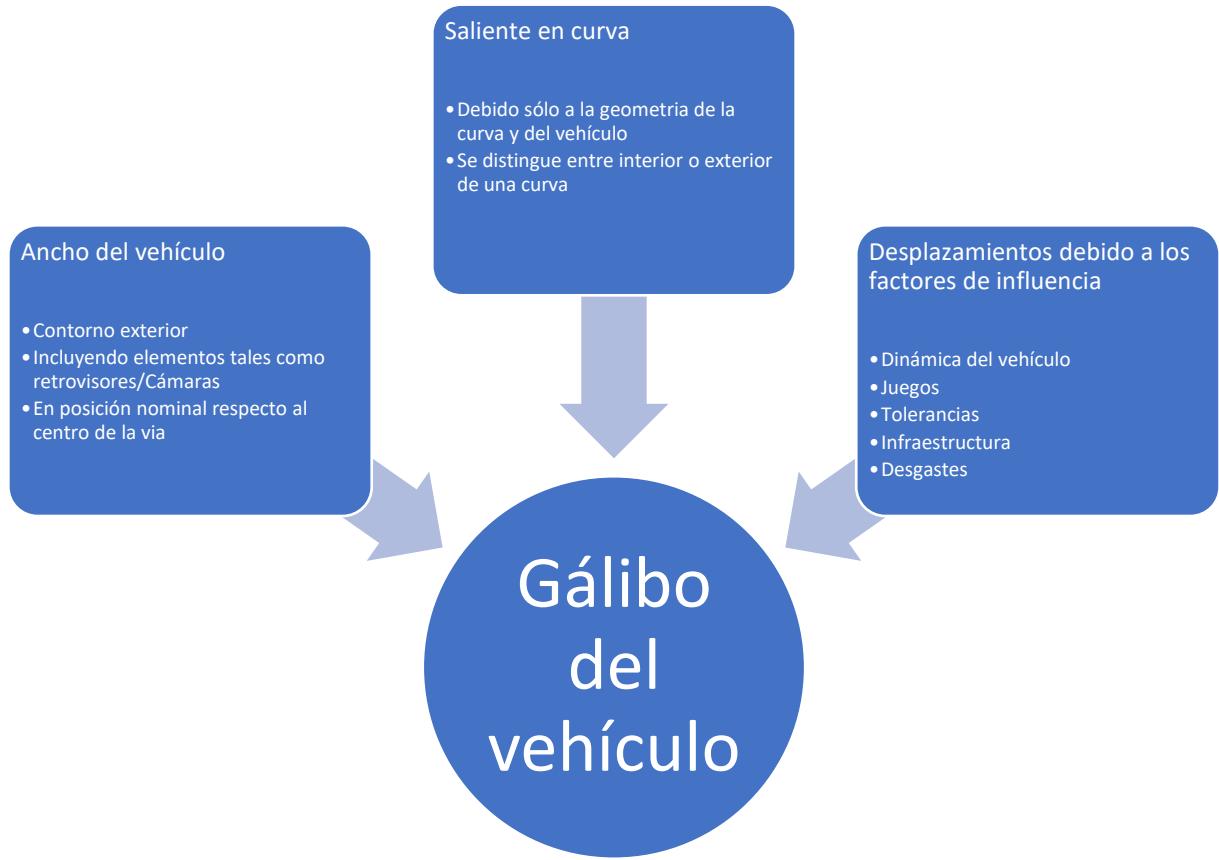


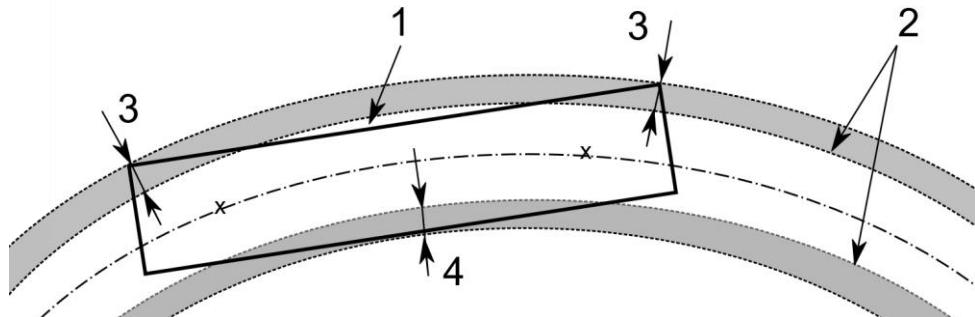
Ilustración 3.8 Composición del perfil dinámico del vehículo.

Con esto en mente, podemos comenzar a analizar todos los movimientos considerados por la norma BOStrab, y adaptar su cálculo a los vehículos que en este proyecto nos conciernen:

3.2 SALIENTE GEOMÉTRICA DEL VEHÍCULO

3.2.1 Introducción

La propia geometría de un vehículo en una curva provoca un saliente en la zona situada entre los empates de bogíes, así como en las zonas más alejadas.



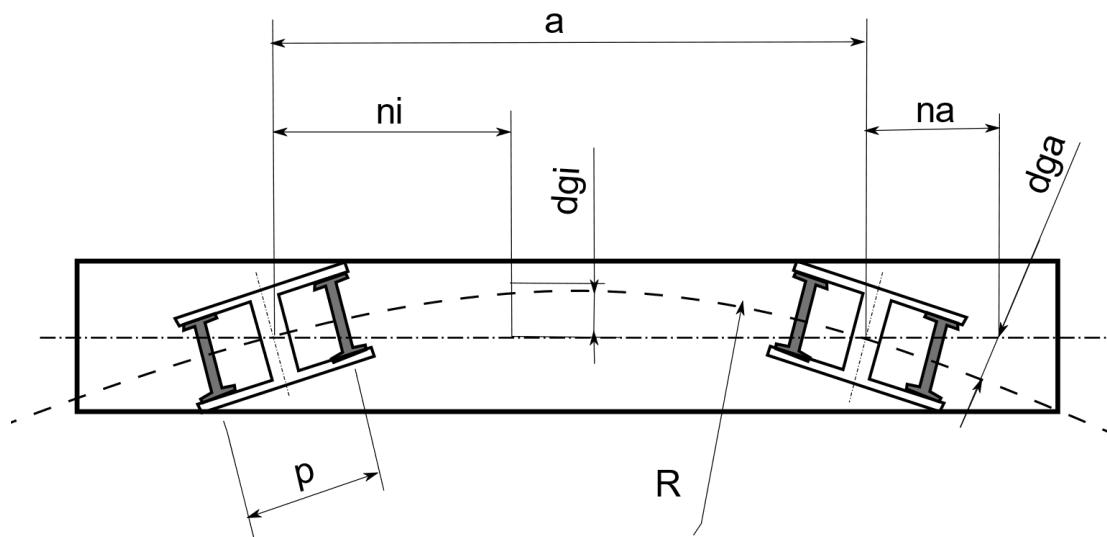
Referencia

1. Contorno del vehículo.
2. Perfil del vehículo estático a lo largo de la curva.
3. Proyección del vehículo hacia el exterior de la curva.
4. Proyección del vehículo hacia el interior de la curva.

Ilustración 3.9 Inscripción típica de un vehículo ferroviario en curva y sus proyecciones.

Estos salientes son considerados solo en geometría, es decir, con el vehículo en posición nominal en la vía y con valores nominales. Dependen, además, tanto de la curva (curva en transición recta-curva o curva pura) como de la arquitectura del vehículo.

El cálculo **general** de estos salientes es bien conocido;



Para ambos empates de bogie iguales, el saliente en una sección situada en un empate es:

$$dgi = \frac{a \cdot ni - ni^2 + \frac{p^2}{4}}{2R}$$

El saliente para una sección en voladizo:

$$dga = \frac{a \cdot na + na^2 - \frac{p^2}{4}}{2R}$$

Esta formulación simplificada contiene un error para ambos casos de:

$$Error = \frac{a^2 * (a + n)^2}{8R^3}$$

La justificación de la formula y error se encuentra en la norma de gálibo europea EN 15273-1, ampliada en EN 15273-2.

3.2.2 Antecedentes en el cálculo de los salientes laterales para URBOS 100 y AXL.

La formulación anterior no es válida para los tranvías objeto de este proyecto debido a que además del error, su arquitectura no se corresponde con la genérica de la norma.

La formulación actual empleada por CAF para el cálculo de los salientes geométricos se expone a continuación.

Antes de comenzar, conviene comentar que es posible distinguir entre el saliente provocado por el empate de bogie y el saliente debido a la propia inscripción del vehículo en la curva. Así pues, por comodidad, trabajaremos con el saliente geométrico del bogie y el saliente debido al vehículo por separado.

3.2.2.1 *Saliente geométrico del bogie*

Debido al empate del bogie, éste experimenta también durante la inscripción en curva un saliente geométrico hacia el interior de la curva.

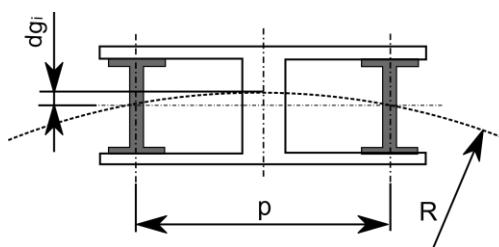


Ilustración 3.10 Saliente en curva (dgi) interior de radio R debido al empate de bogie p.

Siendo el saliente hacia el interior de la curva:

$$dgi = R \cdot \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \frac{p}{2 \cdot R} \right) \right) \cong \frac{p^2}{8R} \quad (\text{Justificación en EN 15273})$$

Emplearemos la formulación no simplificada, para evitar errores

3.2.2.2 Saliente geométrico del vehículo

Este depende de la arquitectura del vehículo, por lo que se analizan por separado:

3.2.2.2.1 URBOS 100



Ilustración 3.11 Nomenclatura de módulos en Urbos 100.

En el caso del URBOS 100, toda articulación entre módulos permite el giro respecto al eje vertical del vehículo.

Para el vehículo en posición nominal (sin tener en cuenta el empate de bogie), su eje coincide con el eje de la vía (o en caso de curva, es tangente a este).

Con esa premisa, es posible calcular el saliente geométrico en módulos con bogie (R y C):

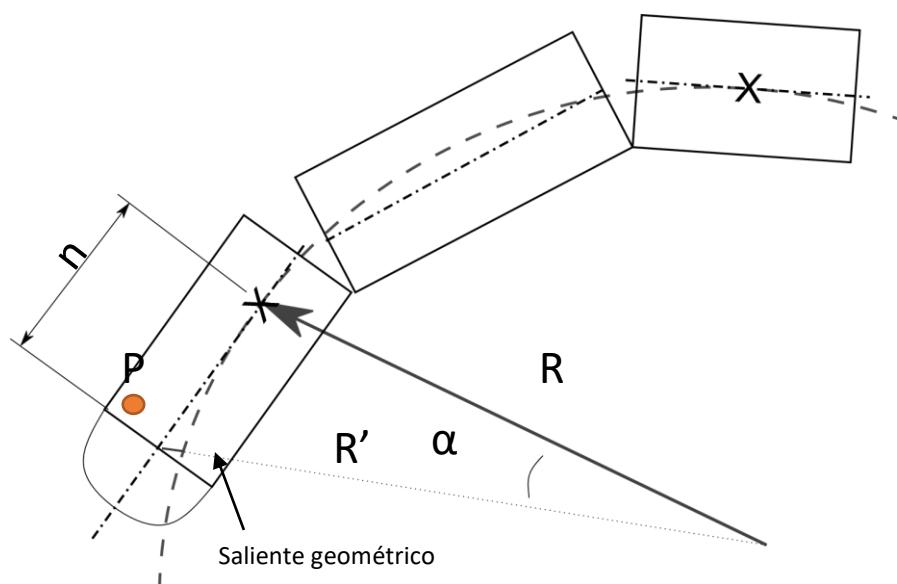


Ilustración 3.12 Calculo del saliente geométrico para un módulo cabina.

El saliente geométrico de un punto P será la diferencia entre R' y R .

Siendo el ángulo entre R y R' :

$$\alpha = \tan\left(\frac{n}{R}\right)$$

Luego R' :

$$R' = \frac{R}{\cos(\alpha)}$$

Finalmente, el saliente geométrico debido al vehículo será:

$$b', \text{vehículo} = R' - R = R \cdot \left(\frac{1}{\cos(\alpha)} - 1 \right)$$

Siendo de signo (+) para el exterior de una curva y (-) para el interior.

Incluyendo el saliente debido al empate de bogie, la formula quedará:

$$b' = R \cdot \left(\frac{1}{\cos(\alpha)} - 1 \right) - R \cdot \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \frac{p}{2 \cdot R} \right) \right)$$

Para módulos suspendidos, si la distancia bogie/articulación es siempre la misma, como es en los vehículos Urbos, su saliente vendrá dado por aquel de sus articulaciones:

Siendo b'_{arti} el saliente geométrico de la articulación C-S, calculado mediante la ecuación anterior y l la distancia de la articulación al centro del módulo S, el saliente geométrico de un punto P en el módulo suspendido será la diferencia entre R y R' .

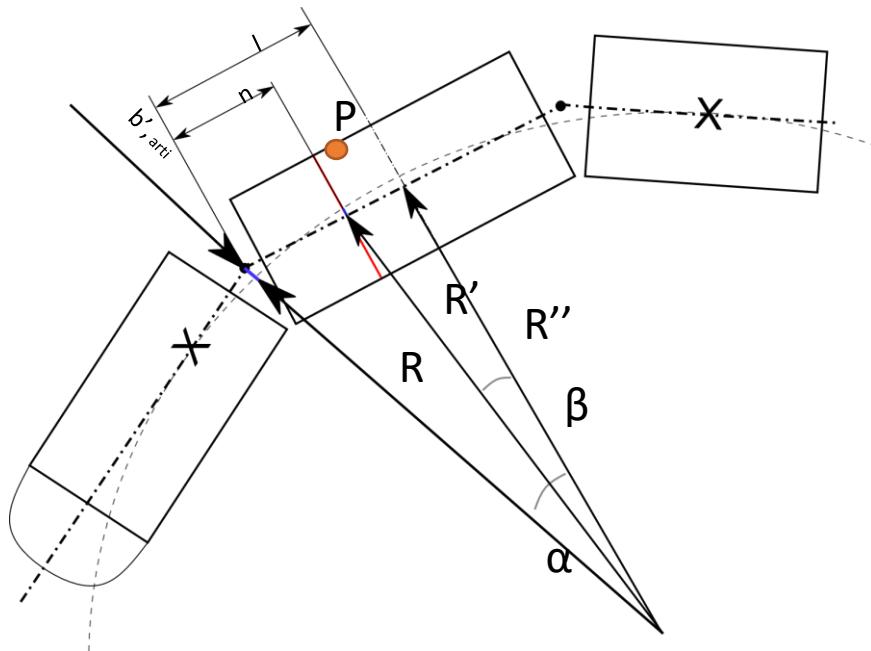


Ilustración 3.13 Inscripción del conjunto módulos C, S y R en una curva horizontal de radio R.

Hallando α :

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{l}{R + b'_{\text{arti}}} \right)$$

Luego R'' :

$$R'' = (R + b'_{\text{arti}}) \cdot \cos(\alpha)$$

Por lo que β :

$$\beta = \arctan \left(\frac{l-n}{R''} \right)$$

Finalmente, el saliente geométrico del punto P será:

$$b' = R - R' = R - \frac{R''}{\cos(\beta)}$$

La inscripción del vehículo de 5 módulos es equivalente al de 7 módulos.

3.2.2.2.2 URBOS AXL



Para la variante del URBOS AXL, existe una metodología de cálculo descrita en la norma EN 15273-5 “Railway applications — Gauges — Part 5: Background, complementary information and calculation examples” pág. 131. que es aplicable para el cálculo de los salientes geométricos del vehículo de cabina.

3.2.3 Problema con el procedimiento de cálculo tradicional.

El método de cálculo descrito anteriormente es de difícil programación. En primer lugar, exige un método de cálculo para cada tipo de tipología de vehículo (4 en total) y en segundo lugar, resulta muy costosa de implementar. Por ello, se ha propuesto generar otra forma de cálculo de salientes geométricos que permita el mismo procedimiento de cálculo para Urbos AXL y 100.

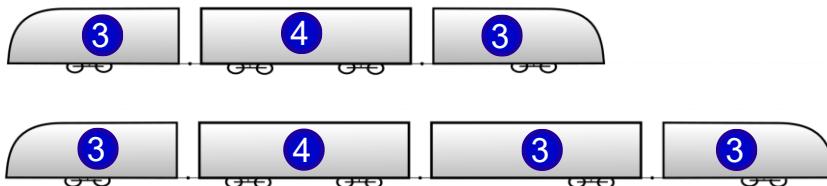
3.2.3.1 *Propuesta de formulación para el cálculo de salientes geométricos en curva horizontal*

La metodología se basará en el cálculo de los salientes en curva mediante el uso de la ecuación paramétrica de la curva. Los ejes de coordenadas se dispondrán en un extremo del vehículo para facilitar la implementación del algoritmo.

Para ello, se discretizan los vehículos en el conjunto de módulos que los conforman.

Desde el punto de vista de inscripción geométrica, existen 4 tipos de módulos:

- Módulos suspendidos
- Módulos con bogie sencillo
- Módulos con bogie y articulados
- Módulos sobre dos bogías

Urbos AXLLeyenda

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1 | Módulos suspendidos |
| 2 | Módulos con bogie sencillo |
| 3 | Módulos con bogie y articulados |
| 4 | Módulos sobre dos bogías |

Urbos 100

Ilustración 3.14 Tipos de módulos en Urbos AXL.



Ilustración 3.15 Tipos de módulos en Urbos 100.

Dado que el saliente geométrico en curva es la diferencia entre el eje del vehículo y el eje de la vía, medido en dirección al centro de la curva, es posible hallar el saliente si en primer lugar se halla el radio R' desde el centro de la curva. Tal y como se ha visto en la ilustración 3.12.

Sera necesario por tanto hallar el centro de la curva respecto a los ejes del vehículo, que por comodidad se hallan en uno de los extremos:

- Módulos suspendidos:

En los módulos S la inscripción en curva viene definida por la distancia entre articulaciones y el saliente geométrico en sus articulaciones:

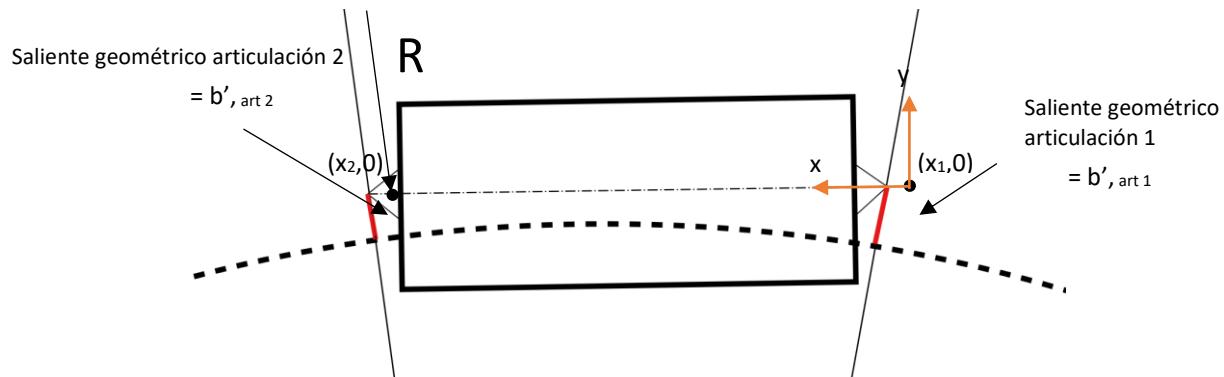


Ilustración 3.16 Inscripción de un módulo suspendido en una curva cualquiera.

Conociendo la distancia entre articulaciones y sus salientes geométricos $b',_{\text{art } 2}$ y $b',_{\text{art } 1}$ podemos hallar el centro de la curva de radio R en coordenadas cartesianas sabiendo que ambas articulaciones se encuentran a $R + b',_{\text{art } 2}$ de este.

Dado el centro de la curva (x_c, y_c) :

Articulación 1 $(x_1, 0)$:

$$(R + b',_{\text{art } 1})^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2$$

$$(R + b',_{\text{art } 1})^2 = (x_1 - x_c)^2 + y_c^2$$

Articulación 2 $(x_2, 0)$:

$$(R + b',_{\text{art } 2})^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2$$

$$(R + b',_{\text{art } 2})^2 = (x_2 - x_c)^2 + y_c^2$$

Lo que da a lugar a un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas cuyo resultado para el centro de la curva es:

$$x_c = \frac{-x_1^2 + x_2^2 - [(R + b',_{\text{art } 2})^2 - (R + b',_{\text{art } 1})^2]}{2 \cdot x_2 - 2 \cdot x_1} \quad (1)$$

$$y_c = -\sqrt{(R + b',_{\text{art } 1})^2 - (x_1 - x_c)^2} \quad (2)$$

Una vez hallado en el centro de curva respecto a los ejes de coordenadas del módulo, el saliente geométrico de cualquier punto del eje x_p será:

$$b' = R - \sqrt{(x_p - x_c)^2 + y_c^2} \quad (3)$$

- Módulos con bogie sencillo

En los módulos C y R la inscripción en curva viene definida por la posición nominal del bogie en la curva, con la caja centrada. Por tanto, la inscripción del módulo vendrá dada en exclusiva por el empate de bogie:

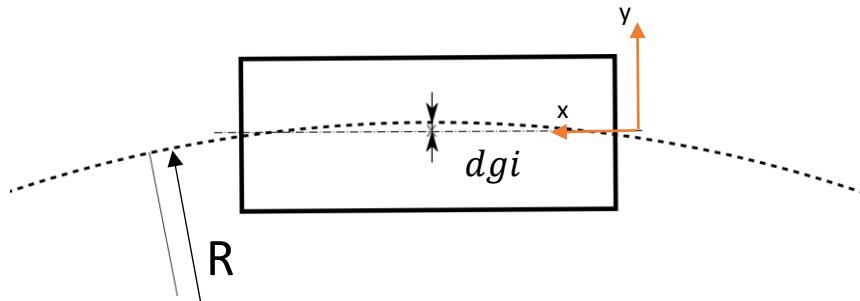


Ilustración 3.17 Inscripción de un módulo de bogie simple en curva.

Conociendo la posición del bogie x_{bogie} y su saliente d_{gj} (calculado según descrito en la sección 3.2.1.1.1) podemos obtener el centro para la curva (x_c, y_c) como:

$$x_c = x_{bogie}$$

Una vez conocido el centro, cualquier saliente se podrá calcular aplicando (3).

- Módulos con bogie y articulados:

En los módulos C y R del vehículo AXL, la inscripción en curva viene definida por el bogie y la articulación sobre la que se apoya.  v

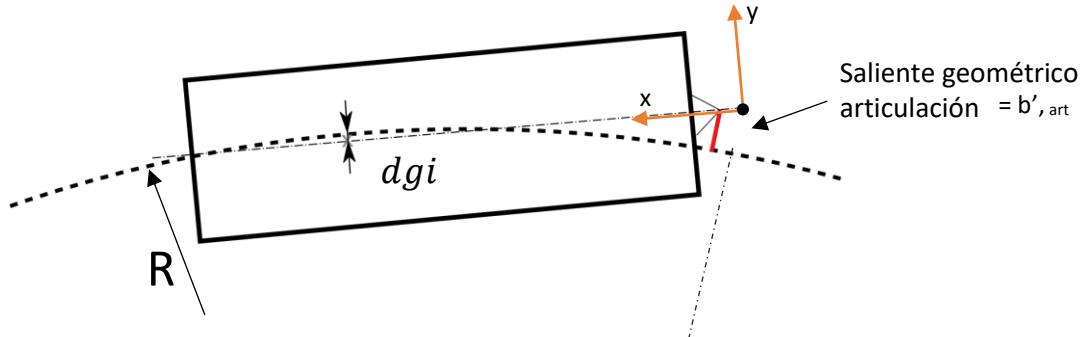


Ilustración 3.18 Inscripción de un módulo C de la tipología AXL en curva

Aplicando el mismo procedimiento que para los módulos suspendidos, (1) y (2), el centro de la curva será:

$$x_c = \frac{x_{bogie}^2 - [(R - dg_i)^2 - (R + b'_{\text{art}})^2]}{2 \cdot x_{bogie}}$$

$$y_c = -\sqrt[2]{(R + b'_{\text{art}})^2 - x_c^2}$$

- Módulos sobre dos bogíes

La inscripción del módulo N de la configuración AXL responde únicamente a su propia arquitectura.

Conocidas las posiciones de los bogíes y aplicando (1) y (2):

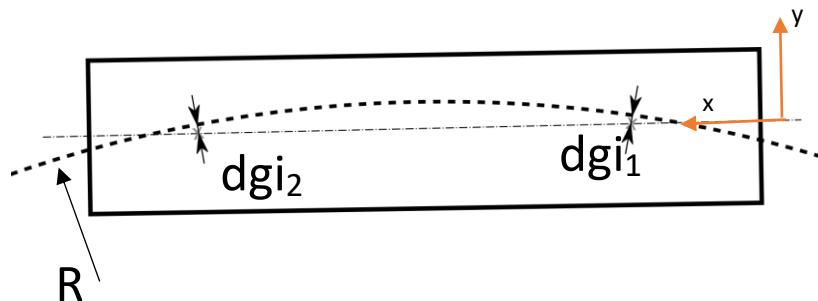


Ilustración 3.19 Inscripción de un módulo N en curva.

$$x_c = \frac{-x_{bogie\ 1}^2 + x_{bogie\ 2}^2 - [(R - dg_{i2})^2 - (R - dg_{i1})^2]}{2 \cdot x_{bogie\ 2} - 2 \cdot x_{bogie\ 1}}$$

$$y_c = -\sqrt{(R - dg_{i1})^2 - (x_{bogie\ 1} - x_c)^2}$$

3.2.3.2 *Implementación de algoritmo*

El procedimiento de cálculo de los salientes para una unidad será el siguiente:

Primero se calcularán aquellos módulos cuya inscripción solo dependa de ellos mismos (Módulos de bogie sencillo o sobre dos bogíes). Una vez calculados sus centros se hallarán los salientes de sus articulaciones, pudiéndose calcular las inscripciones de módulos articulados y suspendidos anexos.

Algorítmicamente, equivaldrá a un método de cálculo de centro de curva a partir de 2 puntos y salientes y un método iterativo sobre toda la configuración de vehículo hasta que esta esté toda calculada.

Esta metodología es válida para cualquier vehículo *estable*, es decir, cuya configuración tenga solución. Ej. Una configuración con módulos S-S es inestable por motivos obvios.

Esta metodología permitirá además en un futuro la introducción a la herramienta de cálculo de nuevas tipologías de vehículo si así se desea.

3.2.3.3 *Tipología AXL, transiciones curva-recta*

Para los salientes geométricos de un vehículo de la tipología AXL es importante tener en cuenta los efectos de la transición recta-curva.

Si la transición recta-curva es fuerte (el cambio de radio es severo) partes de los módulos articulados pueden llegar a generar gálibos interiores más restrictivos para la infraestructura que la envolvente creada por la sección de empate del módulo N.

Por ello, es necesario tener en cuenta estas transiciones para el cálculo de gálibo en curva.

Estos salientes debido a transiciones son máximos para el instante en que el módulo N comienza a tomar la curva.

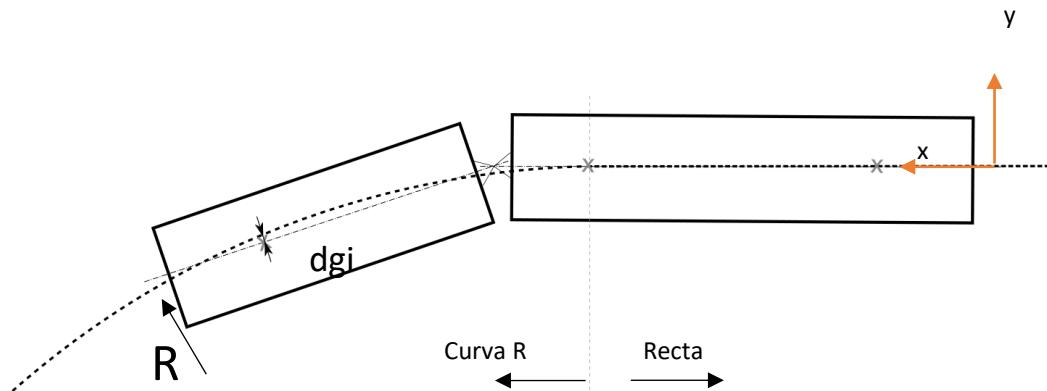


Ilustración 3.20 Módulos C y N en la peor transición recta curva posible.

En términos de cálculo bastará con calcular el centro de curva para los módulos de 2 bogies de acuerdo con la imagen anterior y proceder al cálculo con la metodología ya comentada.

$$x_c = x_{bogie\ 2}$$

$$y_c = -R$$

3.2.4 Saliente geométrica vertical

Al igual que en curvas horizontales, la inscripción del vehículo en curvas verticales también produce salientes de curva tanto en partes altas y bajas.

Las curvas verticales son distinguidas entre curvas colina y curvas valle, dado que la afección al gálibo del vehículo es distinta. Además, a menudo las líneas tienen radios mínimos diferentes para curvas colina y curvas valle.

La afección del tipo de curva en el gálibo vertical del vehículo es muy diferente, siendo ésta en forma de acercamiento a la vía para zonas en voladizo y de alejamiento para zonas en empate para el caso de curvas “valle” y viceversa para el caso “colina”.

El cálculo general para ambas curvas en vehículos tipo viene definido en todas las normas de gálibo.

3.2.4.1 Cálculo del saliente en curva colina según norma BOStrab

Extraído de la norma:

$$Z_{KU} = r_a - \sqrt{r_a^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p^2}{4} + x^2}$$

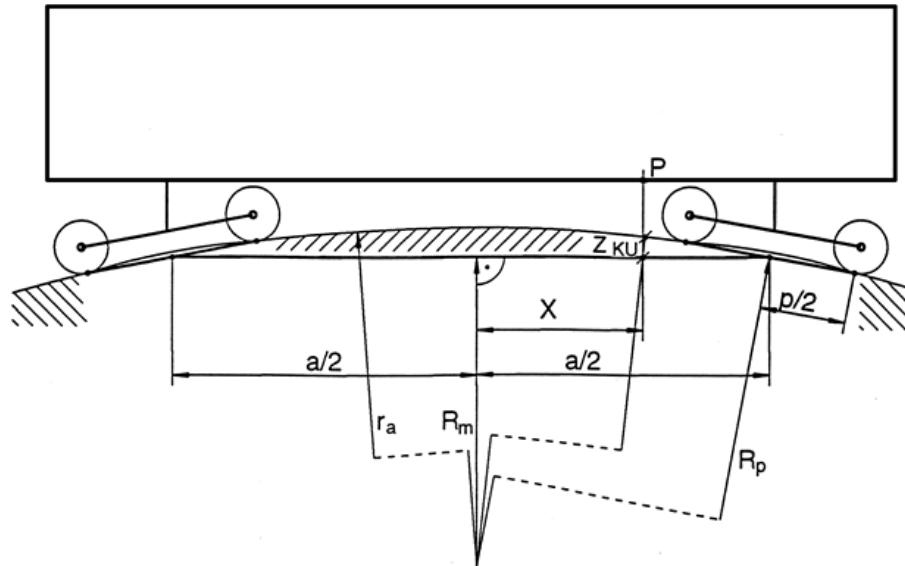


Ilustración 3.21 Salientes geométricos en curva vertical tipo "colina" Fuente: BOStrab

3.2.4.2 Cálculo del saliente en curva valle según norma BOStrab.

Extraído de la norma:

$$Z_{WA} = \sqrt{r_a^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p^2}{4} + x^2} - r_a$$

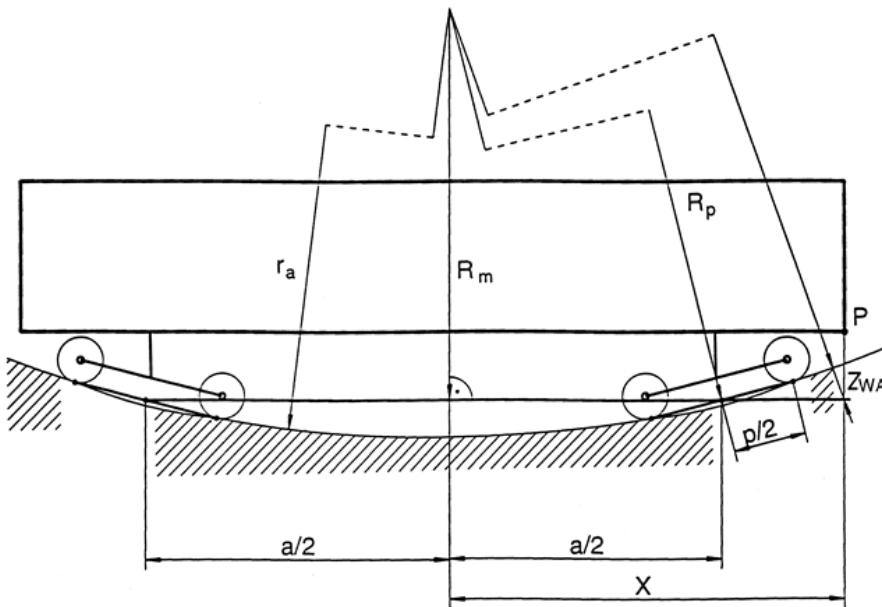


Ilustración 3.22 Salientes geométricos en curva vertical tipo "valle". Fuente: BOStrab

Al igual que ocurría con las inscripciones en curvas horizontales, la formulación necesita ser adaptada a las tipologías de vehículo aquí calculadas.

Siendo la inscripción en curva vertical un caso igual particular de la inscripción horizontal en curva, podemos adaptar la formulación generada anteriormente para el cálculo.

3.2.4.3 *Formulación para el cálculo de salientes geométricos en curva vertical*

Para adaptar la misma formulación que en curva horizontal habrá que tener en cuenta la movilidad en términos de cabeceo de los vehículos.

Para el caso de Urbos AXL, al no ser un vehículo articulado, su comportamiento en curvas verticales es el mismo que en curvas horizontales, por lo que se podrá aplicar directamente la misma formulación.

Se deberá tener en cuenta eso sí, el tipo de curva (valle-colina) que afecta a la sección de cálculo.

En el caso del URBOS 100 5 módulos, la articulación entre el módulo S1 y R es la única que permite movimiento a cabeceo, equivaliendo su inscripción en curva a dos módulos (C1, S1, R y el conjunto S2 y C2).

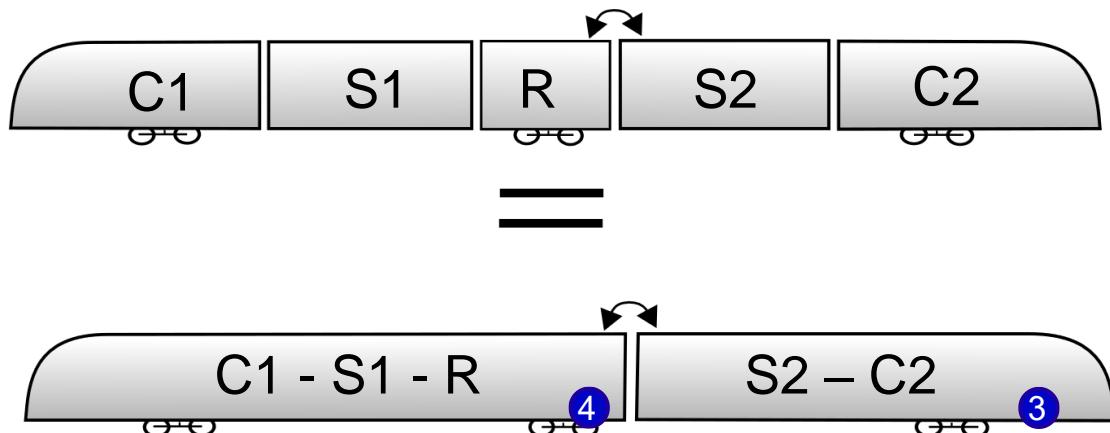


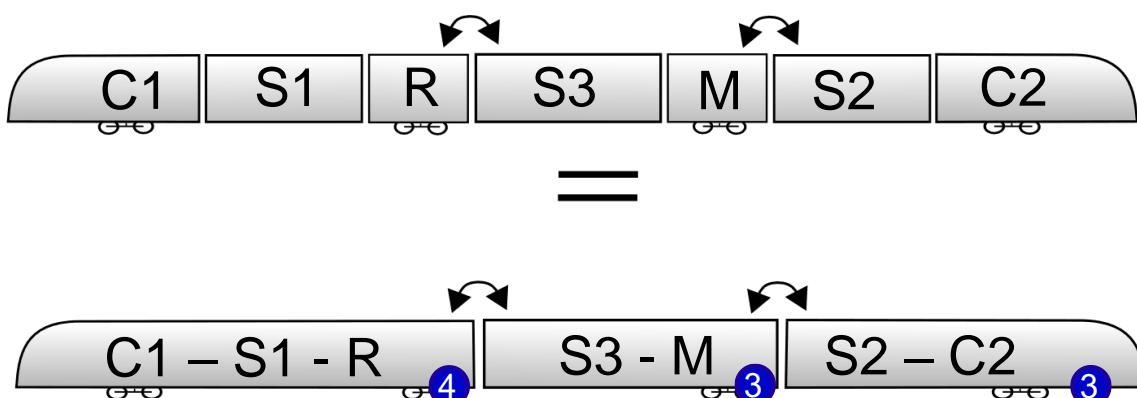
Ilustración 3.23 Equivalencia del vehículo para movimientos verticales.

Refiriéndonos a la distinción del tipo de módulo, el C-S-R se comportará como un módulo de 2 bogies mientras que el S2-C2 será un módulo con bogie y articulado.

En el caso del vehículo de 7 módulos, las articulaciones móviles a cabeceos disponen de dos posiciones opcionales:

Con la articulación móvil entre los módulos R y S3 y otra en M-S2 o con las dos entre módulos S-R.

La adopción de esta última castiga menos los voladizos en cabina, mientras que las partes bajas del módulo suspendido S3 se ven más afectadas.



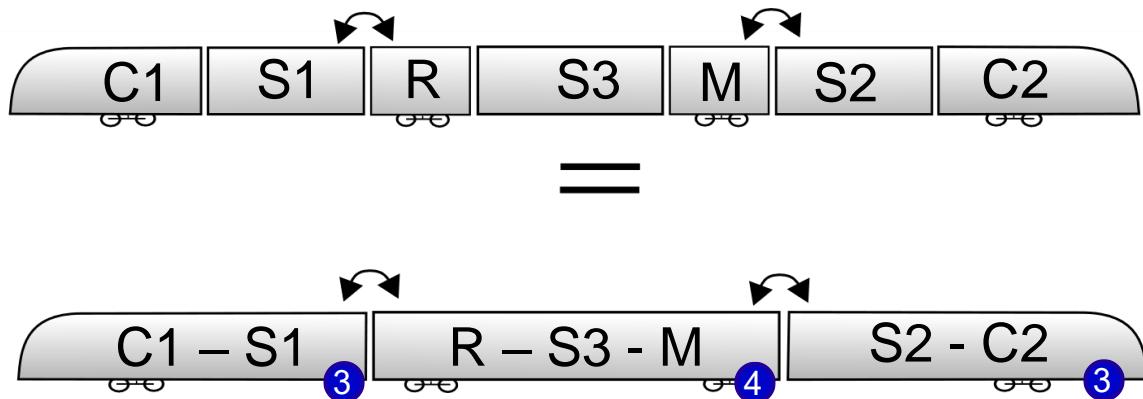


Ilustración 3.24 Ilustración 3.5 Equivalencia del vehículo para movimientos verticales para URBOS 100 7 módulos.

Una vez discretizados los módulos, el método de cálculo será el mismo que para curvas horizontales.

3.3 DESPLAZAMIENTOS DEBIDO A FACTORES DE INFLUENCIA

Los desplazamientos generados por los llamados factores de influencia son clasificados por las directrices BOStrab en desplazamientos verticales o Z's y desplazamientos horizontales o Y's.

Se presentan a continuación los diferentes desplazamientos, así como su cálculo y adaptación a las tipologías CAF. Para una mayor aclaración, se han ordenado según su origen. Este puede ser:

- Debido al juego de vía
- Debido a factores técnicos del vehículo
 - Tolerancias
 - Juegos
 - Desgastes
 - Recorridos de suspensiones
- Debido a factores técnicos de la vía
- Transposiciones debido a balanceos y cabeceos del vehículo

Estos factores de influencia han de ser considerados en su valor máximo y para la peor posición de vehículo, tal y como la norma especifica. La relación completa de los desplazamientos Y's y Z's se encuentran en el anexo II.

3.3.1 Desplazamientos debido al juego de vía

- *Yss: Desplazamiento transversal del vehículo debido al juego de vía*

El juego de vía es la distancia libre entre pestaña y carril. Para evaluar el gálibo del vehículo, éste se posiciona pestaña contra carril, es decir, con todo el juego de vía agotado. Éste se compone de:

- Juego de vía nominal (carril-pestaña).
- Desgaste de pestaña.
- Ensanchamiento de vía.
- Desgaste de carriles.

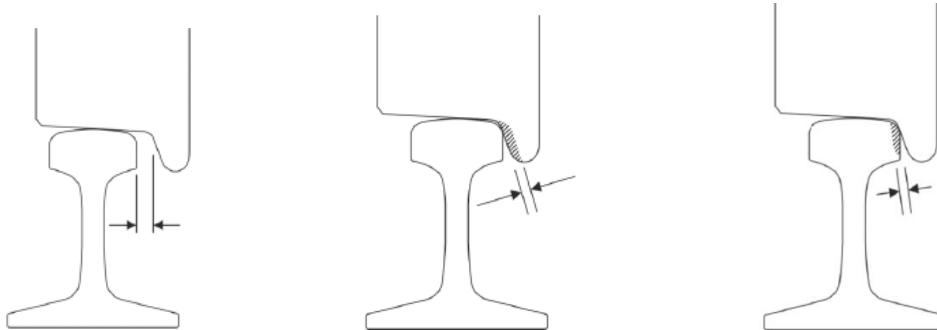


Ilustración 3.25 Izquierda: Juego carril-pestaña. Centro: Desgaste de pestaña. Derecha: Desgaste de carril.

Fuente: EN15273

En cuanto al ensanchamiento, éste puede ser asimétrico, comenzando a menudo en el lado interior de la curva, por lo que esto lleva también a un desplazamiento del centro de vía.

La norma BOStrab clasifica los ensanchamientos y deterioros laterales para curvas con radio mayores a 800 m y menores a 40m: Pese a estas recomendaciones, es habitual que dichos datos sean establecidos por el mantenedor de la vía, y sean por lo tanto éstos los que se incorporen al cálculo.

RADIO	SOBREANCHO INCLUYENDO DESGASTES LATERALES
$R \geq 800 \text{ m}$	$\Delta S = 15 \text{ mm}$ (valor ejemplo, dependerá del proyecto)
$800 \text{ m} > R > 40 \text{ m}$	Se establece como variable de acuerdo con la fórmula: $\Delta S (\text{mm}) = \frac{600}{R(\text{mm})} + 15$
$R < 40 \text{ m}$	ΔS repartido entre interior y exterior de la curva. (Valores ejemplo) <ul style="list-style-type: none"> • $\Delta S_a = 22,5 \text{ mm}$ • $\Delta S_a = 7,5 \text{ mm}$

Tabla 3.3 Sobreanchos y desgastes considerados en la norma. Fuente: BOStrab (Modificada)

El juego de vía máximo se calculará sumando el sobreancho y desgastes en interior y exterior (ΔS), el desgaste de pestaña (Δd) y la holgura de carril-rueda ($\sigma/2$)

$$\text{Juego de vía máximo: máx. } \sigma = |\Delta S_a| + |\Delta S_i| + 2 \cdot \Delta d + \sigma$$

Este juego, se divide equitativamente entre ambas partes del vehículo, por lo que respecto al semiancho se sumará la mitad del juego máximo. Además, al tener origen en las partes de rodaje del vehículo, este desplazamiento deberá ser multiplicado por el factor de articulación suma de la sección que estemos calculando para ser evaluado en la peor posición del vehículo.

Luego, el juego de vía para una sección “a”:

$$\max \sigma_a = \frac{\max \sigma}{2} \cdot f_{SUMA}$$

Por otra parte, el desplazamiento del centro de la vía real respecto al teórico será la diferencia entre los sobreanchos sumados al ancho original. A su vez, respecto al semiancho, el desplazamiento del eje será la mitad.

$$Y_{\sigma 0} = \frac{|\Delta S_a| - |\Delta S_i|}{2}$$

Finalmente, el desplazamiento a sumar a cada punto de la sección transversal del vehículo será:

$$Y_{SS} = \max \sigma_a + Y_{\sigma 0}$$

- Y_{SW} : Desplazamiento transversal del vehículo debido a la desviación del centro de la vía

La variación del desgaste a lo largo de la vía provoca la desviación del eje de la vía respecto al teórico. En posición de marcha cruzada esto lleva a un desplazamiento para secciones en voladizo mayor que el considerado, Δd .

De acuerdo con las directrices de la norma, se presupone que sus efectos sólo se consideran en un bogie.

Siendo a, el empate donde se encuentra la sección de cálculo:

$$Y_{SW} = \alpha_s \cdot a \cdot f_{Mayor}$$

3.3.2 Desplazamientos debido a factores de influencia técnicos del vehículo

3.3.2.1 Desplazamientos transversales

- y_{TR} Tolerancia de fabricación del conjunto ejes/ruedas

Ésta es la tolerancia de fabricación lateral del conjunto ruedas-bogías. Es establecido por el departamento de bogías.

Dado que afectará al vehículo a lo largo de toda su longitud, este desplazamiento también tendrá que ser multiplicado por el factor de articulación de la sección para evaluar su impacto en las secciones de cálculo.

$$Y_{TR} = Tolerancia_{Bogies} \cdot f_{SUMA}$$

- y_{TA} Tolerancia del montaje del rodamiento

Es la tolerancia lateral de los rodamientos en unión rueda-bogie y depende del rodamiento instalado. Como todo desplazamiento que tiene su origen en el bogie, ha de ser aumentado por el factor de articulación.

$$Y_{TA} = Tolerancia_{Rodamiento} \cdot f_{SUMA}$$

- y_{TD} Tolerancia del ajuste Caja/Bogie

Tolerancia lateral del ajuste de bogie con caja. Ésta depende del tipo de bogie; con corona, pivote.... En el caso de Urbos 100 este valor es 0, dado que el apoyo está en secundarias.

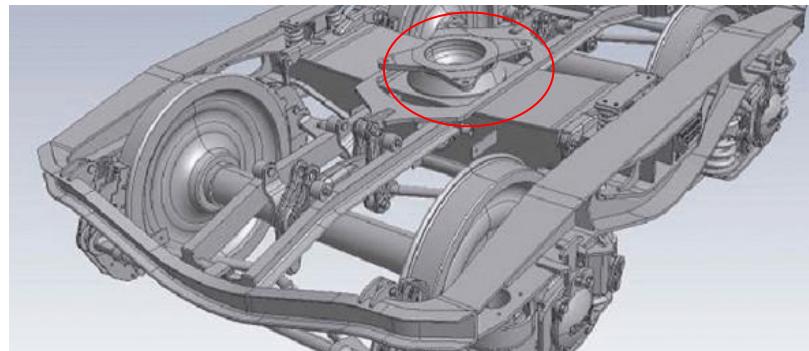


Ilustración 3.26 Bogie de tipo Y25 con conexión bogie-caja de tipo pivote. Fuente: <http://the-contact-patch.com/book/rail/r1114-railway-suspension>

El desplazamiento por sumar a un punto de una sección, al igual que en los casos anteriores, será:

$$Y_{TD} = \text{Tolerancia}_{\text{Union CAJA-BOGIE}} \cdot f_{\text{SUMA}}$$

- y_{TP} Tolerancia de la construcción de suspensión primaria

La tolerancia lateral de las gomas de la suspensión primaria.

$$Y_{TP} = \text{Tolerancia}_{\text{Primaria}} \cdot f_{\text{SUMA}}$$

- y_{TW} Tolerancia de fabricación de cajas

Se considerará el valor habitual de tolerancia en fabricación de cajas. Se presupone aplicado íntegramente a cualquiera que sea el punto de cálculo. En el caso particular de Urbos, este valor es de un máximo de 3 mm.

$$Y_{TW} = \text{Tolerancia}_{\text{CAJAS}}$$

- y_{SA} Juego transversal del rodamiento

Al rodamiento eje-rueda le corresponde un juego transversal máximo que también ha de ser incluido en el cálculo. Un valor habitual de los rodamientos empleados por bogies en URBOS es 0.45 mm. Tiene afección al resto del vehículo dependiendo del cruce de éste en la vía:

$$Y_{SA} = \text{Juego}_{\text{rodamiento}} \cdot f_{\text{SUMA}}$$

- y_{SD} Juego transversal del pivote del bogie

En caso de llevar pivote en la conexión bogie-caja, el juego de éste también ha de ser incorporado al cálculo.

$$Y_{SD} = \text{Juego}_{\text{pivote caja-bogie}} \cdot f_{\text{SUMA}}$$

- yFR Suspensión lateral de rueda

Se considera que en determinadas ocasiones el aro de rueda puede deformarse elásticamente y llevar a un desplazamiento transversal. También tiene afecciones en el resto del vehículo.

$$Y_{FR} = \text{Deflexión lateral rueda} \cdot f_{SUMA}$$

- yFP Desplazamientos transversales ocasionados por la suspensión primaria

La suspensión primaria permite el movimiento vertical relativo entre ejes/ruedas y la estructura del bogie.

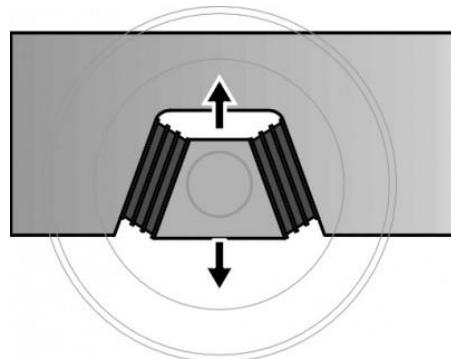


Ilustración 3.27 Típica suspensión primaria de campana de caucho como la empleada en bogies Urbos. Fuente: <http://the-contact-patch.com/>

El desplazamiento lateral de la suspensión primaria se denomina Y_{fp} y viene determinado por la rigidez lateral de la suspensión y se determina con el vehículo en carga e incluyendo efectos dinámicos. El valor máximo de estos desplazamientos en la suspensión serie de Urbos es 3 mm.

$$Y_{FP} = \text{Juego Lateral Primaria} \cdot f_{SUMA}$$

- Desplazamientos transversales ocasionados por la suspensión secundaria

La suspensión secundaria, debido a su posibilidad de desplazamiento tanto en vertical como en horizontal, genera tantos desplazamientos transversales como giros caja/bogie (también conocido como lazo). Estos efectos en el gálibo del vehículo son diferenciados entre efectos estáticos (giros y desplazamientos estáticos en carga (juego libre máximo)) y efectos dinámicos (compresión máxima de los topes). Ambos son calculados por separado dado que la norma considera los estáticos como factores no casuales y los dinámicos como causales.

- yDS Suspensión secundaria, dinámica

Este desplazamiento es el juego lateral de la suspensión. Es la máxima compresión posible de los topes de goma laterales en el bogie al contacto con la caja. Son obtenidos mediante simulaciones dinámicas. El valor standard de Urbos es 5mm. Este efecto es común tanto en los bogies de Urbos 100 como en Urbos AXL.

$$Y_{DS} = \text{Juego Lateral Secundaria, dinámico} \cdot f_{SUMA}$$

- yFS *Suspensión secundaria, estática*

Estos desplazamientos engloban los posibles movimientos entre la caja y el bogie debidos a juegos libres. Dentro de este desplazamiento también se ha incluido el giro de lazo para el caso Urbos 100. Así pues, es necesaria la distinción entre las dos tipologías de vehículos ligeros producidos actualmente por CAF para la determinación de este valor.

Caso URBOS 100

El tranvía de Urbos 100, aunque la unidad es articulada y se acomoda a las curvas a través del giro de las articulaciones entre cajas, y no de la rotación entre caja y bogie, tiene por confort y reducción del desgaste de pestaña libertad en el giro hasta un máximo, establecido por la posición de topes entre caja y bogie.

Este giro, viene delimitado por unos topes de giro en caja (ver siguiente figura) que impiden ángulos grandes de rotación que pudieran presentar un problema para los equipos y conducciones de bajo bastidor.

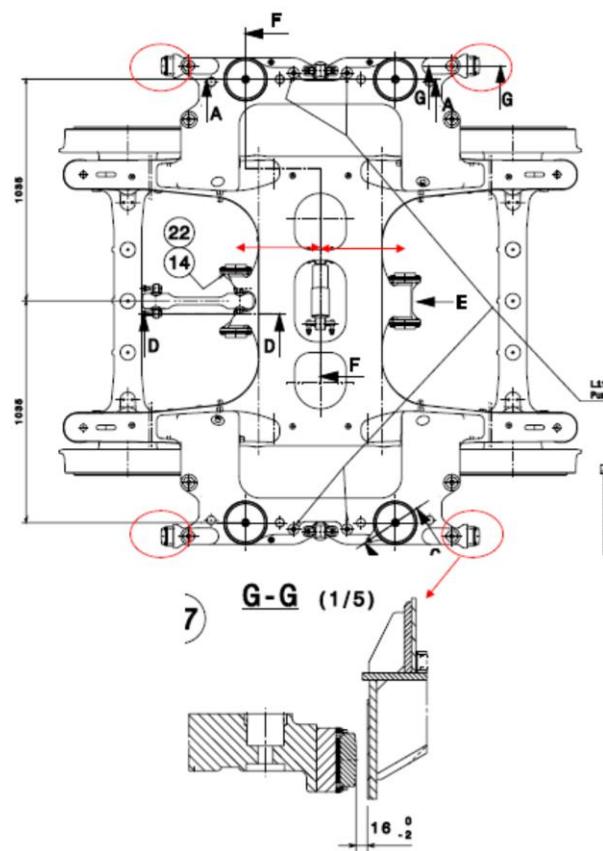


Ilustración 3.28 Localización de los topes de goma en el bogie URBOS. Fuente: Plano bogie Urbos Q.40. CAF

Al girar el bogie respecto a caja, dos topes en diagonal pegarán en los topes de caja, momento en el que no podrán girar más. En este caso el giro máximo se considera solo como el juego libre a rotación (0.7°). El giro adicional por la compresión de los topes no se considera, ya que se ha constatado en las simulaciones dinámicas que apenas se comprimen.

En las simulaciones dinámicas que se han realizado, se ha constatado, además, que en general, independientemente del radio, en las entradas en las curvas o en la transición, siempre se agota este giro libre, por lo que se considera de forma constante en todas en curvas. No obstante, se considera nulo para el gálibo de recta.

Este giro relativo ha de considerarse, pues en secciones muy alejadas del bogie producen un desplazamiento de la sección considerable.

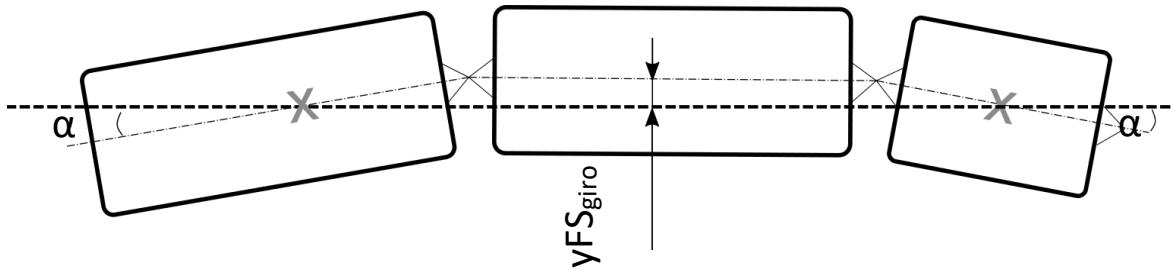


Ilustración 3.29 Desplazamiento que sufriría un punto del vehículo en el módulo S debido a los giros α en bogie/Bogie en el coche C y R (Exagerado)

Dado el giro, la sección localizada a una distancia n del centro del bogie sufrirá un distanciamiento del eje transversal de:

$$Y_{GIRO} = \tan \alpha \cdot n$$

Por otra parte, a este valor se habrá de sumar el propio juego máximo de la suspensión secundaria (10 mm habitualmente). No obstante, este juego libre se ve reducido por el propio juego agotado por el giro de secundaria. Luego:

$$Y_{JUEGO\ SECUNDARIA} = \text{Juego Lateral Secundaria, estático} - \tan \alpha \cdot \frac{\text{Distancia entre topes}}{2}$$

Finalmente, los desplazamientos debidos a los movimientos de secundaria serán:

$$Y_{FS,URBOS\ 100} = Y_{JUEGO\ SECUNDARIA} + Y_{GIRO}$$

Este desplazamiento requiere diferente cálculo si la sección se encuentra en un módulo con bogie o un módulo suspendido.

En el caso de un módulo con bogie, Y_{FS} se calculará con la distancia de dicha sección al eje de rotación, mientras que, en el caso de un módulo suspendido, Y_{FS} será la máxima posible, es decir, calculada en la articulación C-S (Ver ilustración anterior).

Caso AXL

En el caso de la tipología de vehículo AXL, para la acomodación del vehículo a una curva es necesaria la rotación “libre” de los bogies, cuyo giro respecto a la caja viene dado por la propia inscripción del bogie a la curva. Es por esto último que no han de considerarse rotaciones relativas adicionales entre caja y bogie.

Así pues, Y_{FS} solo dependerá del juego libre de secundaria. Será necesario multiplicarlo por el factor de articulación suma para hallar la peor combinación posible de este desplazamiento a una sección cualquiera (hecho que no ocurría para Urbos 100, dado que ya estábamos calculando el peor caso para cada módulo).

$$Y_{FS,URBOS\ AXL} = \text{Juego Lateral Secundaria, estático} \cdot f_{SUMA}$$

3.3.2.2 Desplazamientos verticales

- Z_{TW} Tolerancia vertical de ajuste Caja-Bogie

En el caso de los Urbos, ésta es la tolerancia de montaje de las cajas sobre el vehículo.

$$Z_{TW} = \text{Tolerancia}_{\text{Ajuste vertical Caja -Bogie}}$$

- Z_{tg} *Tolerancia vertical de montaje de equipos*

Constituye la tolerancia de montaje vertical de aparatos como el HVAC o compresores, que se sitúan en el techo o debajo de bastidor, respectivamente.

$$Z_{tg} = \text{Tolerancia}_{Ajuste\ equipos}$$

- Z_{vr} *Desgaste no compensado de rueda*

Debido a la fricción rueda carril las ruedas del vehículo disminuyen su diámetro por desgaste. Éste se va compensando mediante calas en los mantenimientos ordinarios hasta un máximo, cuando es necesario el cambio de ejes. Por ello, solo se considerará el máximo desgaste permitido entre mantenimientos. Éste se considera además que afecta a todo el vehículo por igual. Este valor en Urbos es 10 mm (Anchura de las calas).

$$Z_{vr} = \text{Desgaste de rueda no compensado}$$

- Z_{fr} *Suspensión de rueda*

Recorrido máximo de la suspensión vertical de la rueda bajo la compresión del vehículo en carga máxima. Dado que se produce por carga máxima del vehículo se considera constante a lo largo de la unidad.

$$Z_{fr} = \text{Suspensión vertical del aro de rueda}$$

- Z_{fp} *Recorrido de suspensión primaria, estático*

Carrera de compresión de la suspensión primaria debida a carga máxima del vehículo ($8\text{pax}/\text{m}^2$). Determinada por el departamento de dinámica y bogíes. Se considera una distribución igual de carga, por lo que se considera un descenso en toda la longitud del vehículo.

$$Z_{fp} = \text{Recorrido de primaria, en carga}$$

- Z_{fs} *Recorrido de suspensión secundaria, estático*

Carrera de compresión de la suspensión secundaria debida a carga máxima del vehículo ($8\text{pax}/\text{m}^2$). Determinada por el departamento de dinámica y bogíes. Se considera una distribución igual de carga, por lo que se considera un descenso en toda la longitud del vehículo.

$$Z_{fs} = \text{Recorrido de secundaria, en carga}$$

- Z_d *Recorrido de suspensión primaria y secundaria, dinámico*

Debido a los movimientos dinámicos del vehículo debido a la interacción con la vía, las suspensiones primarias y secundarias sufren compresiones y elongaciones denominadas *dinámicas*. Estos valores máximos de compresión y rebote de las suspensiones son estimados por el departamento de dinámica.

En el vehículo, debido a estas interacciones con la vía, no se puede asegurar que todos los bogíes se encuentren en el mismo estado de compresión/elongación. Lo habitual, de hecho, es que, al salir de una curva vertical en valle, por ejemplo, las suspensiones de los bogíes aún en curva se encuentren en compresión mientras que las del bogie ya fuera se encuentren en elongación.

Estas diferencias de desplazamiento de unos bogíes respecto a otros llevan a partes del vehículo a sufrir descensos o elevaciones mayores que las del desplazamiento único de un bogie. Estos desplazamientos son denominados *cabeceos*.

Por ello, para cada punto del vehículo siendo evaluado, es necesario encontrar aquellas combinaciones de bogíes en compresión o elongación dinámicas que llevan al mayor descenso (para partes bajas) y al mayor ascenso (para partes altas)

De cara a la creación de la herramienta de gálibo, esto se traducirá en la iteración sobre todas las combinaciones posibles hasta hallar aquella que para ese punto del vehículo lleva al mayor ascenso o descenso.

Por ejemplo, para un punto P situado en la sección de cabina de un URBOS 100, el mayor descenso debido a dinámicos se producirá con la suspensión del bogie R en elongación mientras que la del bogie C en compresión.

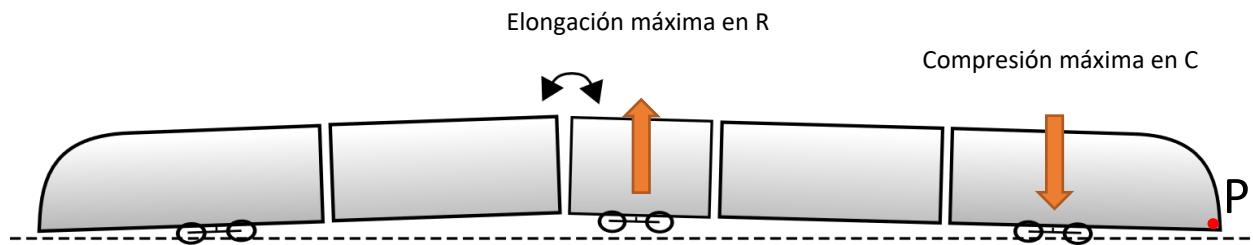


Ilustración 3.30 Muestra del peor cabeceo posible debido a dinámicos en para una sección situada en P.

Es importante añadir que la posición vertical nominal del vehículo se sitúa con la compresión de las suspensiones en tara. Por ello, la suma de los recorridos estáticos y dinámicos de cada suspensión introducidos al programa no han de superar la carrera total a compresión estas.

$$Z_D = \text{función(Rebote de secundaria/primaria, Recorrido de secundaria/primaria, dinámico)}$$

- Z_{fw} Flecha de las cajas, en carga.

Debido a la flexibilidad de las cajas, éstas presentan una flecha a lo largo del eje longitudinal. La magnitud de esta varía de módulo a módulo. Este descenso es solo en caja, por lo que es 0 en los bogies.

Para el caso del Urbos 100, esta es despreciable en los módulos con bogie (C y R) debido a la mayor rigidez del bastidor. Para el módulo S, en cambio, sí ha de considerarse. Esta flexión es medida durante el ensayo de caja (a carga máxima EL8) en el punto más desfavorecido (centro de caja) y se approxima linealmente para el resto del módulo.

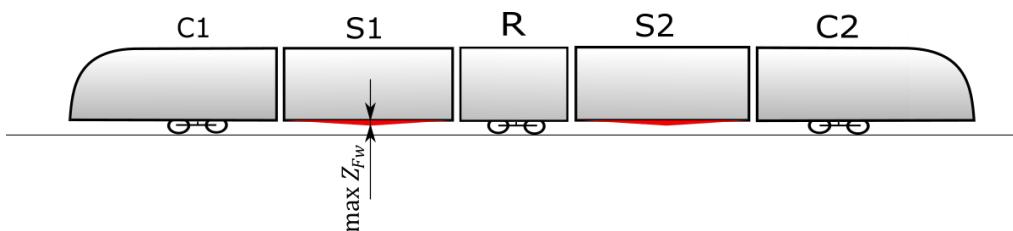


Ilustración 3.31 Descensos debido a flexión de caja por carga. Urbos 100.

En cambio, para el AXL, esta flecha ocurre también en las articulaciones y por ello ha de considerarse en todos los coches. Se mide en las articulaciones durante los ensayos de caja.

Puntos de medición (AXL 4 Módulos):

- Articulación coche C - coche R
- Centro empate coche N
- Articulación coche N - coche R
- Articulación coche R - coche C1

Este valor se interpola para hallar la flexión en un punto determinado a lo largo de la unidad.

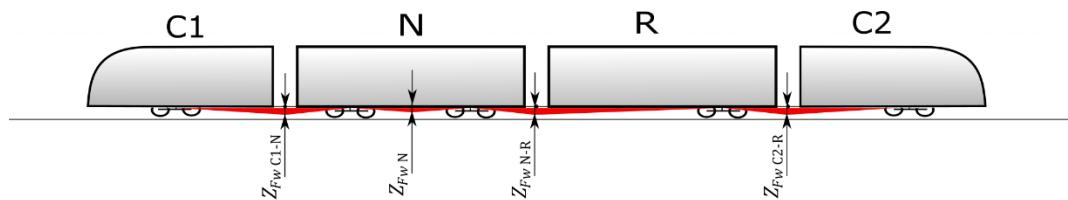


Ilustración 3.32 Descensos debido a flexión de caja por carga. Urbos AXL.

$$Z_{FW} = \text{Interpolación descensos.}$$

3.3.3 Desplazamientos debido a factores de influencia técnicos de la vía

3.3.3.1 Desplazamientos transversales

- yGV Desplazamiento de la vía

Condicionado por mantenimiento y por tolerancias de construcción, el eje central de la vía real puede variar respecto al eje teórico. Este desplazamiento es mucho menor en vías embebidas que en vías sobre balasto por la propia construcción del trazado. Éste además suele variar con el radio de curva, siendo mayor cuanto más cerrada la curva por las fuerzas laterales de los vehículos que circulan.

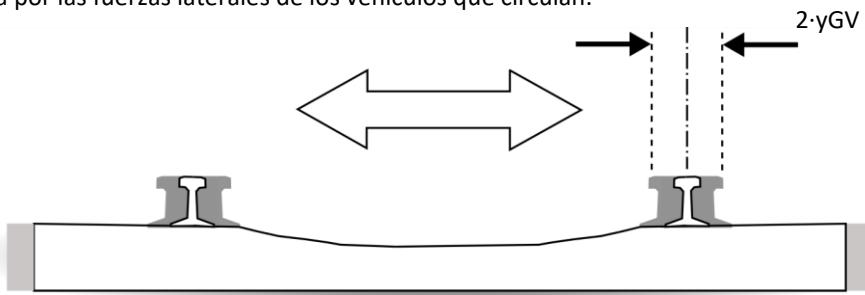


Ilustración 3.33 El desplazamiento transversal de la vía provoca a su centro un desplazamiento del eje real de la vía respecto al teórico que es necesario tenerlo en cuenta.

La norma propone la siguiente formulación para evaluar este desplazamiento diferenciando entre curvas de radios 40 y 800m.

TIPO DE VÍA

VALOR MÁXIMO SEGÚN NORMA

VÍA EMBEBIDA	5 mm
VÍA SOBRE BALASTO	
RADIO ≥ 800 m	25 mm
800 m > RADIO > 40 m	<i>Se considera variable con la expresión: = 25 + $\frac{1000}{R \text{ (mm)}}$ mm</i>
RADIO ≤ 40 m	50 mm
VÍA EN ANDÉN	
RADIO ≥ 800 m	3 mm
RADIO < 800 m	5 mm

Tabla 3.4 Consideraciones BOStrab para cada uno de los tipos de vía. Fuente: BOStrab (Modificada)

Para el método de cálculo, la norma BOStrab también tiene en cuenta que estas desviaciones del eje no son puntuales, si no que varían con un valor de α_Q por metro.

Este desplazamiento se considera en su valor medio para el módulo donde se encuentra la sección en particular, dado que las afecciones debidas a la variación α_Q se tendrán en cuenta en y_{GW} .

La norma propone la siguiente valoración del desplazamiento:

$$Y_{GV} = \max Y_{GV} - \alpha_Q \cdot \frac{a}{2}$$

Donde a es el empate entre bogías que tiene afección a la sección de cálculo.

- y_{GW} Cambio de desplazamiento de la vía

Estrechamente relacionado con lo anterior, el cambio progresivo en el desplazamiento del eje de la vía real respecto al teórico provoca que puntos del vehículo situados en voladizo puedan experimentar desplazamientos superiores a $\max Y_{GV}$. Dado que anteriormente se ha sumado ya la parte correspondiente a la media del desplazamiento para el centro del empate a , habrá que sumar ahora la afección de los desplazamientos de los que conforman ese empate.

$$Y_{GW} = -\alpha_Q \cdot \frac{a}{2} \cdot f_1 + \alpha_Q \cdot \frac{a}{2} \cdot f_2$$

- y_{GE} Elasticidad transversal del carril

La elasticidad transversal de los carriles y las vías abarca las elongaciones horizontales y de retroceso de la cabeza de carril bajo el efecto de las fuerzas de guiado. Las fuerzas de guiado son más intensas en las curvas de los carriles exteriores que en curvas interiores. Aunque no es muy común tener en cuenta estos desplazamientos, por ser muy inferiores, también están incluidos en la norma y se han incorporado al software de gálibo.

Este desplazamiento máximo, depende, por los motivos ya expuestos, de si el vehículo se encuentra en curva o en recta.

Dado que estas fuerzas pueden tener dirección impredecible, es necesario considerar la afección de todos los bogies. Por ello este desplazamiento es mayorado para obtener la peor combinación posible de movimientos en los bogies.

$$Y_{GE} = \text{Elasticidad lateral del carril} \cdot f_{SUMA}$$

3.3.3.2 Desplazamientos verticales

- z_{GE} Elasticidad vertical de la vía

El carril sufre una compresión al paso del vehículo que ha de ser considerado. Siendo que es debido a carga, se considera constante a lo largo de la longitud de todo el vehículo.

$$Z_{GE} = \text{Elasticidad vertical del carril}$$

- z_{VS} Desgaste vertical del carril

Produce un acercamiento de las partes bajas del vehículo a los elementos de la infraestructura ubicados sobre la vía, y por tanto se trata como un desplazamiento vertical. Determinado por el mantenedor de la vía. Afecta a todo el vehículo por igual al ser constante para largos tramos de vía.

$$Z_{VS} = \text{Máximo desgaste vertical}$$

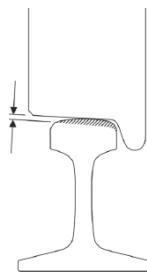


Ilustración 3.34 Desgaste vertical en la cabeza del rail. Fuente: EN15273

- zGV Desplazamiento vertical de la vía

Este es el desplazamiento vertical máximo entre bateados (para el caso de vía sobre balasto). Al igual que el anterior, este desplazamiento también es constante para largos tramos.

$$Z_{GV} = \text{Máximo descenso vertical de la vía}$$

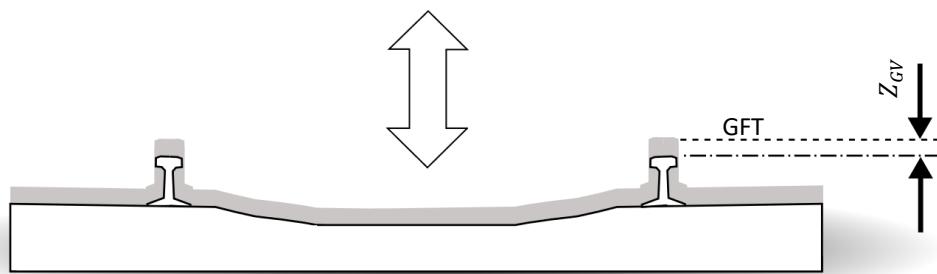


Ilustración 3.35 Desplazamiento vertical de la vía debido al funcionamiento.

3.3.4 Balanceos

Desde un punto de vista dinámico, el vehículo está sometido a fuerzas, ya sean del medio como el viento, o por la propia dinámica del vehículo en curva, que provocan un balanceo relativo entre la caja y el bogie que dan a lugar a desplazamientos transversales y verticales para los puntos de estas secciones. Estos giros se producen respecto al centro de giro del vehículo, el cual ha de ser determinado en el ensayo de caja, y encuentra entorno a la línea de secundarias (varia dinámicamente debido a la interacción de secundaria y primaria); a alrededor de 400 mm por encima de la superficie de carril.

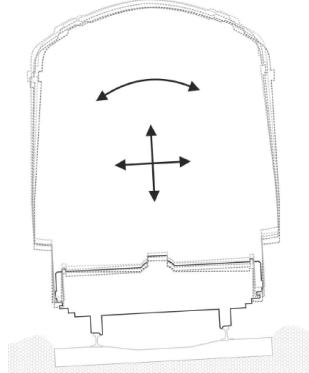


Ilustración 3.36 Movimiento de un vehículo al balanceo Fuente: EN15273

Además, este giro puede ser más o menos pronunciado debido a la rigidez conjunta de las suspensiones. Esta rigidez se le llama tradicionalmente *Souplesse* (del francés flexibilidad) y viene determinada por el coeficiente de *Souplesse*. Dicho coeficiente es medido en el protocolo de comprobación de la flexibilidad de la suspensión que está especificado en la norma EN 14363.

El coeficiente de flexibilidad o *Souplesse* de un vehículo se calcula como el cociente entre el ángulo girado por el vehículo debido al balanceo (η) y el ángulo de peralte (δ)

$$s = \frac{\eta}{\delta}$$

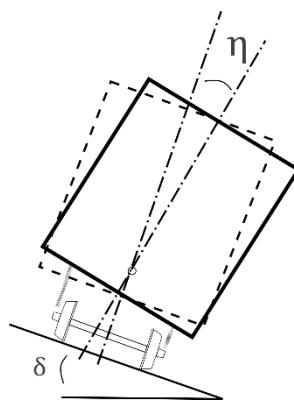


Ilustración 3.37 La *Souplesse* de un vehículo es la flexibilidad de este frente a un balanceo. Un valor de coeficiente de *Souplesse* de 0 indicara que el vehículo no balancea frente a una inclinación.

Si bien la norma BOStrab desarrolla el cálculo para las transposiciones mediante la rigidez de suspensiones primaria y secundaria, es también posible realizar el cálculo empleando ya el balanceo real que origina el coeficiente de *Souplesse*, dado que este es un valor medido en ensayos. Así, además, está desarrollado este cálculo en el resto de normas referencia como la UIC y la EN15273.

Dentro de la norma BOStrab, se recomienda tener en cuenta todas las acciones posibles que den como resultado una basculación lateral del vehículo. Estas son:

- Movimientos de balanceo debidos a las fuerzas transversales durante la parada del vehículo en una vía peraltada.
 - Aceleración transversal quasi estática de un vehículo en marcha con el excedente de fuerza centrífuga permitido (limitado por confort).
 - Viento lateral.
 - Aceleración transversal dinámica.
 - Movimientos de balanceo debidos a nivelación.
 - Movimientos de balanceo debidos a una ocupación asimétrica del vehículo.
 - Movimientos de balanceo debidos a una divergencia de las altitudes recíprocas de los carriles.
- *Balanceo por peralte o aceleración no compensada:*

En el caso de un vehículo en curva, la fuerza centrífuga sobre el vehículo provoca un movimiento de balanceo.

Este movimiento puede deberse bien a exceso de peralte o bien a una insuficiencia de peralte (por motivos de confort, está limitada a una aceleración centrípeta sobre el vehículo de 1 m/s^2 , aunque depende del proyecto). Habitualmente se refiere a esta aceleración como aceleración no compensada.

En la práctica se considera el balanceo provocado por la insuficiencia de peralte para el exterior de la curva y el mayor exceso de peralte para el interior de la curva (es decir, con el vehículo parado)

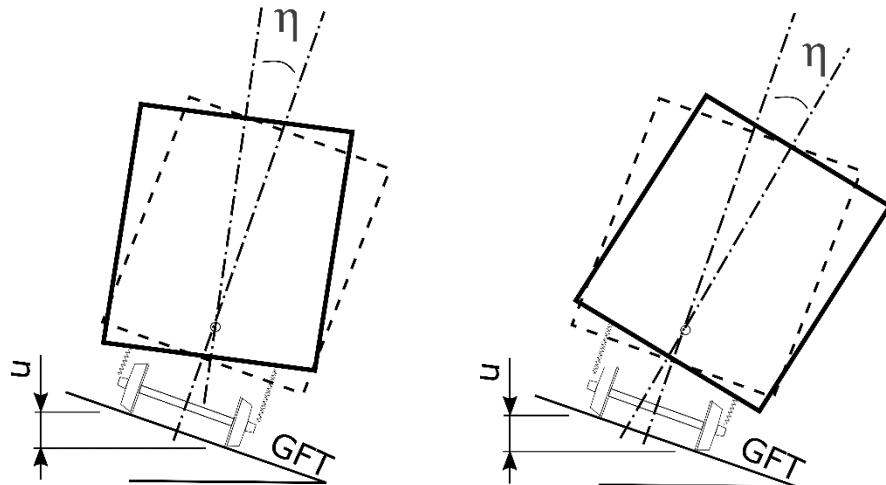


Ilustración 3.38 A la izquierda, un vehículo con insuficiencia de peralte. A la derecha, con exceso.

Extraído de la norma EN 15273, la transposición transversal y vertical de este movimiento será:

$$Y_{WQ,INTERIOR} = s \cdot \frac{u}{S} \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{WQ,INTERIOR} = b \cdot \sin\left(s \cdot \frac{u}{S}\right) - (h - h_c) \cdot \left(1 - \cos\left(s \cdot \frac{u}{S}\right)\right) \cong b \cdot \sin\left(s \cdot \frac{u}{S}\right)$$

Donde u es el peralte máximo, S el ancho de vía y h la altura del punto considerado.

Para el exterior de la curva:

$$Y_{WQ,EXTERIOR} = s \cdot \frac{a_q}{g} \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{WQ,EXTERIOR} \cong b \cdot \sin\left(s \cdot \frac{a_q}{g}\right)$$

Donde a_a es la aceleración compensada, g es la aceleración de la gravedad y h la altura del punto considerado.

Es habitual considerar el valor de peralte máximo para cualquier radio de curva, a excepción del galibio en recta, donde se considera 0.

- *Balanceo por fuerzas de interacción con vía:*

La norma también considera fuerzas laterales debido al fenómeno de hunting en interacción con las irregularidades de vía. En otras normas se introduce como peralte equivalente a irregularidades de vía. Esta fuerza actúa como una fuerza centrípeta no compensada.

$$Y_{WS} = s \cdot \frac{a_s}{g} \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{WS} \cong b \cdot \sin \left(s \cdot \frac{a_s}{g} \right)$$

- *Balanceo por fuerza del viento:*

Un aspecto relevante es la acción del viento en el vehículo. Esta actúa proporcional al área lateral del semi vehículo y es considerada como una fuerza puntual que actúa a media altura.

Las directrices BOStrab recomiendan usar un viento lateral de presión 200N/m^2 .

$$Y_{WW} = s \cdot \frac{p_w \cdot A_w}{m \cdot g} \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{WW} \cong b \cdot \sin \left(s \cdot \frac{p_w \cdot A_w}{m \cdot g} \right)$$

- *Balanceo por nivelación de cajas:*

Por tolerancias de ajuste, disimetrías de cajas y apoyos de las cajas en la suspensión secundaria no totalmente equilibrados, las cajas presentan unos pequeños desequilibrios respecto a su eje vertical teórico. Este valor se mide como diferencia de altura en los extremos transversales de la caja.

$$Y_{WB} = \eta_{Nivelación} \cdot |h - h_c| = \frac{\text{Roll debido a tolerancia de caja}}{\text{Anchura vehículo}} \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{WB} \cong b \cdot \sin \left(\frac{\text{Roll debido a tolerancia de caja}}{\text{Anchura vehículo}} \right)$$

- *Balanceo por carga asimétrica:*

Si se considera que el vehículo puede tener desequilibrios en la carga debido a un layout de pasajeros asimétrico respecto al eje longitudinal del vehículo, este balanceo se ha de introducir al cálculo. Se mide como ángulo β respecto a la vertical. Habitualmente se emplea por seguridad 0.45° . Es importante remarcar que esta distribución irregular de carga ha de ser debida a la propia disposición de asientos, no casos momentáneos, y así esta expresado en la norma.

$$Y_{WZ} = \tan \beta \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{WZ} \cong b \cdot \sin(\beta)$$

- *Balanceo por divergencia de las altitudes recíprocas de los carriles:*

Las diferencias de alturas entre carriles de una vía pueden provocar balanceo en el vehículo además del correspondiente giro del eje real del vehículo respecto al eje teórico de la vía.

Se distingue entre el balanceo provocado por diferencia de alturas debido a mantenimiento yHE (desgastes) o por funcionamiento yHS (elásticos). El procedimiento de cálculo no obstante es el mismo.

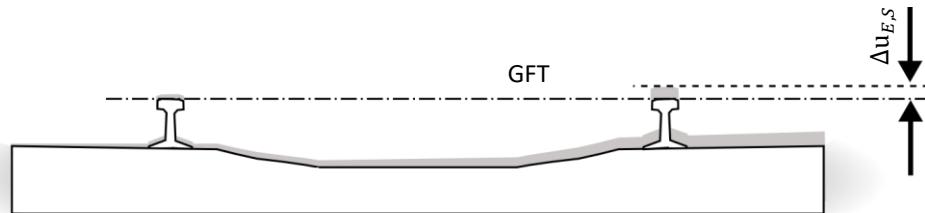


Ilustración 3.39 Giros debido a mantenimiento pobre puede crear una diferencia de alturas entre carriles, cuyo resultado es un balanceo del vehículo.

Esta diferencia de alturas es medida un carril respecto de otro como $\Delta u_{E,S}$.

Por un lado, se consideran los desplazamientos producidos por el cambio de ejes de la vía y por otro los provocados por el balanceo. Adoptando la formulación descrita en la norma BOStrab para realizar el cálculo mediante la Souplesse del vehículo:

$$Y_{HE,HS} = \frac{\Delta u_{E,S}}{S} \cdot h + \frac{\Delta u_{E,S}}{S} \cdot s \cdot |h - h_c|$$

$$Z_{HE,HS} \cong \frac{\Delta u_{E,S}}{S} \cdot \left(b + \frac{S}{2} \right) + b \cdot \sin \left(s \cdot \frac{\Delta u_{E,S}}{S} \right)$$

3.3.5 Cabeceos

En el nivel del corte longitudinal han de considerarse los movimientos de cabeceo del vehículo, esto es, cambios de ángulo de los ejes longitudinales del vehículo con respecto a los ejes de vía teóricos. En los movimientos de cabeceo, sólo es técnicamente relevante para el gálibo los descensos y ascensos que este provoca.

- *Zng Cabeceo a causa de desplazamientos verticales de la vía*

La variación de altura debido a desplazamientos verticales de la vía α_V a lo largo del eje longitudinal de ésta provocan acercamientos del vehículo en secciones situadas en voladizo como el punto P de la imagen al mismo tiempo que provocan ascensos en la parte opuesta.

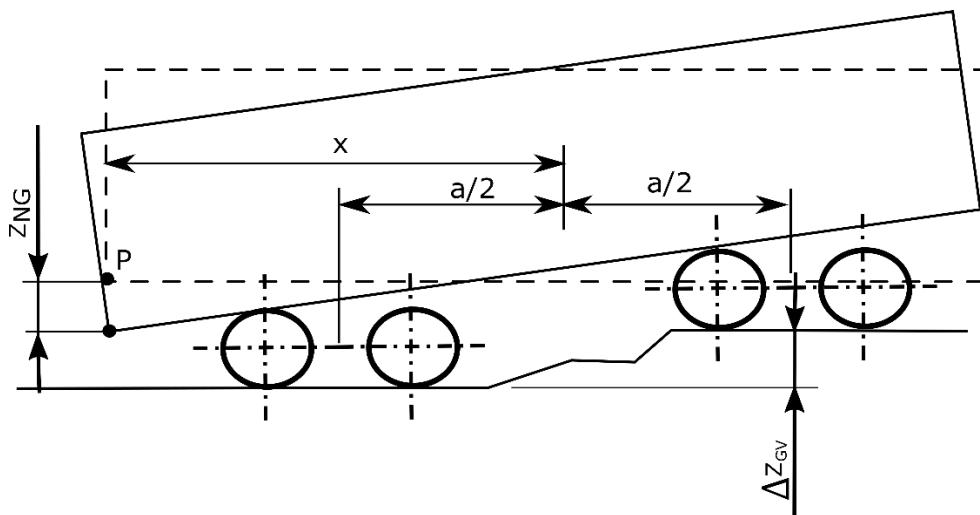


Ilustración 3.40 Descenso de un punto P en voladizo debido a la variación en desplazamiento vertical entre el empate.

De acuerdo con la norma, el procedimiento de cálculo será:

$$\max \Delta Z_{GV} = \alpha_D \cdot a$$

$$Z_{NG} = \max \Delta Z_{GV} \cdot \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{2} \right)$$

En la tipología URBOS 100 y AXL son las secciones situadas fuera de los empates las que sufrirán un descenso relativo al eje teórico de la vía debido a esta variación de alturas.

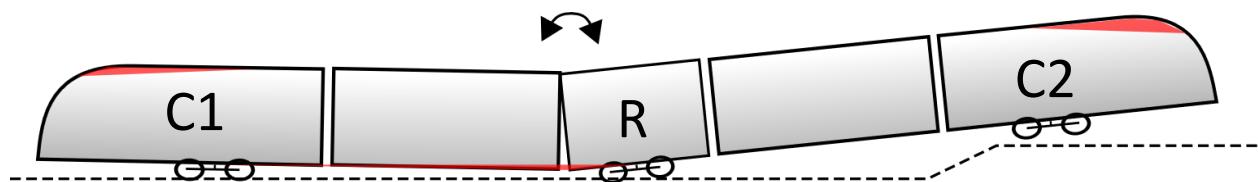


Ilustración 3.41 Marcado en rojo, las zonas que se verían afectadas en el caso de una variación vertical de vía entre R y C2

De cara a un algoritmo de programación, y dado que sería muy costoso programar cada particular caso, se ha optado por la iteración de cada uno de los empates para obtener aquel que dé a lugar a un mayor descenso (o ascenso) para la sección a calcular.

La situación de la imagen puede ser reversible, siendo α_D negativa y por tanto los descensos actuar como ascensos para las partes altas.

4 GÁLIBO DEL VEHÍCULO

Una vez se han calculado todos los desplazamientos, éstos son sumados para obtener la envolvente de gálibo del vehículo.

El gálibo del vehículo se divide en:

- Gálibo lateral
- Gálibo de partes bajas

4.1 GÁLIBO LATERAL

El gálibo lateral se compondrá del perfil dinámico del vehículo. Este perfil se compone de:

- Semiancho del vehículo incluyendo la saliente geométrica
- Desplazamientos transversales
- Desplazamientos verticales

Para su obtención, cada punto de cada sección relevante del vehículo será recalculado mediante la suma de desplazamientos debido a factores causales y no causales.

En cuanto a ascensos y descensos, para aquellos puntos que se encuentran en la parte inferior del vehículo se restaran los descensos marcados por la norma, mientras que a aquellos puntos situados en la parte superior se sumaran los ascensos.

A efectos prácticos, esta división entre partes altas y bajas se realiza allí donde existe una discontinuidad en el perfil del vehículo, como pisaderas o cámaras.

Posteriormente, todas las secciones del vehículo relevantes se superpondrán para obtener el perfil dinámico máximo del vehículo, que será el perfil relevante para validar el gálibo del vehículo frente a la infraestructura.

Existirán dos secciones dinámicas diferentes para cada radio de curva, una para el interior de la curva y otra para el exterior.

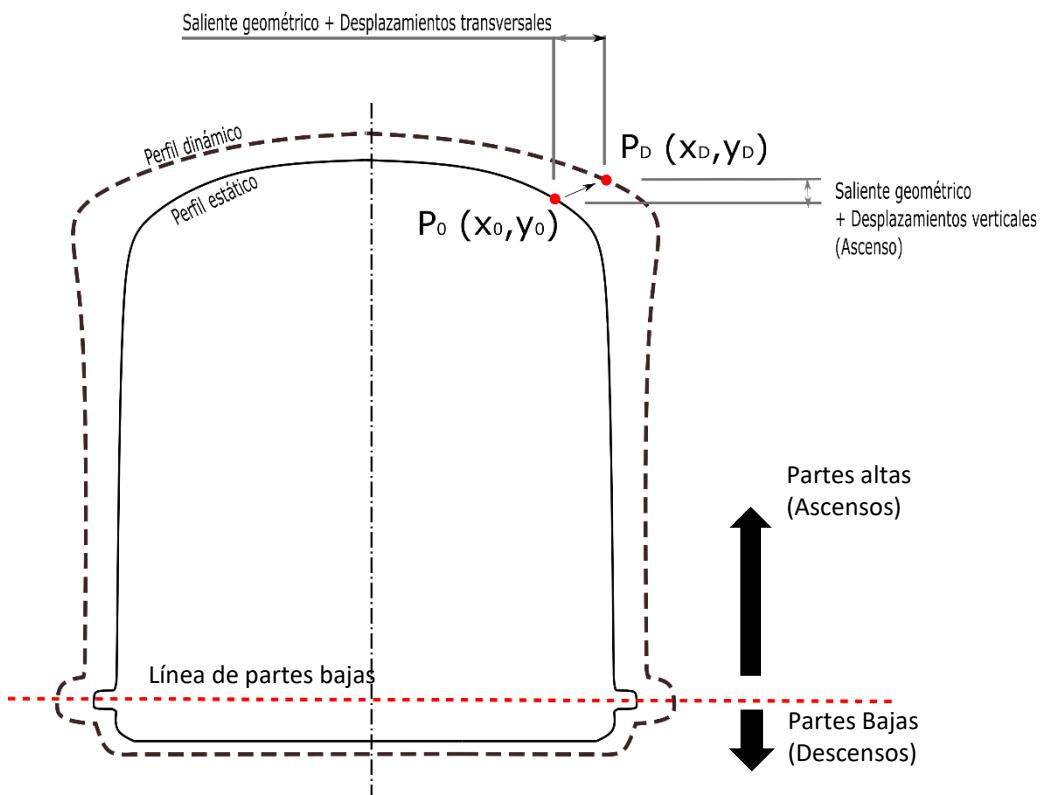


Ilustración 4.1 Cálculo del perfil dinámico a partir del perfil estático

Mientras que la saliente geométrica en curva, incluyendo la mitad del ancho del vehículo, el desplazamiento transversal debido al juego de vía y las necesidades individuales no casuales deben sumarse aritméticamente, en el caso de los valores máximos casuales en una misma dirección se considera la probabilidad de una coincidencia, por lo que se suman los valores como cuadrados bajo una raíz cuadrada, apoyándose en la ley de Gauss de la propagación de errores

Para un punto de la sección estática P (b, h), su equivalente dinámico (Fuente Norma BOStrab) vendrá dado por:

$$y_p = b + b' + y_{SA} + y_{SD} + y_{FR} + y_{FP} + y_{FS} + y_{GE} + y_{WQ} + y_{WZ} + y_{HE}$$

$$+ \sqrt{y_{SW}^2 + y_{TR}^2 + y_{TA}^2 + y_{TD}^2 + y_{TP}^2 + y_{TW}^2 + y_{DS}^2 + y_{GW}^2 + y_{GV}^2 + y_{WW}^2 + y_{WS}^2 + y_{WB}^2 + y_{HS}^2}$$

En el caso de que este punto se corresponda con partes altas, al punto anterior habrá que sumar su ascenso:

$$z_{Ascenso} = z_{KU,WA} + z_{WQ} + z_{WZ} + z_{HE} + \sqrt{z_{TW}^2 + z_{TG}^2 + z_{DP}^2 + z_{DS}^2 + z_{WS}^2 + z_{WW}^2 + z_{WB}^2 + z_{HS}^2 + z_{NG}^2}$$

Si es partes bajas:

$$z_{Descenso} = z_{KU,WA} + z_{VR} + z_{FR} + z_{FP} + z_{FS} + z_{FW} + z_{GE} + z_{VS} + z_{WQ} + z_{WZ} + z_{HE}$$

$$+ \sqrt{z_{TW}^2 + z_{TG}^2 + z_{DP}^2 + z_{DS}^2 + z_{GV}^2 + z_{WS}^2 + z_{WW}^2 + z_{WB}^2 + z_{HS}^2 + z_{NG}^2}$$

Una vez obtenido las secciones dinámicas del vehículo, éstas se superponen para hallar la sección dinámica absoluta del vehículo.

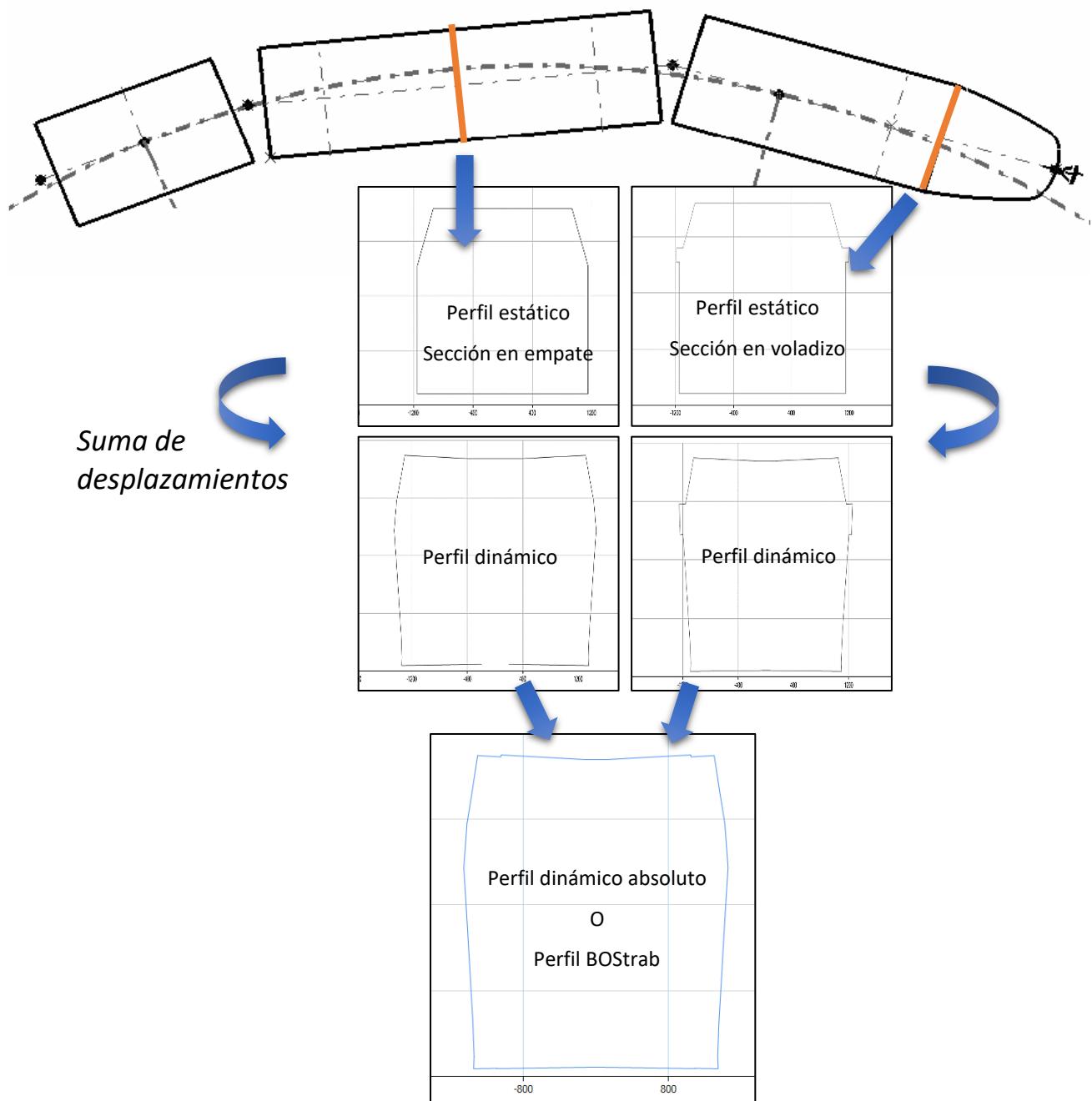


Ilustración 4.2 Proceso general de generación del perfil de gálibo para un caso típico de Urbos 100.

4.2 GÁLIBO DE PARTES BAJAS

Aunque el máximo perfil dinámico del vehículo queda definido por el perfil explicado en el apartado anterior, es necesario conocer los descensos a nivel de las partes bajas de todo el vehículo.

Esto es necesario, no solo para conocer si existe algún riesgo para la infraestructura, sino también para asistir en el posicionamiento de equipos de bajo bastidor.

Así pues, conociendo a lo largo del vehículo cuánto desciende cada punto es posible generar una superficie 3D para asegurar en procesos de diseño más avanzados que la posición de aparatos de bajo bastidor tales como compresores o depósitos no exceden el gálibo permitido.

En la práctica, realizar este plano es generar puntos a lo largo de la longitud y anchura del vehículo. Los desplazamientos de estos puntos serán la suma de los descensos marcados por la norma anteriormente ya indicados.

Este plano se realiza para toda la longitud del vehículo, incluyendo afilados, porque no existe simetría en el vehículo para desplazamientos verticales, tal y como ocurre en Urbos 100 o AXL (3 módulos)

$$z_{\text{Ascenso de GFT}} = z_{KU,WA} + z_{VR} + z_{FR} + z_{FP} + z_{FS} + z_{FW} + z_{GE} + z_{VS} + z_{WQ} + z_{WZ} + z_{HE} \\ + \sqrt{z_{TW}^2 + z_{TG}^2 + z_{DP}^2 + z_{DS}^2 + z_{GV}^2 + z_{WS}^2 + z_{WW}^2 + z_{WB}^2 + z_{HS}^2 + z_{NG}^2}$$

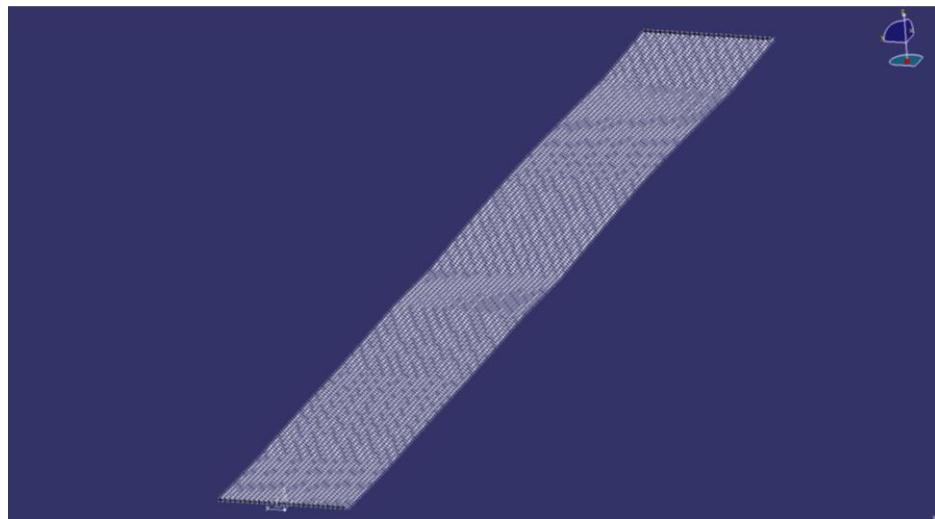


Ilustración 4.3 Superficie CATIA de acercamientos de vía para el conjunto de módulos C, S y R del tranvía de Ámsterdam. Generado automáticamente con el software de cálculo de gálibo fruto de este proyecto.

4.3 AFILADO DE CABINA

Como se ha comentado anteriormente, el afilado de cabina es el volumen disponible para la construcción de la cabina autoportante, de manera que se garantice que su propia inscripción en curva no viola el gálibo dinámico del vehículo.

Es habitual delegar el diseño de la cabina a un diseñador externo a CAF, por lo que se le proporciona a éste un volumen máximo en el que generar su diseño. Anteriormente se le daba un 3D que se tenía que calcular aparte, mediante un llamado ángulo de afilado. Dado que se va a generar una herramienta informática; se tiene la oportunidad de realizar este 3D con las mismas reglas de cálculo del resto del vehículo, dando seguridad y robustez así al 3D generado. Además, se puede incluir ya en este las reducciones verticales necesarias.

Dado que la envolvente del afilado de cabina se sitúa en voladizo en el vehículo, ésta es calculada respecto a la sección de cabina, para el exterior de curva.

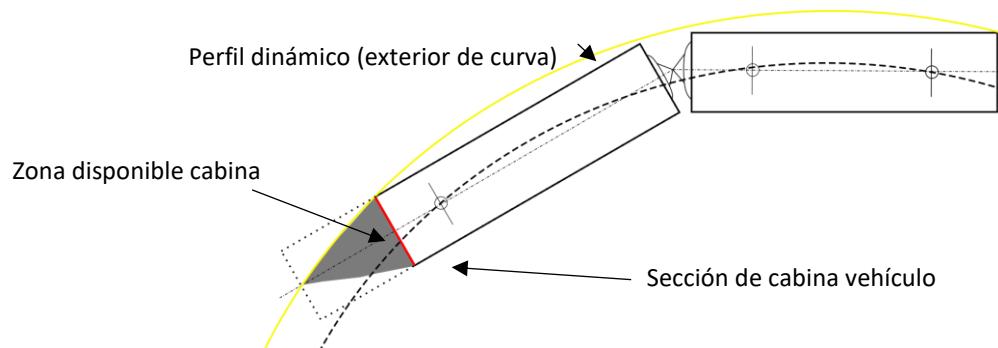


Ilustración 4.4 Diagrama ejemplo del posible afilado de cabina para un vehículo de tipología Urbos AXL.

4.3.1 Cálculo del afilado

El cálculo del afilado se realiza para un radio de curva horizontal específico. Para hallar la envolvente máxima de construcción (zona gris de la figura anterior), se crean secciones virtuales más allá de la sección de cabina. La diferencia entre las envolventes dinámicas de las secciones virtuales y la envolvente dinámica producida por la sección de cabina será la reducción (o afilado) que esta nueva sección necesita.

La nueva anchura de un punto de una nueva sección de afilado, a una distancia x de la sección de cabina, será:

$$Y_{sección\ x,\ estática} = Y_{sección\ cabina,\ estática} - (Y_{sección\ x,dinámica} - Y_{sección\ cabina,dinámica})$$

El mismo procedimiento de cálculo ocurre para partes altas y bajas del afilado de cabina.

Para partes altas:

$$Z_{sección\ x,\ estática} = Z_{sección\ cabina,\ estática} - (Z_{sección\ x,dinámica} - Z_{sección\ cabina,dinámica})$$

Para partes bajas:

$$Z_{sección\ x,\ estática} = Z_{sección\ cabina,\ estática} + (Z_{sección\ cabina,dinámica} - Z_{sección\ x,dinámica})$$

Estas operaciones implican la selección de un afilado de cabina para unos parámetros de gálibo específicos, el más importante siendo el radio de curva horizontal. Aunque lo habitual es seleccionar el afilado de cabina para el menor radio horizontal según especificaciones, en ocasiones se elige un afilado a un radio mayor, en base a dar mayor libertad al diseñador de la cabina. Es por ello por lo que, una vez realizada la selección de un afilado en concreto, éste pase a formar parte del cálculo (en forma de sus secciones relevantes) para tenerlo en cuenta en caso de realizar el proyecto de gálibo a radios menores que los previstos en la elección del afilado.

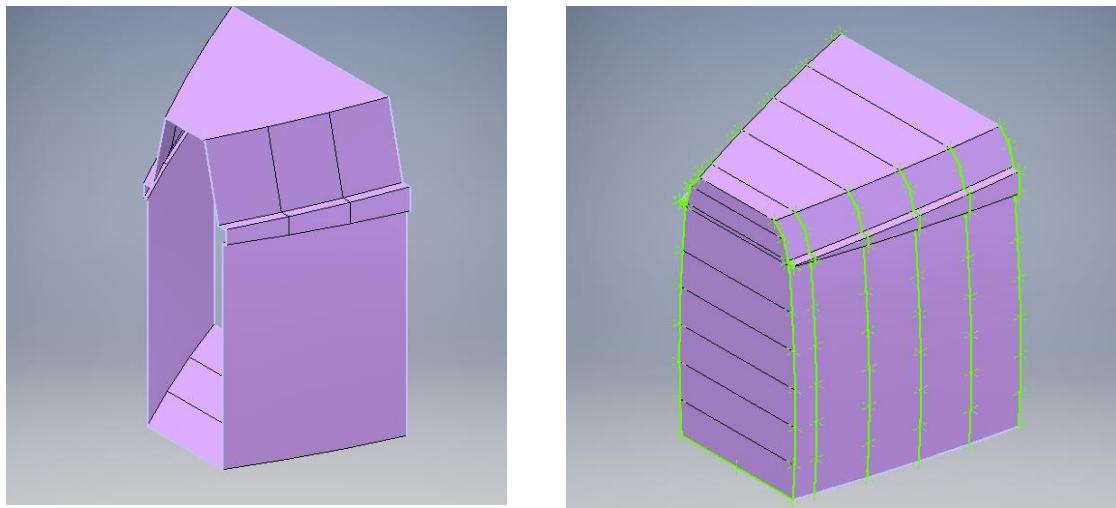


Ilustración 4.5 3D de afilados de cabina generados automáticamente mediante la herramienta creada en este proyecto.

Derecha: Proyecto Friburgo. Izquierdo: Nuevo Proyecto

5 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

Una vez estudiado el cálculo de gálibo de acuerdo con las directrices de la norma BOStrab para las tipologías de vehículo tranvía de CAF, se desarrolló un programa para realizar los cálculos y validaciones del gálibo en estos vehículos.

La herramienta se desarrolló en el entorno de desarrollo de aplicaciones para Windows; VisualStudio, en lenguaje VisualBasic y C#.

El programa se divide en dos partes, la introducción de datos, y la salida de resultados.

Dentro del input de datos, es necesario en primer lugar la selección de la tipología de vehículo a calcular.

Posteriormente se introducen los datos correspondientes al vehículo, así como los datos de la infraestructura.

Una vez todos los datos necesarios se han introducido, se puede pasar a la fase de solución. Ésta se genera en otra ventana.

En general, el programa se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo:

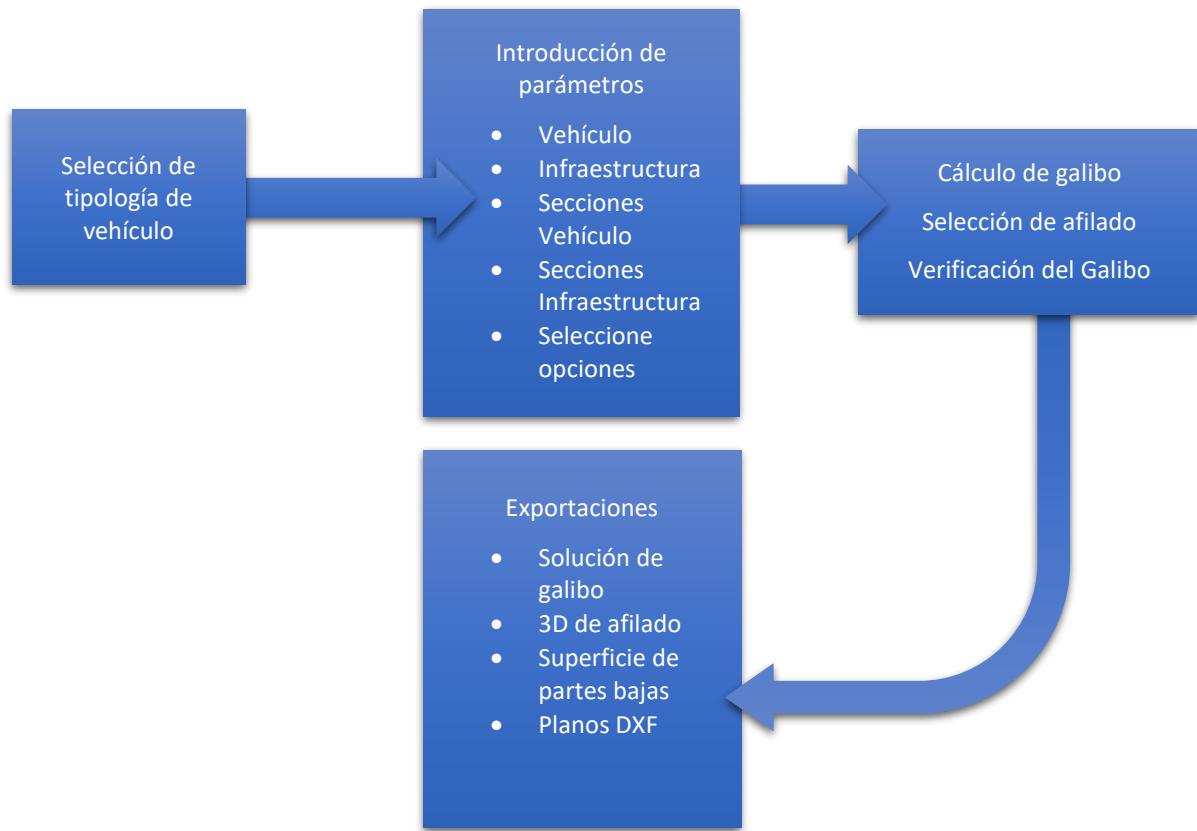


Ilustración 5.1 Diagrama de flujo de la herramienta de cálculo.

5.1 ENTRADAS DEL PROGRAMA

La pantalla principal permite la selección de las diferentes tipologías de vehículo.

Las tipologías disponibles son:

- Urbos 100 5 módulos
- Urbos 100 7 módulos
- Urbos AXL 3 módulos
- Urbos AXL 4 módulos

El programa actualizará la pantalla principal para permitir al usuario introducir los datos principales de geometría del vehículo. A efectos geométricos, es necesario conocer todos los empates del vehículo, así como la distancia a los voladizos.

5.1.1 Datos geométricos del vehículo

- *Urbos 100 5 módulos*

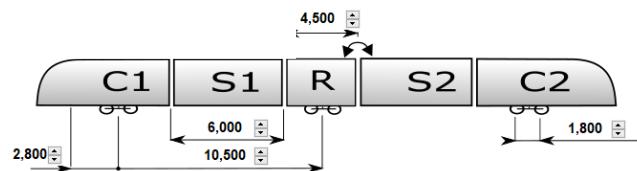


Ilustración 5.2 Dimensiones a introducir. Urbos 100 5 módulos.

- *Urbos 100 7 módulos*

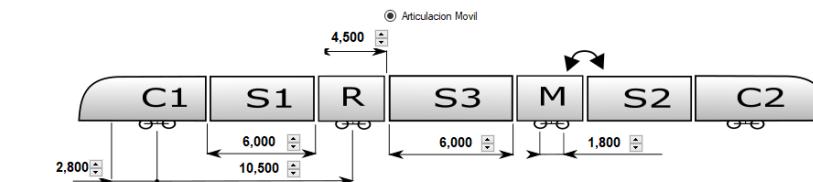


Ilustración 5.3 Dimensiones a introducir. Urbos 100 7 módulos.

- *Urbos AXL 3 módulos*

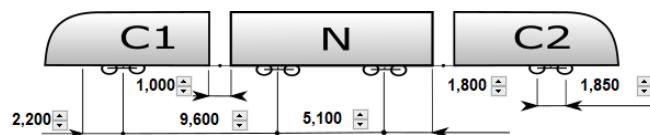


Ilustración 5.4 Dimensiones a introducir. Urbos AXL 3 módulos.

- *Urbos AXL 4 módulos*

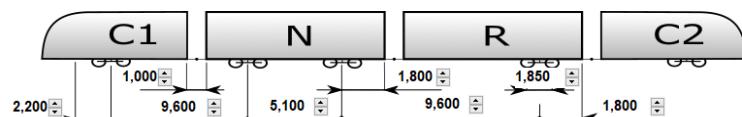


Ilustración 5.5 Dimensiones a introducir. Urbos AXL 4 módulos.

5.1.2 Datos del vehículo

- *Datos principales del vehículo*

Parámetro	Unidades
<i>Anchura vehículo</i>	mm
<i>Peso unidad sobre bogíes</i>	kg
<i>Área lateral vehículo</i>	m ²
<i>Altura del centro de giro del vehículo</i>	mm
<i>Souplesse</i>	

Tabla 5.1 Parámetros principales necesarios del vehículo.

- *Tolerancias y juegos laterales*

Parámetro	Unidades
<i>Desgaste máximo de pestaña</i>	mm
<i>Clearance nominal pestaña-carril</i>	mm
<i>Tolerancia lateral de construcción de los bogíes</i>	mm
<i>Tolerancia construcción del rodamiento (Bogie)</i>	mm
<i>Tolerancia del ajuste Bogie-Caja</i>	mm
<i>Tolerancia de ajuste de la suspensión primaria</i>	mm
<i>Tolerancia de construcción de la Simijaca</i>	mm
<i>Gap entre eje y rodamiento del bogie</i>	mm
<i>Gap entre eje y pivote</i>	mm

Tabla 5.2 Parámetros de juegos y tolerancias laterales de entrada.

- *Tolerancias y juegos verticales*

Desgaste de rueda no compensado	Unidades
<i>Descenso de caja (Tolerancia de fabricación)</i>	mm
<i>Tolerancia de construcción de los equipos en cubierta</i>	mm
<i>Deflexión caja máxima</i>	mm

Tabla 5.3 Parámetros de juegos y tolerancias verticales de entrada.

- *Suspensiones, laterales*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>
<i>Desplazamiento lateral debido a la elasticidad de la banda de rodadura</i>	mm
<i>Desplazamiento lateral máximo de la suspensión primaria</i>	mm
<i>Desplazamiento lateral suspensión secundaria DINÁMICO</i>	mm
<i>Desplazamiento lateral suspensión secundaria ESTÁTICO</i>	mm
<i>Distancia entre Resortes Secundaria</i>	mm
<i>Máxima rotación Caja-Bogie</i>	grados
<i>Localización buffer stops bogie</i>	mm

Tabla 5.4 Datos laterales de entrada de suspensiones.

- *Suspensiones, verticales*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>
<i>Descenso debido a la elasticidad de la banda de rodadura</i>	mm
<i>Descenso primario ESTÁTICO (En carga)</i>	mm
<i>Rebote (ascenso) suspensión primaria DINÁMICO</i>	mm
<i>Rebote (descenso) suspensión primaria DINÁMICO</i>	mm
<i>Descenso secundario ESTÁTICO (En carga)</i>	mm
<i>Rebote (ascenso) suspensión secundaria DINÁMICO</i>	mm
<i>Rebote (descenso) suspensión secundaria DINÁMICO</i>	mm

Tabla 5.5 Datos verticales de entrada de suspensiones.

- *Disimetrías vehículo*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>
<i>Ángulo de giro(roll) debido a asimetría de carga</i>	Grados
<i>Roll debido a tolerancia de caja</i>	mm

Tabla 5.6 Datos de entrada para cálculo de disimetrías del vehículo

5.1.3 Parámetros de la infraestructura

- *Datos generales*

Parámetro	Unidades
<i>Ancho de vía</i>	mm
<i>Vía Embebida</i>	Si/No
<i>Peralte máximo</i>	mm
<i>Aceleración no compensada máxima</i>	m/s^2

Tabla 5.7 Principales datos de la línea.

- *Desgastes*

Parámetro	Unidades
<i>Desgaste ancho vía - Lado interior</i>	mm
<i>Desgaste ancho vía - Lado exterior</i>	mm
<i>Desgaste lateral de carril (Variación /metro)</i>	mm/m
<i>Desgaste vertical carril</i>	mm

Tabla 5.8 Datos de desgastes en la línea.

- *Desplazamientos debido a funcionamiento*

Parámetro	Unidades
<i>Elasticidad transversal carril (RECTA)</i>	mm
<i>Elasticidad transversal carril (CURVA EXTERIOR)</i>	mm
<i>Elasticidad transversal carril (CURVA INTERIOR)</i>	mm
<i>Elasticidad vertical carril</i>	mm
<i>Elasticidad vertical máxima entre carriles recíprocos</i>	mm

Tabla 5.9 Datos de desplazamientos debidos a la acción del vehículo en la vía.

- *Desplazamientos permanentes*

Parámetro	Unidades
Desplazamiento transversal vía (RECTA)	mm
Desplazamiento transversal vía (CURVA)	mm
Desplazamiento transversal vía en plataforma (RECTA)	mm
Desplazamiento transversal vía en plataforma (CURVA)	mm
Desplazamiento transversal vía (Variación /metro)	mm/m
Desplazamiento vertical carril	mm
Desplazamiento vertical carril (Variación /metro)	mm/m
Desplazamiento vertical máximo entre carriles recíprocos	mm

Tabla 5.10 Datos de desplazamientos como consecuencia de mantenimiento.

5.2 SECCIONES DEL VEHÍCULO

Serán obligatorias como secciones de entrada del vehículo aquellas que estén geométricamente más expuestas y por tanto dan lugar al mayor gálibo.

En el caso del URBOS 100, éstas serán la sección de cabina y la sección de empate del módulo S.

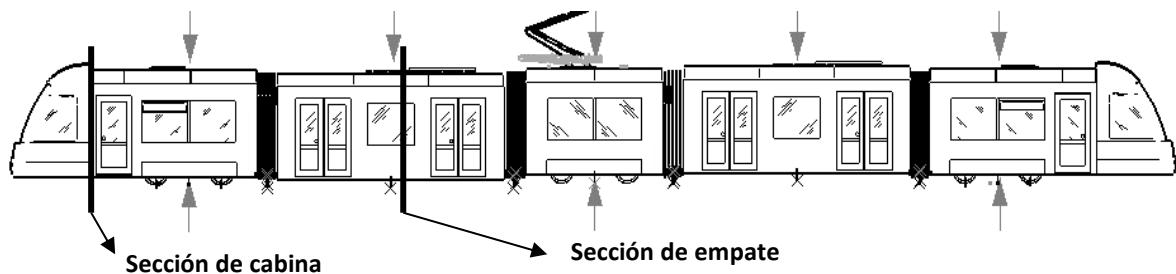


Ilustración 5.6 Secciones obligatorias URBOS 100 5 Módulos.

Para el URBOS AXL, debido a la fuerte influencia de los factores de articulación no es posible a priori identificar las secciones más perjudicadas. Por ello, se exigirán al usuario todas las relevantes, es decir, todas aquellas en voladizo o en empate. 5 para el caso de 3 módulos y 8 para el caso de 4 módulos.

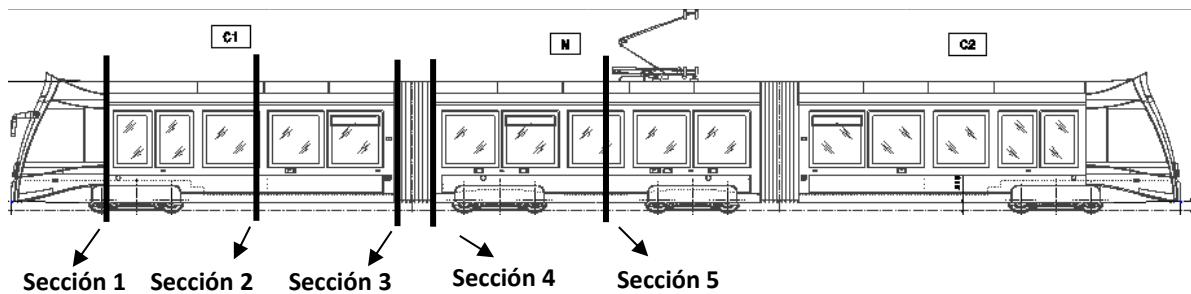


Ilustración 5.7 Secciones obligatorias URBOS AXL 3 Módulos.

5.3 SECCIONES DE INFRAESTRUCTURA. VALIDACIÓN DEL GÁLIBO

Como ejercicio de validación del gálibo de un vehículo, es necesario comparar el perfil dinámico del vehículo con los requerimientos del explotador. A menudo, esta validación consiste en una o más secciones estáticas, a las que el tren se tiene que poder acomodar. Es decir, el perfil de gálibo dinámico del vehículo tiene que ser compatible con el perfil de infraestructura. Estas secciones estáticas corresponden a un radio determinado de curva horizontal, así como para un lado, el exterior o el interior de esta.

5.4 SALIDAS DEL PROGRAMA

Una vez se ha pasado a la fase de cálculo del gálibo, la herramienta cuenta con varias posibilidades:

Salidas importantes del programa:

- Composición del perfil dinámico del vehículo. Qué secciones estáticas producen el perfil dinámico del vehículo.
- Perfil dinámico completo del vehículo.
- Distancias mínimas a mantener entre vías para vía doble (de acuerdo al cálculo BOStrab)
- Gálibo de partes bajas del vehículo. Relación de cada uno de los descensos en el vehículo.
- Estudio de gálibo: comparación del perfil dinámico máximo del vehículo contra las secciones estáticas de infraestructura cargadas en el programa.

Otras posibilidades:

- Resumen de desplazamientos absolutos por cada sección introducida.
- Resumen de factores de articulación del vehículo.
- Descarga de base de datos utilizada.
- Relación de máximos salientes del perfil dinámico para interior y exterior de curva.
- Exportación a .dxf y Excel del perfil dinámico, así como del estudio de gálibo.
- Exportación de 3D del afilado de cabina a CATIA, puntos 3D (.csv) y Excel.
- Exportación del 3D de la superficie de partes bajas del vehículo a CATIA.

5.5 OTROS DATOS

El programa permite guardar y cargar el proyecto de gálibo en .XML. Emplea .NET 4.0 como framework.

5.6 VALIDACIÓN Y MANUAL DE UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA

La implementación de los cálculos desarrollados según la norma ha sido validada a lo largo del proceso de desarrollo informático. Este proceso de validación se explica y desarrolla en el anexo III.

Como anexo IV se presenta el manual de la herramienta realizado para introducir el programa al equipo de CAF.

6 CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha analizado la norma de gálibo para tranvías BOStrab, la cual se ha adaptado de un cálculo genérico al cálculo particular de los vehículos ligeros producidos actualmente por la empresa CAF. Se ha conseguido, además, incorporar todas las variantes de estos vehículos.

Posteriormente, se ha adaptado la metodología a una herramienta de cálculo informática que permitirá en el futuro realizar el análisis de compatibilidad vehículo-línea de forma rápida y efectiva.

Con este proyecto, se han conseguido múltiples beneficios respecto al proceso de gálibo en tranvías seguido anteriormente en la empresa CAF.

Algunas de estas mejoras son:

- Agregar el cálculo de gálibo de todas las tipologías CAF en un solo proceso.
- Reducir el conocimiento necesario para el análisis de gálibo en tranvías.
- Flexibilizar el cálculo, pudiendo introducir múltiples secciones a analizar.
- Posibilitar el análisis en profundidad de los descensos del vehículo.
- Aumentar notablemente el número de consideraciones posibles, dando una inmensa flexibilidad al cálculo.
- Deducido de lo anterior, posibilidad de realizar gálibos definidos o absolutos mediante el mismo software.
- Acelerar el proceso de validación.
 - Rapidez en realizar gálibos comparativos.
 - Acceso rápido a los máximos salientes del vehículo.
- Facilitar de gran manera el cálculo del afilado de cabina.
- Acelerar el proceso de exportación de datos.
 - Exportación directa de perfiles dinámicos / planos.
 - Exportación a Excel de tablas de gálibo.
 - Exportación directa de 3D de afilado y de plano de partes bajas (anteriormente este proceso era enteramente manual).

En resumen, el análisis y adaptación de la norma de gálibo BOStrab en una herramienta informática permite mediante unas directrices fiables y respetadas en el mundo del ferrocarril el estudio y validación de un problema de por si complejo y muy variable como es el cálculo de gálibo en tranvías.

Asimismo, la creación de esta herramienta como resultado de este Proyecto Final de Grado, da la posibilidad a la oficina técnica de la empresa CAF de gestionar de manera mucho más rápida y fiable el gálibo en sus diseños, unificando el cálculo y acelerando en gran medida la validación y extracción de datos, sobre todo para estudios de gálibo pre-concursales.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Comité Técnico de los Estados Federados Alemanes para la BOStrab. (1 de diciembre de 1996, en la versión de 25 de marzo de 2015). TRStrab Lichtraum. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Bonn.
- Technical Committee CEN/TC 256 “Railway applications”. (Ed 16 2015). EN 15273 Railway applications — Gauges — Part 1: General — Common rules for infrastructure and rolling stock. EU.
- Technical Committee CEN/TC 256 “Railway applications”. (Ed 16 2015). EN 15273 Railway applications — Gauges — Part 2: Rolling stock. EU.
- Technical Committee CEN/TC 256 “Railway applications”. (Ed 16 2015). EN 15273 Railway applications — Gauge — Part 3: Infrastructure gauge. EU.
- Technical Committee CEN/TC 256 “Railway applications”. (Ed 15 2011). EN 15273 Railway Applications — Gauges — Part 4: Reference profiles and associated rules. EU.
- Technical Committee CEN/TC 256 “Railway applications”. (Ed 15 2016). EN 15273 Railway applications — Gauges — Part 5: Background, complementary information and calculation examples. EU.
- International Union of Railways. (Ed 10. 2006). UIC CODE 505 - 1 Railway transport stock – Rolling stock construction gauge
- International Union of Railways. (Ed 3 2010). UIC CODE 505 – 5 History, justification and commentaries on the elaboration and development of UIC leaflets of the series 505 and 506 on gauges
- The Contact Patch. (2010). Railway suspension. 20/09/2017, Sitio web: <http://the-contact-patch.com/book/rail/r1114-railway-suspension>
- Technische Universität Dresden. (2015). Características SW DIMA. 20/11/2017, de TUD Sitio web: <http://www.software-dima.de/>