



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica.

PROYECTO FIN DE CARRERA

# Análisis de los Parámetros del Gálibo Ferroviario a Escala.

Autor: José Antonio López Jiménez.

Tutor: Efrén Díez Jiménez.

Titulación: Ingeniería Tec. Industrial, Mecánica.

Leganés, Enero de 2015.



Título: Análisis de los Parámetros del Gálibo Ferroviario a Escala.

Autor: José Antonio López Jiménez.

Director: Efrén Díez Jiménez.

## EL TRIBUNAL

Presidente: Marco Antonio Álvarez Valenzuela.

Vocal: Vicente Salas Merino.

Secretaria: María Jesús Gómez García

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 19 de Enero de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Índice.

Índice.....	1
Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas.....	8
Capítulo I: Introducción.....	10
Capítulo II: Motivación.....	10
Capítulo III: Objetivos.....	13
Capítulo IV: Estado del Arte.....	13
Capítulo V: Normas NEM.....	21
5.1- El Origen de las Normas.....	22
5.2- Fundamento teórico de las NEM.....	22
5.3- Evolución de las NEM.....	23
5.4- Fases en la elaboración de las NEM.....	24
5.5- La etiqueta del MOROP.....	24
5.6- Factores de Reducción, escalas y anchos de vía.....	25
5.7- Gálibo.....	26
5.8- Entre-ejes de vía.....	31
5.9- Entrada a túneles.....	33
5.10- Construcción de la curva.....	37
5.11- Peralte en curva.....	45
5.12- Altura de la línea aérea de alimentación.....	46
5.13- Gálibo de material móvil.....	49
5.14- Masa de los vehículos a escala.....	51
Capítulo VI: Análisis del Gálibo Ferroviario.....	52
6.1- Introducción.....	53
6.2- Definiciones y conceptos para la obtención del gálibo.....	55
6.2.1- Coordenadas normales.....	55
6.2.2- Contorno de referencia.....	55
6.2.3- Desplazamiento geométrico.....	56
6.2.4- Holguras laterales.....	60
6.2.5- Coeficiente de inscripción.....	63
6.2.6- Curva de transición.....	65
6.2.6.1- Aspectos fundamentales.....	67

6.2.6.2-	Cálculo de la ecuación de la curva de transición, la clotoide. ....	69
6.2.6.3-	Construcción de la curva de transición a partir de una curva clotoide. 73	
6.2.7-	Peralte. ....	76
6.2.7.1-	Cálculo del peralte. ....	77
6.2.7.2-	Exceso o insuficiencia de peralte. ....	78
6.2.7.3-	Peralte y curva de transición. ....	80
6.2.8-	Centro de balanceo y desplazamiento cuasi-estático. ....	80
6.2.8.1-	Coeficiente de souplesse. ....	82
6.2.8.2-	Cálculo teórico del ángulo de giro cuasi-estático. ....	83
6.2.8.3-	Cálculo teórico del centro de balanceo. ....	89
6.2.9-	Reducciones. ....	90
6.2.10-	Salientes. ....	91
6.3-	Descripción de los distintos Gálivos. ....	91
6.3.1-	Gálivo de estático o de construcción del material. ....	92
6.3.2-	Gálivo cinemático. ....	92
6.3.3-	Gálivo de ocupación estático. ....	93
6.3.5-	Gálivo límite de obstáculos. ....	93
6.3.6-	Gálivo de obstáculos. ....	93
6.4-	Medida del gálivo. ....	94
6.5-	Conclusiones. ....	96
Capítulo VII:	Modelo Matemático de un TRD. ....	101
7.1-	Introducción. ....	102
7.2-	Modelo del TRD. ....	103
7.2.1-	Caja. ....	103
7.2.2-	Bogies. ....	103
7.2.3-	Caja de grasa. ....	104
7.2.4-	Eje calado. ....	104
7.2.5-	Suspensión primaria. ....	104
7.2.6-	Suspensión secundaria. ....	106
7.2.7-	Parámetros del TRD. ....	107
Capítulo VIII:	Cálculo del Gálivo según la NEM. ....	108
8.1-	Introducción. ....	109
8.2-	Gálivos según la Normativa NEM a escala H0 (1:87). ....	109
8.3-	Gálivos según la Normativa NEM a escala I (1:32). ....	112
8.4-	Gálivos según la Normativa NEM a escala X (1:5,5). ....	115

Capítulo IX: Cálculo del gálibo estático según la UIC. ....	118
9.1- Introducción.....	119
9.2- Normas de la UIC.....	119
9.3- Desplazamientos (D). ....	120
9.3.1- Desplazamientos geométricos y holguras laterales. ....	120
9.3.2- Desplazamientos cuasi-estáticos. ....	121
9.3.3- Desplazamientos totales.....	121
9.4- Salientes. ....	122
9.5- Reducciones.....	122
9.6- Gálibo estático. ....	123
9.7- Cálculo del Gálibo estático según la UIC. ....	123
9.7.1- Desplazamientos.....	123
9.7.2- Salientes. ....	128
9.7.3- Reducciones. ....	128
9.7.4- Gálibo estático.....	130
Capítulo X: Análisis de los parámetros característicos del gálibo ferroviario. ....	140
10.1- Introducción.....	141
10.2- Parámetros característicos para la escala H0 (1:87), I (1:32) y X (1:5,5). ....	142
Capítulo XI: La curva de transición.....	150
11.1- Introducción.....	151
11.2- Cálculo de una curva de transición AdT según la normativa NEM. ....	151
11.2.1- Gálibo en vía recta según la normativa NEM.....	152
11.2.2- Gálibo en vía curva según la normativa NEM. ....	153
11.2.3- Progresión del sobredimensionado E.....	154
11.2.4- Cálculo de la curva de transición AdT. ....	154
11.3- Construcción de una curva de transición según la geometría de la curva clotoide.....	156
11.4- Curva de transición Clotoide frente a una AdT según NEM.....	159
11.4.1- Cálculo de los aspectos fundamentales de la curva AdT.....	159
11.4.2- Comparación entre curvas y conclusiones. ....	160
Capítulo XII: Construcción del peralte.....	161
12.1- Introducción.....	162
12.2- Peralte teórico.....	162
12.3- Casos para el cálculo del peralte.....	163
Capítulo XIII: Conclusiones.....	167

Capítulo XIV: Trabajos futuros. ....	170
Capítulo XV: Referencias. ....	171
<i>Anexo: Etiqueta MOROP</i> .....	173



## Índice de Figuras.

Figura 1. Maquetas de barco de palas y Hélice de Leonardo da Vinci .....	13
Figura 2. Maqueta de tren de Lionel Cowen. ....	15
Figura 3. Relaciones de ancho de vía y relación de reducción.....	22
Figura 4. Etiqueta MOROP. ....	24
Figura 5. Factores de reducción según el ancho de vía .....	24
Figura 6. Gálibo de libre circulación en vía recta.....	25
Figura 7. Gálibo de libre circulación en curva .....	27
Figura 8. Progresión del sobre-ancho.....	29
Figura 9. Gálibo de libre circulación en vía estrecha .....	30
Figura 10. Gálibo de túnel con embocadura rectangular.....	32
Figura 11. Gálibo de túnel abovedado de vía única .....	33
Figura 12. Gálibo de túnel abovedado de vía doble .....	35
Figura 13. Ángulo de ataque en vehículo de empate rígido en tramo curvo.....	37
Figura 14. Dimensiones del AdT .....	38
Figura 15. Desviación de la alineación del tramo de vía recto.....	40
Figura 16. Disminución del radio del tramo de vía curvo.....	40
Figura 17. Valores intermedios del AdT. [mm]. ....	41
Figura 18. Peralte en curva.....	44
Figura 19. Peralte y AdT .....	45
Figura 20. Posición de la vía área.....	46
Figura 21. Posición del pantógrafo.....	48
Figura 22. Gálibo del material móvil.....	49
Figura 23. Esquema de los distintos gálibos .....	53
Figura 24. Eje de coordenadas normales.....	54
Figura 25. Secciones más desfavorables.....	55
Figura 26. Concepto de potencia .....	56

Figura 27. Cálculo dga.....	56
Figura 28. Cálculo dgi.....	58
Figura 29. Ancho de vía y carriles.....	60
Figura 30. Juego de vía.....	60
Figura 31. Desplazamiento en la zona interna de la curva.....	62
Figura 32. Desplazamiento en la zona externa de la curva.....	63
Figura 33. Curvas de transición clásicas.....	65
Figura 34. Arco de clotoide.....	67
Figura 35. Fuerzas durante un tramo curvo peraltado.....	76
Figura 36. Rampa de transición.....	79
Figura 37. Centro de balanceo y disimetría.....	80
Figura 38. Ángulos de inclinación del vehículo.....	81
Figura 39. Movimiento de un vehículo en curva.....	84
Figura 40. Vagón para comprobar los gálidos de la línea Carcaixent a Dénia.....	94
Figura 41. Equipo laser de medición de gálidos.....	94
Figura 42. Imágenes tridimensionales para la obtención de gálidos.....	95
Figura 43. Esquema representativo del gálibo estático de RENFE.....	97
Figura 44. Esquema representativo del gálibo cinemático de RENFE.....	98
Figura 45. Esquema representativo del gálibo de obstáculos de RENFE.....	99
Figura 46. Tren Regional Diesel (TRD).....	101
Figura 47. Esquema de un bogie.....	102
Figura 48. Eje de ruedas caladas.....	103
Figura 49. Bogie completo con los sistemas de suspensión.....	104
Figura 50. Gálibo de libre circulación en vía recta en H0 en ancho Nacional [mm]. ..	109
Figura 51. Gálibo de material móvil. Escala H0. Ancho Nacional [mm]. ..	111
Figura 52. Gálibo de libre circulación en vía recta para I en ancho Nacional [mm]. ...	112
Figura 53. Gálibo de material móvil para I en ancho Nacional [mm]. ..	113
Figura 54. Gálibo de libre circulación en vía recta para X en ancho Nacional [mm]. .	115

---

Figura 55. Gálbo de material móvil para X en ancho Nacional [mm]. .....	116
Figura 56. Gálbo cinemático de RENFE [mm].....	129
Figura 57. Gálbo estático de la sección externa [mm]. .....	131
Figura 58. Gálbo estático de la sección interna [mm]. .....	132
Figura 59. Gálbo estático de la sección externa escalado a H0 [mm]. .....	133
Figura 60. Gálbo estático de la sección interna escalado a H0 [mm]. .....	134
Figura 61. Gálbo de la sección externa escalado a I [mm]. .....	135
Figura 62. Gálbo de la sección interna escalado a I [mm]. .....	136
Figura 63. Gálbo estático para sección externa en escala X [mm]. .....	137
Figura 64. Gálbo estático para la sección interna en escala X [mm]. .....	138
Figura 65. Gálbos para escala H0 [mm]. .....	143
Figura 66. Gálbos para escala I [mm]. .....	145
Figura 67. Gálbos para escala X [mm]. .....	147
Figura 68. Gálbo en vía recta según la NEM [mm]. .....	151
Figura 69. Gálbo en vía curva según la NEM [mm] .....	152
Figura 70. Progresión del sobredimensionado "E" [mm]. .....	153
Figura 71. Curva de transición AdT según la norma NEM [mm]. .....	155
Figura 72. Curva de transición a partir de la clotoide [mm]. .....	157
Figura 73. Gráfica de comparativa entre AdT y Clotoide .....	159

## Índice de Tablas.

Tabla 1. Cotas de gálibo para vía recta [mm].	27
Tabla 2. Longitud de caja a escala según grupo [mm].	28
Tabla 3. Valores del sobredimensionado E [mm].	29
Tabla 4. Cotas de Gálibo para vía estrecha [mm].	31
Tabla 5. Distancia entre-ejes de vía en tramos recto [mm].	31
Tabla 6. Distancia entre-ejes de vía en tramo curvo [mm].	32
Tabla 7. Valor de la cota C para túnel abovedado de vía única [mm].	35
Tabla 8. Valor de la cota C para túnel abovedado de doble vía.	36
Tabla 9. Radio mínimo de curvatura	37
Tabla 10. Relación entre ancho de vía y dimensión de "f" [mm].	39
Tabla 11. Valores más significativos de la dimensión "L" [mm].	40
Tabla 12. Dimensión de "f" según la relación L/R [mm].	40
Tabla 13. Puntos intermedios del AdT [mm].	42
Tabla 14. Peralte máximo [mm].	45
Tabla 15. Valores de las cotas de la vía aérea [mm].	47
Tabla 16. Valores de las cotas del pantógrafo [mm].	48
Tabla 17. Valores de cota para el gálibo de material móvil [mm].	50
Tabla 18. Masa mínima del vehículo a escala.	50
Tabla 19. Coeficiente de inscripción para la zona interna de la curva.	61
Tabla 20. Coeficiente de inscripción para la zona externa de la curva	62
Tabla 21. Valores de los salientes para el ancho de vía internacional [m].	87
Tabla 22. Valores de la suspensión primaria de un TRD.	101
Tabla 23. Valores de la suspensión secundaria de un TRD	102
Tabla 24. Parámetros del TRD.	103
Tabla 25. Cotas para el gálibo de vía recta. Escala H0. Ancho Nacional [mm].	106
Tabla 26. Cotas del gálibo de material móvil. Escala H0. Ancho Nacional [mm].	107

---

Tabla 27. Cotas para el gálibo de vía recta. Escala I. Ancho Nacional [mm].	108
Tabla 28. Cotas del gálibo de material móvil. Escala I. Ancho Nacional [mm].	109
Tabla 29. Cotas para el gálibo para vía recta en escala X (1:5,5) [mm].	110
Tabla 30. Cotas para el gálibo de vía recta. Escala X. Ancho Nacional [mm].	111
Tabla 31. Cotas del gálibo de material móvil. Escala X. Ancho Nacional [mm].	112
Tabla 32. Datos del vehículo ferroviario [mm].	119
Tabla 33. Holguras laterales [mm].	121
Tabla 34. Coeficientes de inscripción.	121
Tabla 35. Salientes [mm].	124
Tabla 36. Reducción para distinta altura en la sección más desfavorable [mm].	125
Tabla 37. Gálibo Estático para distinta altura en la sección más desfavorable [mm].	127
Tabla 38. Parámetros característicos en escala H0 [mm].	139
Tabla 39. Parámetros característicos en escala I [mm].	140
Tabla 40. Parámetros característicos en escala X [mm].	142
Tabla 41. Comparación de reducción en escala H0 [mm].	143
Tabla 42. Comparación de reducción en escala X [mm].	144
Tabla 43. Cotas para el gálibo de vía recta [mm].	147
Tabla 44. Coordenadas del AdT [mm].	150
Tabla 45. Valores de la clotoide.	151
Tabla 46. Coordenadas de la clotoide [mm].	151
Tabla 47. Comparación entre Clotoide y AdT.	154
Tabla 48. Peraltes según normativa NEM. [mm].	156
Tabla 49. Peraltes para caso I [mm].	157
Tabla 50. Peraltes para el caso II [mm].	158
Tabla 51. Peraltes para el caso III [mm].	159
Tabla 52. Peraltes para el caso IV [mm].	160

## **Capítulo I: Introducción.**

El ferrocarril fue el medio de transporte que revolucionó el siglo XIX. La comunicación, el transporte, la economía o la cultura cambiaron drásticamente desde su llegada. Este medio de transporte no sólo ha sobrevivido a guerras, dictaduras o crisis económicas, también ha contribuido a superar estas adversidades de las épocas. El ferrocarril vive en continuo desarrollo, superando barreras, alcanzando mayores velocidades, ampliando la capacidad de transporte, reduciendo riesgos de accidente, alcanzando mejores rendimientos y en definitiva logrando ser un vínculo entre destinos. Este incesante desarrollo implica una ardua tarea en el estudio del ferrocarril.

El presente proyecto pretende enfocar el estudio del ferrocarril desde un punto de vista a escala, centrándose en el concepto del gálibo ferroviario y estudiando los aspectos que influyen en él. Por un lado, se ha estudiado y descrito el modelo de gálibo que presenta la Normativa Europea del Modelismo (NEM) y por otro se ha analizado el modelo de cálculo del gálibo ferroviario según los criterios de la *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC), buscando de este modo las similitudes y diferencias que existen a la hora de interpretar el gálibo ferroviario entre los dos modelos. Los primeros capítulos describen los dos modelos para después, con la ayuda de un modelo matemático real, el Tren Regional Diesel (TRD), comparar ambos modelos y encontrar qué aplicaciones prácticas puede proporcionar la normativa NEM en el estudio del gálibo ferroviario reproduciendo ensayos a escala.

El estudio del gálibo ferroviario implica el análisis de diversos elementos de ingeniería ferroviaria. Conceptos como curva de transición, peralte, desplazamientos, coeficiente de souplesse, centro de balanceo o disimetría se analizan con el fin de proyectar una idea clara del gálibo ferroviario y de este modo estar en disposición de realizar una comparación y mejora de la normativa NEM.

El mundo ferroviario presenta un amplio abanico de frentes de estudio. Cualquiera que indague en este mundo se dará cuenta que un único aspecto puede conllevar una vida de estudio y dedicación. La determinación del gálibo ferroviario, que a priori parece sencilla, es un proceso muy complicado que presenta dos problemas fundamentales. Uno es su cálculo exacto y el otro la implantación de un gálibo común para toda la diversidad de vehículos ferroviarios que circulan en la extensa red de vías. El estudio de elementos ferroviarios a escala puede ayudar en la resolución de estos dos problemas. Los ensayos a escala pueden revelar soluciones o nuevos problemas en el estudio del gálibo ferroviario, con la ventaja de que los costes que generen las modificaciones o rectificaciones se pueden sobrellevar.

Con este proyecto se pretende averiguar si la normativa NEM puede servir de base para el estudio del gálibo ferroviario mediante el ensayo a escala de elementos reales del mundo ferroviario.

## **Capítulo II: Motivación.**

A lo largo de la historia, las representaciones a escala o maquetas se han utilizado como un medio de comunicación para mostrar de forma clara e inmediata las características de un proyecto, más o menos complejo, de forma que pueda ser comprensible. Actualmente, ingenieros y demás profesionales del diseño ven en las maquetas una herramienta indispensable y eficaz para proyectar y mostrar ideas, así como, para comprender y controlar el resultado final de las obras proyectadas. No obstante, hoy en día la opinión popular más extendida es la de situar a la maqueta como mero objeto de pasatiempo, cuyo valor reside en el entretenimiento sin buscar una finalidad productiva concreta. Sin embargo, existe otra clase de modelismo técnico de menor difusión, en el que la maqueta se constituye como herramienta aplicada a la ciencia y como un excelente vehículo de comunicación aún más eficiente que las imágenes generadas por sofisticados programas de diseño, debido a la tridimensionalidad real de la forma. La aplicación de maquetas al mundo ferroviario permite realizar ensayos que interpretando la realidad busquen la forma de mejorar una situación ya existente, recrear alternativas, estudiar los problemas o incluso reproducir accidentes para obtener conclusiones.

Pese a que las maquetas pueden ser un medio de comunicación que complemente la presentación final de un proyecto, la aparición de programas de diseño asistidos por computador (CAD) ha mermado el valor de las maquetas como herramienta de trabajo. No obstante, aunque los programas informáticos permiten obtener datos acerca del volumen o el movimiento virtual del diseño, no pueden en ningún caso sustituir la verdadera tridimensionalidad de la maqueta. La reproducción a escala permite infinitos puntos de vista y sintetiza en un único elemento visible el aspecto y las características del elemento a replicar. Además, el empleo de maquetas no implica grandes esfuerzos económicos ni de complicados medios técnicos para su estudio.

En un principio, las maquetas pueden aplicarse como un medio didáctico en el aprendizaje. La reproducción a escala técnica implica la interpretación de normativas, planos, desarrollo de la visión espacial y en definitiva el aumento de la capacidad ingenieril al toparse con las dificultades que implica la construcción de una maqueta. En muchos casos, la construcción de una maqueta puede interpretarse como el primer contacto con un elemento real de ingeniería.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el modelismo ferroviario representa una gran industria a nivel mundial que se ha topado con muchos de los problemas que sólo la ingeniería podría resolver aplicando y estudiando diversas ramas de la tecnología. Si nos remontamos a la aparición del ferrocarril como medio de transporte, George Stephenson en 1825, quizás no pudo albergar la expansión a nivel mundial que iba a tener su invento. De haberlo sabido, quizás hubiera priorizado la idea de unificar criterios de fabricación de cara a la interoperabilidad entre los sistemas ferroviarios. De forma similar, el modelismo ferroviario ha sufrido la diversidad de fabricantes que optaban por la producción de maquetas según sus propios criterios. Esta traba que implicaba la incompatibilidad entre productos a escala, puede crear un símil con la realidad del ferrocarril. Afortunadamente, la creación de las normas NEM han disuelto

---

este problema. No obstante, la falta de unificación de los criterios a la hora de realizar ensayos en maquetas a escala puede hacer que se repita la historia.



## **Capítulo III: Objetivos.**

El objeto de este proyecto es estudiar las posibilidades que permite la normativa NEM para obtener el gálibo ferroviario a escala. El proyecto se puede dividir en los siguientes objetivos que están desarrollados en los diversos capítulos.

El primer objetivo es conocer las Normas Europeas de Modelismo (NEM), de forma que se describa cada norma que se implica en el gálibo ferroviario a escala. Se pretende de esta forma encontrar las similitudes que existen entre la norma NEM y el mundo ferroviario real.

El segundo objetivo es conocer el sistema ferroviario, acercándose a la terminología del gálibo. Analizando los parámetros más influyentes en la determinación del gálibo, como los desplazamientos geométricos, holguras laterales, coeficiente de inscripción, centro de balanceo, disimetría, salientes, coeficiente de souplesse y desplazamientos cuasi-estáticos. Así como profundizar en el estudio de la curva clotoide como curva de transición entre un tramo de vía recto y otro de radio determinado y la obtención del peralte que compense la fuerza centrífuga que sufre el vehículo en una curva.

El tercer objetivo es calcular el gálibo ferroviario a partir de un modelo real según la *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC), con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la normativa NEM.

El cuarto objetivo es optimizar la normativa NEM de forma que se acerque a la realidad en el cálculo del gálibo ferroviario para aplicación en ensayos a escala.

## **Capítulo IV: Estado del Arte.**

El mundo ferroviario y el modelismo probablemente tengan su punto de conexión gracias a la ingeniería y a la arquitectura. Por otro lado, la reproducción a escala se puede considerar un elemento de comunicación con el cual se puede expresar una idea, convirtiéndose así en una herramienta para inventores, estrategas o artistas. Las maquetas de diseño son el producto en tres dimensiones de la pasión de ingenieros, arquitectos y artistas modelistas. Se construyen para planes estructurales, promoción de proyectos o simplemente por diversión. No obstante, para visualizar el proceso de construcción de una obra o perfeccionar una forma simple es precisa la colaboración conjunta de delineantes, arquitectos, maquetistas e ingenieros.

Si nos remontamos en la historia, arqueólogos han hallado maquetas que datan, aproximadamente, del 2000 antes de Cristo. Estas maquetas eran modelos de barcos que probablemente se reproducían a escala por ser el barco la máquina más sofisticada de la época. No obstante, para encontrar al padre del modelismo aplicado a la ciencia habría que remontarse al siglo XV y citar al gran Leonardo da Vinci. Anatomista, arquitecto, artista, botánico, científico, escritor, escultor, filósofo, ingeniero, inventor, músico, pintor, poeta y urbanista, este polímata, se ayudó de las maquetas para canalizar el arte, la fantasía y la imaginación como cualquier maquetista actual. El barco de palas, la catapulta, la bicicleta o la hélice de giro, (ver siguiente figura1) fueron sólo algunos ejemplos recreados primero a escala por el célebre Hombre del Renacimiento.



Con el paso de los años, entre 1600 y 1700, los barcos a escala copaban la industria del modelismo. Se recreaban reproducciones a escala con tal exactitud que la venta al enemigo podía considerarse como traición. Estas maquetas eran construidas de la misma forma que los originales en los astilleros y simplemente se utilizaban como tributos o regalos a reyes o decoración en lugares emblemáticos.

Hasta finales del siglo XVIII, las maquetas no volverían a ser un instrumento técnico para ingenieros e inventores. En 1790, Estados Unidos sería el único país del mundo donde su Oficina de Patentes requiriera una maqueta para hacer efectiva una patente.

Durante noventa años, la oficina de patentes estadounidense recaudó 246.094 patentes con más de 200.000 maquetas representativas. Muchas de esas maquetas se conservan hoy en día en museos americanos.

Las maquetas fueron un elemento clave en la preparación de los soldados en la segunda guerra mundial. Entre otras utilidades, las maquetas se utilizaban para identificar al enemigo y los objetivos de los planes bélicos. En 1941, comenzó un plan de entrenamiento para pilotos en el que eran instruidos a partir de aviones a escala 1/3 que alcanzaban los 135 [km/h] con el fin de estudiar características como la maniobrabilidad de las naves.

Cabe destacar que la industria del cine, encontró en el uso de maquetas un filón para crear sus grandes producciones cinematográficas de la época. Por ello gran parte del presupuesto estaba y está destinado a la reproducción a escala. Es en el cine donde se trabaja con una simbiosis casi perfecta entre los nuevos programas de diseño asistido por ordenador (CAD) y el modelismo a escala, obteniendo unos resultados exageradamente realistas para el disfrute del espectador.

Probablemente la industria de la juguetería fuera la causante de la época dorada del modelismo en general y en particular del modelismo ferroviario. A finales del siglo XIX comenzaron a producirse unos trenes pequeños fabricados en chapa de hierro y movidos por un motor eléctrico. En 1891, en la feria de Leipzig, Märklin presentó la primera locomotora funcional a escala (1:32) de la historia. Un mecanismo de reloj de cuerda impulsaba a la pequeña locomotora de hojalata por unos railes. Posteriormente, con el fin de aumentar las ventas de su tienda de juguetes, Joshua Lionel Cowen a principios del siglo XX, puso en funcionamiento un tren eléctrico a escala en su escaparate. Y aunque no estaba en venta, recibió tantas peticiones que el reclamo terminó por convertirse en un clásico de la industria juguetera. Lo que empezó como una empresa dedicada a aparatos eléctricos, como ventiladores y dispositivos de iluminación, se convertiría en el fabricante de trenes eléctricos admirado por ferro-modelistas por su solidez de construcción y realismo en los detalles.



Figura 2. Maqueta de tren de Lionel Cowen. [3]

Pronto la industria del modelismo ferroviario alcanzaría su gran expansión. En 1950 cada fabricante de trenes a escala utilizaba su propio criterio, ofreciendo en bloque todo lo necesario para el montaje de un circuito en miniatura. La diversidad de material rodante, escalas, anchos de vía, sistemas eléctricos, enganches y demás condujo, en 1954, a la creación de una normativa que regulara y estandarizara todos los criterios de los fabricantes. La normativa NEM, creada por la “Unión Europea de modelistas ferroviarios y Amigos de los ferrocarriles”, cumpliría con este objetivo. Aspectos como el gálibo ferroviario, el ancho de vía o la curva de transición entre un tramo de vía recto y otro curvo, se tratan en la normativa NEM para dar una solución conjunta para todos los fabricantes de trenes a escala. La normativa NEM, aporta soluciones a problemas que cualquier ingeniero ferroviario afrontaría normalmente, con la salvedad que la normativa NEM está destinada al mundo ferroviario a escala reducida, mientras que el ingeniero se toparía con problemas de la vida real ferroviaria. No obstante, el nivel técnico con que afronta los problemas la normativa NEM puede dotarla con las cualidades necesarias para servir como base para la construcción de maquetas con el fin de realizar ensayos. Uno de los aspectos que trata la normativa NEM es el gálibo ferroviario.

En el mundo ferroviario real, la unificación a la hora de calcular el gálibo es un factor clave en la interoperabilidad entre sistemas ferroviarios. Fundada en 1922, la “Union Internationale de Chemins de fer” (UIC), tiene como objetivo unificar y armonizar las condiciones de explotación del transporte ferroviario. La UIC es el referente obligatorio para todos los que trabajan en el ámbito ferroviario. Está integrada por 145 empresas ferroviarias repartidas por los cinco continentes. En su conjunto, los países representados en la UIC suman 800.000 kilómetros de líneas de ferrocarril. Las empresas integradas en esta unión constan de más de siete millones de trabajadores

y los indicadores básicos también son espectaculares: 1,5 billones de viajeros por kilómetro y 5,7 billones de toneladas por kilómetro. Entre otras actividades, la UIC elabora normas y recomendaciones de aplicación general o restringida para el transporte internacional. También, asegura la representación del ferrocarril en organismos internacionales. Por otro lado, la UIC financia estudios y proyectos de Investigación y Desarrollo y fomenta el intercambio de experiencias entre empresas.

La interoperabilidad, tanto en el ámbito del ferrocarril convencional como de alta velocidad, es un aspecto clave en el progreso del ferrocarril. Se pretende actuar así sobre los problemas causados por las condiciones que se han arrastrado históricamente como consecuencia de las distintas soluciones técnicas de cada país a la señalización, las comunicaciones, la electrificación y, en general, la infraestructura o superestructura ferroviaria. La armonización técnica y normativa conduce a la apertura de las redes ferroviarias.

En 1913, en la ciudad de Berna, los países miembros de la Unidad Técnica decidieron adoptar un gálibo que sirviera para definir el material rodante utilizado en servicio internacional. Este contorno debería cumplir con tres condiciones:

1. El contorno de un vehículo que circula por un tramo de vía recto no debe sobrepasar el contorno definido en la Unidad Técnica. Este contorno se definía como “gálibo de vehículos de la Unidad Técnica”.
2. Los salientes, sobre el contorno de un vehículo cuando se encuentra en la posición estática más desfavorable sobre una vía en curva de 250 [m] de radio y 1,465 [m] de ancho, no debe sobrepasar el valor de 0,025 [m] para las partes bajas del vehículo y de 0,075 [m] para las partes situadas más de 0,430 [m] por encima del plano de rodadura.
3. Puede haber reducciones suplementarias según el contorno definido por las condiciones anteriores, de tal modo que, en una curva de 150 [m] de radio y de 1,465 [m] de ancho, los vehículos no deben alcanzar el contorno definido en dichas características.

La máquina de vapor que circulaba por las vías férreas encontraba su circulación limitada en las zonas fronterizas y en numerosos trayectos. La aparición de la tracción diesel y la tracción eléctrica aumentó la circulación entre otras redes, brindando así la oportunidad de unificar las reglas de construcción, ampliando de este modo las fronteras de las vías férreas. Pero las necesidades de construcción y de manejo de los elementos eléctricos y mecánicos eran difícilmente compatibles, sobre todo en las partes bajas, con el gálibo para los vehículos de la Unidad Técnica. Así la UIC en 1953 elaboró un gálibo de las partes bajas para vehículos motores a tracción diesel y confió esa tarea a una comisión sobre el gálibo. Para que los constructores pudiesen aprovechar su entrada al máximo de las redes sin tener un gasto excesivo, parecía razonable tener en cuenta para cada elemento, los desplazamientos que son susceptibles de producirse en diferentes condiciones de utilización. Este principio fue publicado el 1 de Enero de 1956, en la primera ficha UIC 505 “gálibo provisional de construcción para material motor de combustión interna (partes bajas)” completada en su segunda edición del 1 de Enero de 1957 con una tabla de salientes. El objeto del estudio fue entonces el conjunto del gálibo. Ahora bien, las condiciones existentes desde 1913 habían evolucionado. La velocidad de circulación había aumentado, las suspensiones habían evolucionado hacia el confort del pasajero y el transporte

excepcional circulaba de forma asidua por las redes vecinas. Por todo esto, se pidió a los departamentos de obras revisar la posición de los obstáculos, aunque no se estableció ninguna regla sobre las cotas de implantación a adoptar. En el caso de incidentes comprobados no podía imputarse ninguna culpa al material rodante, ni a la vía.

Parecía necesario buscar, no solo en las partes bajas, si no también, en las partes altas de los vehículos motores que iban a circular en régimen internacional, un conjunto de reglas que asegurasen la compatibilidad de los desplazamientos de las locomotoras y la posición de las instalaciones en la vía. La definición de gálibo de las partes altas del material motor, debería tener en cuenta los desplazamientos de la caja y de la suspensión en su definición. Es decir, proporcionar al gálibo un carácter cinemático.

El 1 de Enero de 1958 se publicó la ficha UIC 505. Esta ficha proporcionaba el “gálibo cinemático provisional del material motor con motores de combustión interna, tanto para las partes altas como para las partes bajas”. Dicho de otro modo, el gálibo de las partes bajas, estudiado anteriormente para el material motor con motores de combustión interna que se encontraba en la ficha 505, fue extendido al conjunto de vehículos motores en la tercera edición de la ficha 505 el 15 de Enero de 1958. En fin, el descubrimiento de las locomotoras y los automotores eléctricos de poli-corriente en servicio internacional, llevaron las investigaciones a determinar reglas de gálibo para los pantógrafos. Las reglas, que bien entendidas, debían tener en cuenta los nuevos conceptos que se estaban imponiendo y armonizarse con las nuevas reglas del gálibo.

La cuarta edición de la ficha UIC 505 llegó el 1 de Enero de 1961 con el nombre de “gálibo cinemático provisional del material motor utilizado en servicio internacional”. Esta comprendía su aplicación al conjunto de vehículos motores utilizados en servicio internacional, a las partes bajas, a las partes altas y los elementos del techo. Las reglas elaboradas confirmaron, en la medida de lo posible, las dimensiones de los vehículos ya utilizados en servicio internacional. Algunas excepciones subsistieron para los vehículos motores utilizados en los tramos límites y que pudieron, sin inconveniente, continuar circulando al ser objeto de estudios bilaterales. Las reglas sobre las modificaciones importantes de las instalaciones fijas no se impusieron a las redes, sin embargo, fueron pedidas cuando no resultaban gastos notables al suprimir los puntos singulares que llevaban a reducir sensiblemente las dimensiones del gálibo. A falta de poder suprimir estos puntos, las redes tuvieron la responsabilidad de excluir los tramos de líneas que poseían zonas reducidas de las listas de líneas de libre acceso al tráfico internacional. Si se actuaba de este modo, la circulación de los vehículos motores no comportaba ninguna gravedad.

Puede parecer lógico limitar a los vehículos motores los conceptos que están claros y aplicar reglas diferentes de gálibo a los vehículos remontados. La comisión del gálibo estuvo encargada de estudiar la ampliación de los nuevos conceptos al material remolcado, a pasajeros y a mercancías. Se podría pensar que después de los estudios sobre el gálibo de los vehículos motores, la preparación de los gálibos de los coches y los vagones sería fácil. Nada de eso. En efecto, la circulación e interpretación de los vehículos motores está sometida a otras condiciones de gálibo y dieron lugar a convenios preliminares donde las redes conservaban la posibilidad de verificar las características de los vehículos a recibir. Por el contrario, los vehículos remolcados

podían ser aceptados sin control. Las redes debían asegurar que todas las líneas de su propia red por donde podían circular vagones en servicio internacional, evitando los desvíos, fuesen capaces de recibir todos los vehículos susceptibles de estar contruidos siguiendo las reglas adoptadas. En consecuencia, el gálibo de los vehículos remolcados fue definido de tal modo que a pesar de las condiciones de inscripción en vías diferentes, los salientes nunca serían superiores a los vagones para los vehículos motores. Por tanto, las condiciones de inscripción en la vía de los vehículos remolcados son diferentes de los valores para los vehículos motores.

El 14 de Septiembre de 1982, se llegó a la conclusión de que era preciso conocer el “espacio libre” existente a lo largo de toda la red ferroviaria. Esta operación no se pudo realizar debido a la imposibilidad de fabricar un vagón que auscultara la infraestructura por esas fechas. En su lugar, la Dirección de Material y la Dirección de Obras e Instalaciones utilizó un “perfil de espacio libre”, que montado sobre una dresina, recorrió la mayor parte de la red ferroviaria. Después de dos años y habiendo recorrido el 85% de la Red se detectaron 182 túneles o pasos superiores que habían interceptado dicho “perfil de comprobación de espacio libre”. De este perfil, aplicando las reglas definidas por la UIC en la ficha 505, se deducía un contorno de referencia del gálibo cinemático que en sus partes altas dejaba fuera de norma a bastante material móvil existente.

A lo largo del tiempo, la Comisión Técnica ha elaborado un texto en el que deduce las reglas de construcción del material que elabora, las reglas que resultan para los servicios de la vía en las cotas de implantación o mantenimiento de los obstáculos fijos y de las entrevías. Este texto se divide en las siguientes fichas:

- Ficha UIC 505-1, aplicable a locomotoras.
- Ficha UIC 505-2, aplicable a vehículos de viajeros.
- Ficha UIC 505-3, aplicable a vehículos de mercancías.
- Ficha UIC 505-4, aplicable a implantación de obstáculos.
- Ficha UIC-505-5, bases comunes de las fichas UIC 505.

Se han ido publicando diversas ediciones de actualización de fichas UIC, hasta unificar las fichas UIC 505-1, 505-2 y 505-3 en una nueva ficha UIC 505-1 llamada “Gálibo de construcción de material ferroviario”. RENFE realizó, en 1985, una instrucción técnica. Este reglamento entró en vigor el 1 de Enero de 1986, aplicando las reglas de la UIC sobre gálibos que deducían el contorno de referencia, de forma empírica, a partir de la envolvente máxima de los vehículos que circulaban en el año 1985 sin problemas. Este contorno de RENFE es más ancho y más bajo que el definido por la UIC. Pero la necesidad del ancho de vía internacional en los trenes de alta velocidad hizo indispensable una actualización de la Instrucción Técnica.

Sin embargo, hasta la fecha, para la determinación del gálibo, no se han considerado los vehículos ferroviarios como sistemas mecánicos en toda su complejidad, abordando su dinámica en relación al contorno que lo utiliza como un sistema de ecuaciones, es decir, un modelo que contemple los diversos elementos de que está

formado ( ejes calados y cajas de vehículos, estructuras intermedias flexibles (bogies) y los componentes por los que están conectados a estos (muelles y amortiguadores), resolviendo sus desplazamientos lineales y sus giros para su determinación.

Después de este repaso por la historia del modelismo y del gálbo ferroviario, se puede intuir la importancia de un estudio exhaustivo en el contorno del ferrocarril. Este estudio puede incrementar factores como la capacidad de transporte, la velocidad o la seguridad del transporte ferroviario. Una herramienta útil para este estudio puede estar en las reproducciones a escala de elementos ferroviarios para después someterlos a ensayos, es decir, en las maquetas. Siendo estas una herramienta económica que permite al ingeniero visualizar “in situ” los infinitos puntos de vista del modelo a escala para encontrar soluciones factibles a problemas reales.



## **Capítulo V: Normas NEM.**

- El origen de las Normas.
- Fundamentos teóricos de las NEM
- Evolución de las NEM.
- Fases en la elaboración de las NEM.
- La etiqueta MORP.
- Factores de reducción, escalas y ancho de vía.
- Gálibo.
- Entre-ejes de vía.
- Entrada a túneles.
- Construcción de la curva.
- Peralte en curva.
- Altura de la línea de alimentación.
- Gálibo de material móvil.
- Masa de los vehículos a escala.

## **Capítulo V: Normas NEM.**

### 5.1- El Origen de las Normas.

Las Normas Europeas de Modelismo Ferroviario (NEM) satisfacen la necesidad de uniformidad de escalas, ancho de vía, sistemas de alimentación eléctrica, enganches y dimensiones de vía y rueda dentro del modelismo ferroviario.

En 1950 emergía una gran afición a las miniaturas de ferrocarril por toda Europa y Estados Unidos pero prácticamente cada país se regía por su propia norma. Esto dificultaba la compatibilidad entre los diferentes productos de cada fabricante. Para poner remedio a tal embrollo, en 1954 las asociaciones de aficionados del ferrocarril en miniatura a nivel nacional comenzaron a agruparse a la Unión Europea de Modelistas Ferroviarios y Amigos del Ferrocarril (Unión MOROP). La Unión MOROP confió la tarea de la creación de las NEM a la Comisión Técnica (CT), creada para este fin y que todavía hoy en día sigue trabajando en el conjunto de las normas para que se adapten a la evolución de la técnica del ferrocarril en miniatura. Las bases de las NEM estaban recogidas en otras normas de otras asociaciones previas, normas como las MONO de la República Federal Alemana y las NORMAT de la República Democrática Alemana.

### 5.2- Fundamento teórico de las NEM.

Las NEM permiten relacionar los anchos de vía con las relaciones de reducción aplicables a los diversos parámetros. Para ello se utiliza un diagrama doble-logarítmico (figura 3) que permite representar sobre una línea recta los puntos de una relación de reducción uniforme (en ordenadas) para los distintos anchos de vía (en abscisas). En el diagrama aparecen las diferentes relaciones:

- a) RB: Relación Base: Relación entre el ancho de vía en miniatura y el ancho de vía real.
- b) RS1: Relación Especial: Relación entre el ancho de vía y el ancho de la llanta y del carril.
- c) RS2: Relación Especial: Relación entre el ancho de vía y la pestaña.
- d) RS3: Hoy en día no tiene razón de ser.

Las relaciones especiales sobredimensionan ciertos elementos por razones de seguridad. La Relación RS3 tenía en cuenta la tendencia de algunos fabricantes de la escala H0 a sobredimensionar el chasis, actualmente corregido.

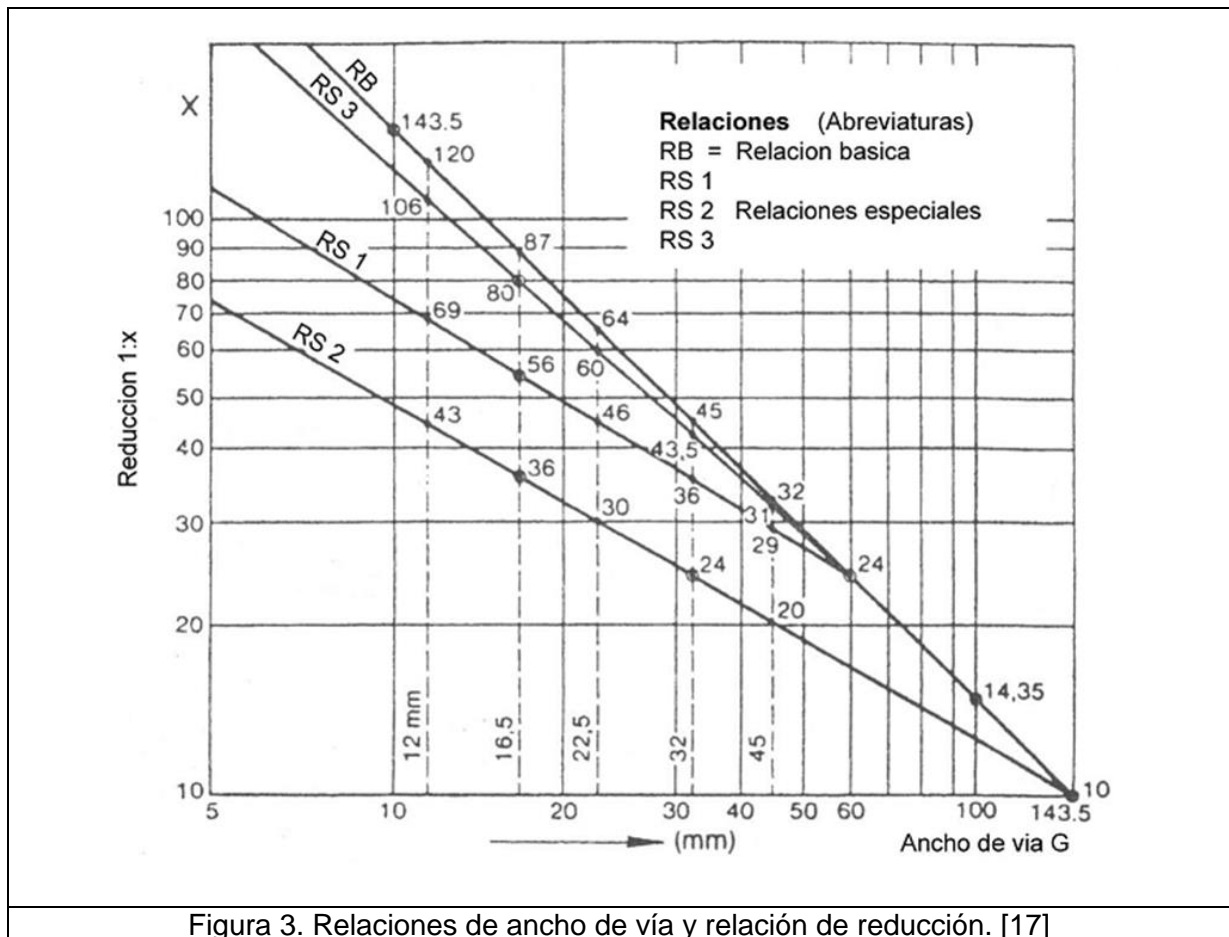


Figura 3. Relaciones de ancho de vía y relación de reducción. [17]

### 5.3- Evolución de las NEM.

Las NEM evolucionan constantemente adaptándose a los diversos fabricantes y aunque considera fundamental el diagrama de reducción, a día de hoy no es tan riguroso con las relaciones especiales (RS).

La tendencia actual de las NEM es compatibilizar con las normas NMRA (Normativa Americana) modificando aspectos como la definición de dimensiones que pasa de un valor nominal más una tolerancia a estar definida por un máximo y un mínimo, obteniendo así una mejor fidelidad sin perturbar la seguridad funcional. Por otro lado, la evolución de las NEM trata de distinguir las normas en diferentes categorías:

- Normas Obligatorias: Constan del conjunto de normas indispensables para certificar una explotación segura y fiel al prototipo, respaldando la coexistencia de los diferentes fabricantes.
- Recomendaciones: No son normas de necesario cumplimiento. Componen un cúmulo de consejos e indicaciones con el fin de asemejarse al prototipo asegurando las permutaciones entre fabricantes.
- Documentación: Recoge indicaciones, resúmenes, referencias y técnica de medición que ayudan al trabajo o sinopsis del proyecto.

#### 5.4- Fases en la elaboración de las NEM.

Las etapas en la elaboración de las NEM constan de propuesta, anteproyecto y proyecto. La última etapa será la de difundir la nueva norma por “MOROP Inform” y en la prensa especializada según la norma en vigor de la NEM 003.

La elaboración de una nueva norma en las NEM comienza con la presentación de una propuesta en alemán o francés por la Comisión Técnica (CT) o por asociaciones miembro del MOROP. Particulares, como grupos de trabajo o clubes, presentan sus propuestas por medio del delegado del país si se trata de un país representado en la CT y si no, recurren al secretario de la CT. Después se realiza un examen previo de la propuesta y se envía al director de la CT para incluirla en el orden del día de la siguiente sesión. El director de la CT presenta la propuesta y se procede a la deliberación y voto de su admisión por parte de los delegados con derecho a voto. Una vez aprobado se designa un redactor con la misión de realizar un anteproyecto. Este anteproyecto vuelve a presentarse ante el director de la CT que lo distribuye a los delegados con derecho a voto. Tras reflexionar se pasa a la etapa de proyecto. El proyecto debe corresponder en forma y fondo a la norma definitiva a expensas de ligeras modificaciones. No obstante, el proyecto es enviado a industria, asociaciones, prensa, personal con derecho a conocimiento y a todos los miembros con derecho a voto para que manifiesten su dictamen. Posteriormente a ver las discrepancias presentadas, la CT vota y si se obtiene una mayoría superior a los dos tercios, el proyecto se envía a la Asamblea General del MOROP para su aprobación. Presidente del MOROP y director de la CT discuten cuestiones que debieran ser aclaradas y por último aprueban la norma para su publicación en prensa especializada y en “MOROP Inform”. Por último cabe destacar que si el proyecto fuera rechazado por la Asamblea General en esta última etapa, ésta podría encargar a la CT iniciar el trabajo nuevamente.

#### 5.5- La etiqueta del MOROP.

Con el objetivo de informar al consumidor, la etiqueta MOROP reconoce la compatibilidad de los fabricantes de maquetas con las normas NEM. En lo que respecta a la vía, se consideran dos niveles:

- a) Nivel I: acata todas las normas NEM menos las que el fabricante considera necesarias para el funcionamiento.
- b) Nivel II: respeta todas las normas NEM sin distinción.

En el [ANEXO 1.docx](#) podemos ver, reflejado en una tabla, las diferentes normas que debe cumplir el modelo, dependiendo si se trata de material rodante, vía o accesorios. Con ánimo de no fragmentar la información creo conveniente citar la tabla de material rodante y accesorios.

Para conseguir la etiqueta MOROP los fabricantes deben enviar sus modelos al MOROP y si supera el proceso de homologación obtendrá la validez de su modelo que podrá lucir la etiqueta (figura 4) la cual podrá ser una referencia de calidad de su producto.

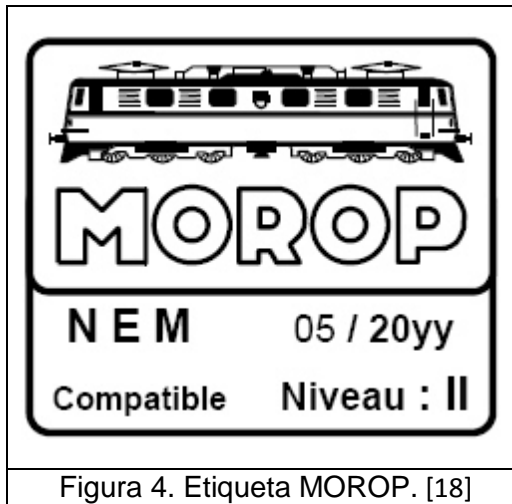


Figura 4. Etiqueta MOROP. [18]

5.6- Factores de Reducción, escalas y anchos de vía.

La norma NEM 010 de obligado cumplimiento se basa en la siguiente tabla (figura 5). En esta tabla podemos encontrar los diferentes anchos de vía en miniatura según la escala y el ancho de vía real. Las escalas básicas (“Z”, “N”, “TT”, “H0”, etc.) hacen referencia a los anchos de vía reales, aquellos superiores a los 1250 milímetros, mientras que los anchos de vía reales por debajo de los 1250 milímetros se han dividido en cuatro grupos, cada grupo designado por una letra, “m”, “e”, “i” y “p”.

Anchos vía prototipo de a	Relación de reducción	1 : 220	1 : 160	1 : 120	1 : 87	1 : 64	1 : 45	1 : 32	1 : 22,5	1 : 16	1 : 11	1 : 8	1 : 5,5	
1250 - 1700		• Z	N	TT	H0	S	O	I	II	III	V	VII	X	
850 < 1250		Zm	Nm	TTm	H0m	Sm	Om	Im	IIIm	Vm	VIIIm	Xm	•	
650 < 850		Ne	TTe	H0e	Se	Oe	le	IIe	Ve	VIIe	Xe	•	•	
400 < 650		TTi	H0i	Si	Oi	li	IIIi	Vi	VIIIi	Xi	•	•	•	
300 < 400		H0p	Sp	Op	Ip	IIp	Vp	VIIp	Xp	•	•	•	•	
		4,5	6,5	9	12	16,5	22,5	32	45	64	89	127	184	260
									1¼	2½	3½	5	7¼	10¼
		ancho de vía en miniatura												

Figura 5. Factores de reducción según el ancho de vía. [19]

Para comprender mejor la anterior tabla exponemos un pequeño ejemplo:

Ejemplo: El ancho de vía en miniatura con un factor de reducción 1:87 de una vía real con un ancho entre 650 y 850 milímetros corresponde a 9 milímetros en escala H0e.

### 5.7- Gálibo.

En ferrocarriles, el gálibo indica la distancia mínima de paso que deben permitir los túneles, puentes y demás estructuras, y por tanto la cercanía máxima de postes, semáforos, señales y resto de objetos contiguos a la vía. Se usa también para marcar la medida máxima de los vagones y vehículos.

Dado que el gálibo puede verse como una norma de dimensiones para evitar el choque de vehículos entre sí y de los mismos con el ambiente en el que se mueven, se dice que los vehículos poseen gálibos máximos y los ambientes gálibos mínimos. Esto significa que ningún vehículo puede ser mayor que su gálibo máximo estipulado invadiendo la zona de estructuras, y que ninguna estructura puede invadir la zona estipulada para un vehículo cumpliendo con un gálibo mínimo estipulado. Al mismo tiempo los gálibos máximos y mínimos no coinciden, sino que están distanciados por un margen de seguridad.

El Gálibo es un arco o túnel real o virtual que determina si las dimensiones máximas de ancho y alto de un objeto le permiten atravesar o alojarse en una cavidad previamente construida, es decir, permitir que ese objeto pase a través o se aloje, sin que colisione contra las paredes de esa cavidad, túnel, puerta, puente, etc.

Las normas que reflejan estas distancias según la escala que correspondan y el tipo de vía (recta, curva o estrecha) son la NEM 102, NEM103 y NEM 104, siendo las dos primeras de obligado cumplimiento y la última una recomendación. La NEM 102 define el gálibo de libre circulación en vía recta teniendo en cuenta la siguiente figura (figura 6) con su correspondiente tabla de medidas en milímetros.

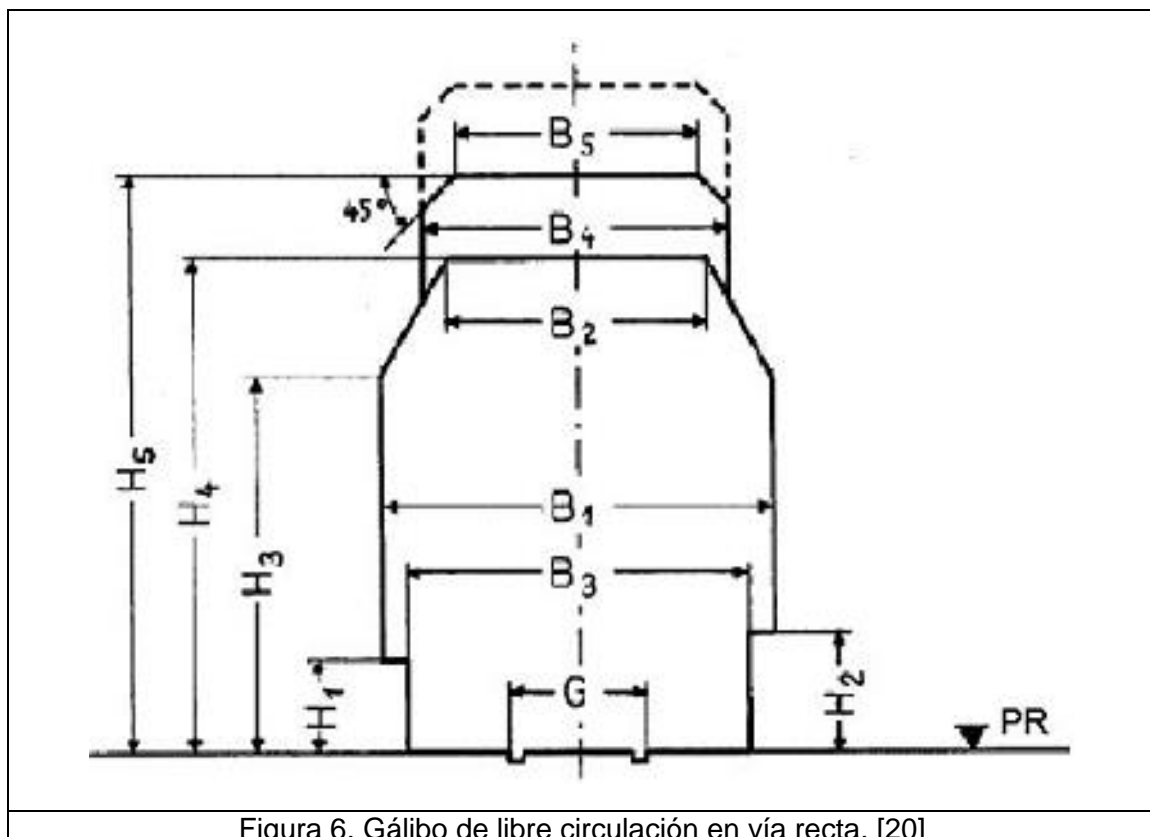


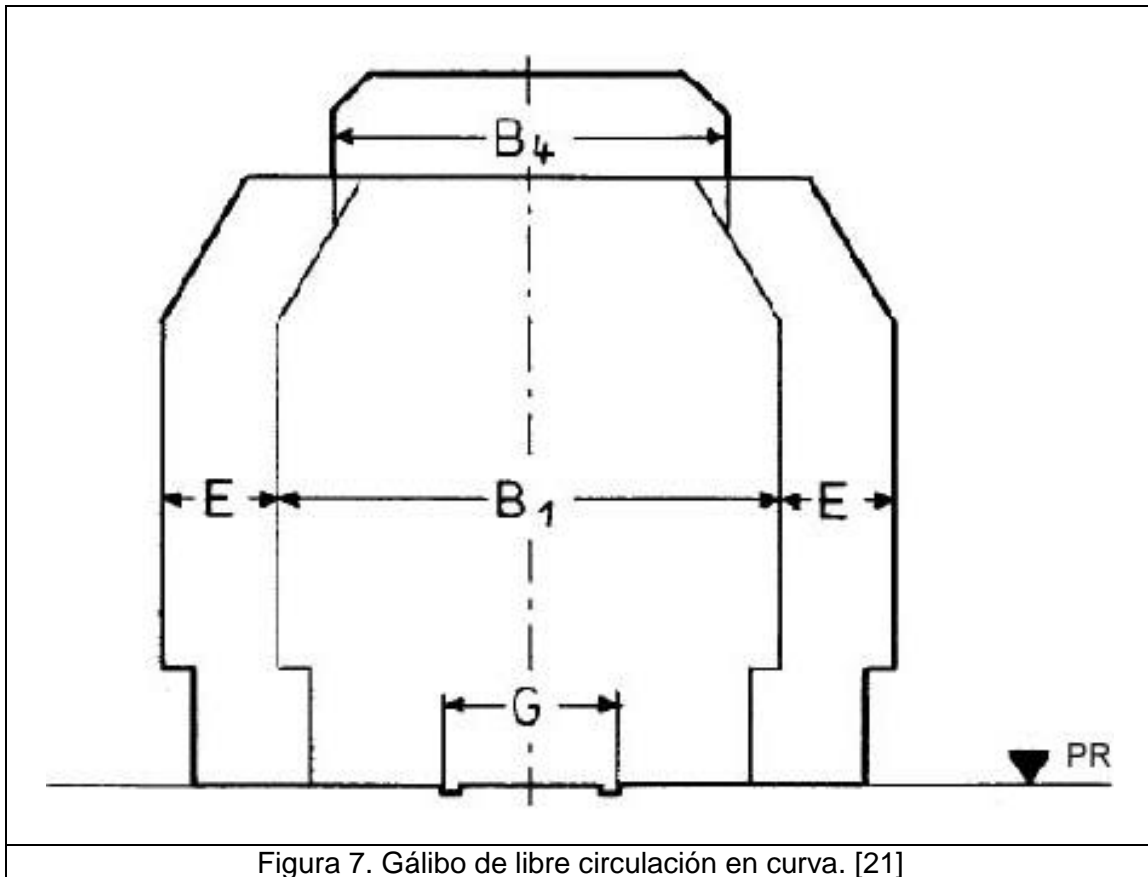
Figura 6. Gálibo de libre circulación en vía recta. [20]

En la siguiente tabla (tabla 1) se detallan las cotas en milímetros correspondientes a cada escala.

Escala	G	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	Explotación por catenaria		
									B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	H <sub>5</sub>
<b>Z</b>	6,5	20	14	18	4	6	18	24	16	13	27
<b>N</b>	9,0	27	18	25	6	8	25	33	22	18	37
<b>TT</b>	12,0	36	24	32	8	10	33	43	28	22	48
<b>H0</b>	16,5	48	32	42	11	14	45	59	38	30	65
<b>S</b>	22,5	66	44	57	15	19	60	78	50	38	87
<b>O</b>	32,0	94	63	82	21	27	85	109	68	52	120
<b>I</b>	45,0	130	87	114	30	38	118	150	93	71	165
<b>II</b>	64,0	184	124	154	35	52	168	214	140	106	235

**Tabla 1. Cotas de gálibo para vía recta [mm].**

En la NEM 103 se detalla el gálibo de libre circulación en vía curva. En la figura siguiente (figura 7), observamos la sobredimensión necesaria "E" que tiene en cuenta la amplitud de los desplazamientos transversales que sufre el vehículo al trazar una curva.



Según la NEM 103, una vez escogida la escala, la cota "E" de sobredimensionado depende de dos factores:

- a) El grupo: hace referencia a las medidas reales de las cajas y las distancia entre bogies. Tendremos tres grupos:
- **Grupo a:** Cajas menores de 20,0 [m] y distancia entre pivotes de bogie menores de 14,0 [m].
  - **Grupo b:** Cajas menores de 24,2 [m] y distancia entre pivotes de bogie menores de 17,2 [m].
  - **Grupo c:** Cajas menores de 27,2 [m] y distancia entre pivotes de bogie menores de 19,5 [m].

La siguiente tabla (Tabla 2) refleja la longitud de caja según grupo y escala en milímetros.

Escala	Z	N	TT	H0	S	0	I	II
<b>Grupo a</b>	91	125	167	230	313	460	625	889
<b>Grupo b</b>	110	151	202	278	378	556	756	1076
<b>Grupo c</b>	124	170	227	313	425	625	850	1209

**Tabla 2. Longitud de caja a escala según grupo [mm].**



b) Radio de la curva: una vez asignado el Grupo, el Radio de la curva determinará el valor del sobredimensionado “E” según la siguiente tabla (tabla 3) en milímetros. Evidentemente, las zonas sombreadas de la tabla representan la imposibilidad de trazar una curva tan cerrada con un vehículo de tal escala y por eso no existe sobredimensionado.

Escala	Z			N			TT			H0			S			O			I			II					
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c			
Radio de la curva	Grupo de vehículo																										
175	2	3	5	4																							
200	2	3	4	4	5																						
225	2	2	4	3	5	7																					
250	1	2	3	3	5	6	6																				
275	1	2	3	3	4	6	5	8																			
300	1	2	3	2	4	5	5	7	10																		
325	1	1	2	2	3	5	4	6	9	9																	
350	1	1	2	2	3	4	4	6	8	8	12																
400	0	1	2	1	2	4	3	5	7	7	11	14															
450	0	1	1	1	2	3	3	4	6	6	9	12	12														
500	0	1	1	1	1	3	2	4	5	5	8	11	10	16													
550	0	1	1	0	1	2	2	3	4	4	7	10	9	14	19												
600	0	1	1	0	1	2	1	2	4	4	6	9	8	13	17	19											
700	0	0	0	0	0	1	1	2	3	3	5	7	7	11	15	16	25										
800	0	0	0	0	0	1	0	2	3	3	4	6	6	9	13	14	22	29									
900	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	3	5	5	8	11	12	19	25	23								
1000	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	4	4	7	9	10	17	22	20	31							
1200	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	3	5	7	8	14	18	16	25	34						
1400	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	4	6	7	11	15	13	21	28	31					
1600	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	3	5	6	9	13	11	18	24	26	41				
1800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	4	5	8	11	9	15	21	23	36	47			
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	4	7	9	7	13	18	20	32	42			
2500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	5	10	13	15	24	32			
3000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	4	3	7	10	11	19	26			
3500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	4	2	5	8	9	16	21			
4000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	4	6	6	13	18			

Tabla 3. Valores del sobredimensionado E [mm].

La siguiente figura (figura 8) muestra la progresión que debe cumplir el sobre-ancho “E” antes del inicio de una curva. La progresión del valor “E” debe comenzar a una distancia igual o superior a 15 veces el valor del ancho de vía (G) del inicio de la curva, alcanzando el valor de “E”, tanto en el interior de la curva como por el exterior, al comenzar a trazar la curva. No obstante, por motivos de seguridad, la cota “E” debe alcanzarse antes por el exterior de la curva que por el interior de la curva. A una distancia igual o superior de cinco veces el valor del ancho de vía (G) respecto al inicio de la curva, el exterior de está ya debe contar con el sobre-ancho “E” tras su progresión.

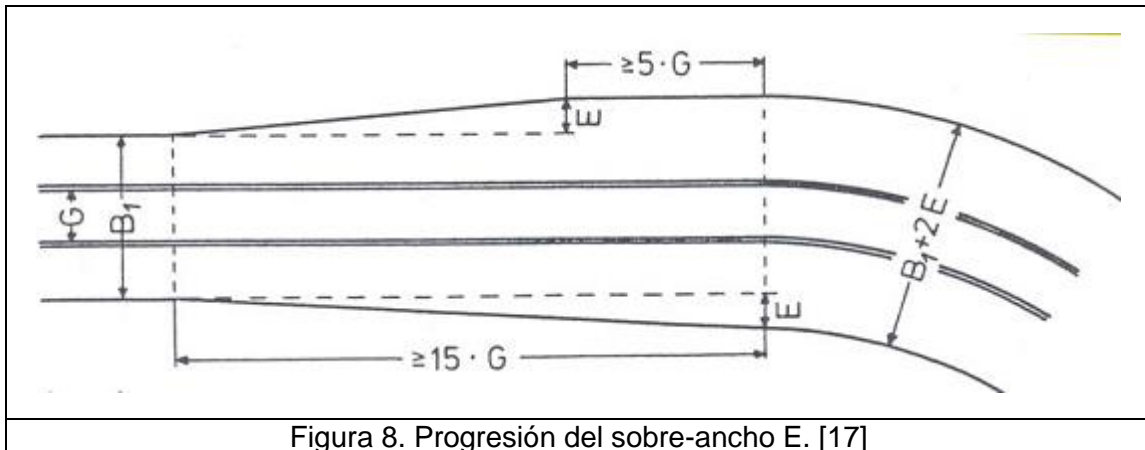


Figura 8. Progresión del sobre-ancho E. [17]

El gálbo de libre circulación para vías estrechas viene detallado en la NEM 104. Las vías estrechas son aquellas comprendidas entre 650 y 1250mm. Como podíamos observar en la figura 5, la escala en vías estrechas va acompañada de un subíndice (m, e, i, p). La NEM 104 refleja las cotas para las escala con subíndice "m" y subíndice "e" por razones de funcionalidad. La siguiente figura (figura 9) representa las cotas del gálbo para vías estrechas y se pueden encontrar los valores de las cotas en la tabla contigua (tabla 4) a la figura. No obstante, podemos observar en la figura 9 el sobredimensionado "E" aplicable tanto en el interior como hacia el exterior de la curva, de igual modo que para un ancho de vía estándar. Este valor "E" se calcula con la siguiente ecuación (ecuación 1) y depende del radio de la curva "R" y del empate rígido o distancia de los pivotes de los bogies de los vehículos más largos "a".

$$E = R - \sqrt{R^2 - (a/2)^2}$$

Ecuación 1: Sobredimensionado E para vía estrecha.

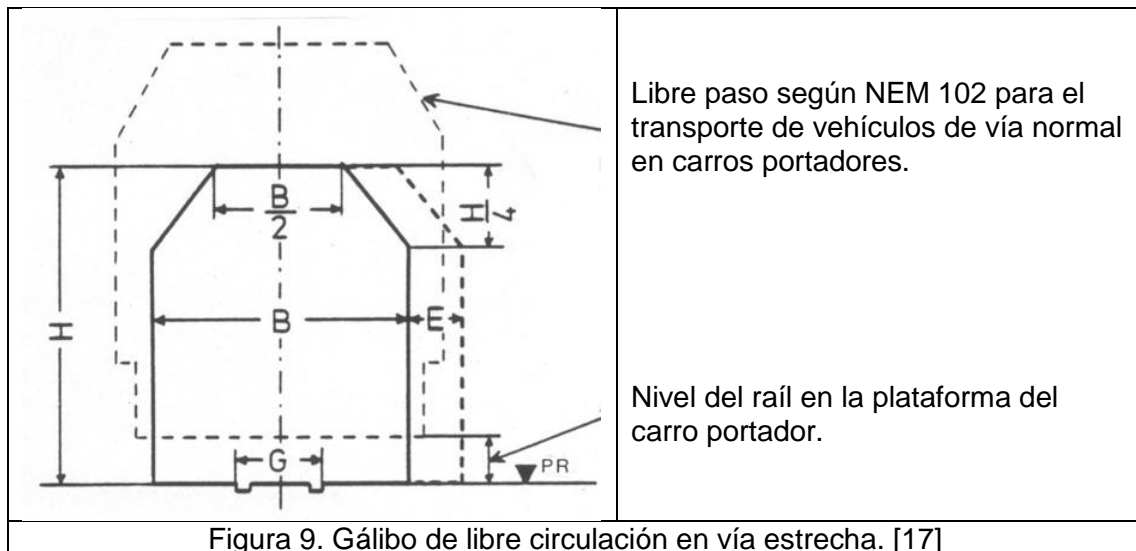


Figura 9. Gálibo de libre circulación en vía estrecha. [17]

Escala	Ancho de vía	H	B
Z <sub>m</sub>	4,5	19	16
N <sub>m</sub>	6,5	26	22
TT <sub>m</sub>	9,0	34	28
HO <sub>m</sub>	12,0	48	38
S <sub>m</sub>	16,5	64	52
O <sub>m</sub>	22,5	90	74
I <sub>m</sub>	32,0	126	104
II <sub>m</sub>	45,0	178	146
N <sub>e</sub>	4,5	24	20
TT <sub>e</sub>	6,5	32	26
HO <sub>e</sub>	9,0	46	36
S <sub>e</sub>	12,0	60	50
O <sub>e</sub>	16,5	68	70
I <sub>e</sub>	22,5	120	98
II <sub>e</sub>	32,0	170	138

Tabla 4. Cotas de gálibo para vía estrecha [mm].

### 5.8- Entre-ejes de vía.

Una cota importante que cabe destacar fuera del apartado de gálibo es la distancia mínima que hay que respetar si deseamos construir varias vías contiguas. Esta cota se llama distancia entre-ejes de vía y en el presente proyecto será representada por la letra "A". La norma NEM 112 determina esta medida teniendo en cuenta la longitud o escala de los vehículos puestos en circulación y si se trata de un tramo de vía recta o en curva.

En tramos de vía recta los entre-ejes no deben ser menores a los valores de la siguiente tabla (tabla 5), donde encontramos los valores en milímetros.

Escala	Z	N	TT	H0	S	0	I	II
<b>En plena vía</b>	19	25	34	46	63	89	125	178
<b>En estaciones</b>	21	28	38	52	71	103	141	200

**Tabla 5. Distancia entre-ejes de vía en tramos recto [mm].**

En tramos de vía en curva el entre-ejes se ve afectado por un aumento dependiendo del radio de la curva, la escala del coche y el grupo al que pertenezca. Dicho grupo, lo encontramos en la tabla 2. “Longitud de caja a escala según grupo” descrita en el apartado anterior referente al gálibo. La cota indicada para el “grupo a” debe ser el mínimo absoluto, incluso si no hay circulación de vehículos de bogies. Cabe destacar que el entre-ejes debe cumplirse desde el inicio de la curva sin excepción alguna. En la siguiente tabla (tabla 6) encontramos en milímetros los valores de la distancia entre-ejes para un tramo en curva.

Escala	Z			N			TT			H0			S			0			I			II		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Radio de la curva	Grupo de coche																							
175	21	23	25	31																				
200	20	22	24	30	33																			
225	19	21	23	29	32	35																		
250	19	20	22	28	31	33	40																	
275	19	20	21	27	30	32	39	44																
300	19	19	21	27	29	31	38	42	46															
325	19	19	20	26	28	30	37	41	45	57														
350	19	19	20	26	28	29	36	40	43	55	62													
400	19	19	19	25	27	28	35	38	41	53	59	64												
450	19	19	19	25	26	27	34	37	40	51	57	61	76											
500	19	19	19	25	25	26	34	36	38	50	55	59	74	83										
550	19	19	19	25	25	26	34	35	37	49	53	57	72	80	88									
600	19	19	19	25	25	26	34	34	36	48	52	55	70	78	84	116								
700	19	19	19	25	25	25	34	34	35	46	50	52	67	74	80	110	125							
800	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	48	50	65	71	76	106	119	130						
900	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	47	48	64	68	73	103	114	123	154					
1000	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	47	63	66	70	100	110	118	149	166				
1200	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	64	67	96	104	111	142	155	169			
1400	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	64	93	99	105	136	147	159	208		
1600	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	91	96	101	132	141	151	201	225	
1800	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	89	93	98	129	137	145	196	216	234
2000	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	89	91	95	126	133	140	190	208	224
2500	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	89	89	90	125	126	132	181	195	207
3000	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	89	89	89	125	125	126	178	185	195
3500	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	89	89	89	125	125	125	178	178	187
4000	19	19	19	25	25	25	34	34	34	46	46	46	63	63	63	89	89	89	125	125	125	178	178	181

**Tabla 6. Distancia entre-ejes de vía en tramo curva [mm].**

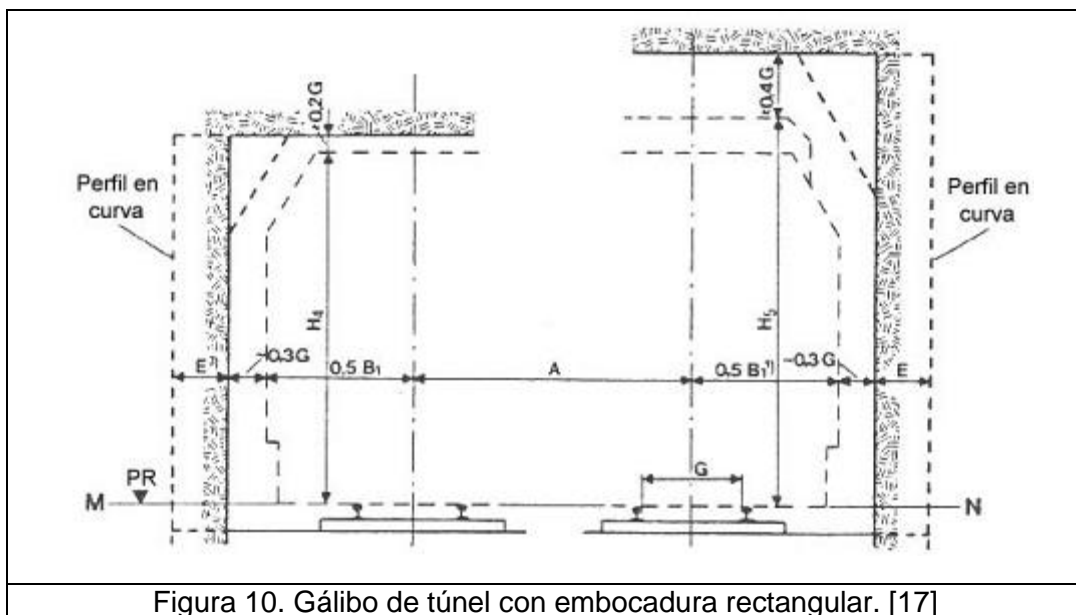
### 5.9- Entrada a túneles.

Con el fin de evitar embocaduras de túneles desproporcionadas, la norma NEM 105 recomienda establecer la entrada de túneles en tramos rectos de vía o en su defecto en curvas con poca ampliación del gálibo de libre paso. Según dicha norma deberemos tener en cuenta los siguientes aspectos:

- 1- El modo de funcionamiento de la maqueta, es decir, si consta de catenaria o no.
- 2- El radio de curvatura del tramo de vía.
- 3- La longitud de los vehículos que circularan por el tramo de vía.
- 4- Si existe o no entre-vía en el tramo que corresponde al túnel.
- 5- La posición de las vías peraltadas en curva.

A la hora de construir un túnel se puede optar por cualquiera de las siguientes opciones, túneles rectangulares o túneles abovedados. A continuación se describen ambas opciones.

- a) *Túneles rectangulares:* la apertura de este tipo de túneles tiene en cuenta los espacios entre paredes laterales y el gálibo de libre paso, cubriendo de este modo las necesidades de instalaciones en el interior y de seguridad. En la siguiente figura (figura 10) se puede observar las acotaciones para un túnel rectangular con catenaria (a la derecha) y sin catenaria (a la izquierda).



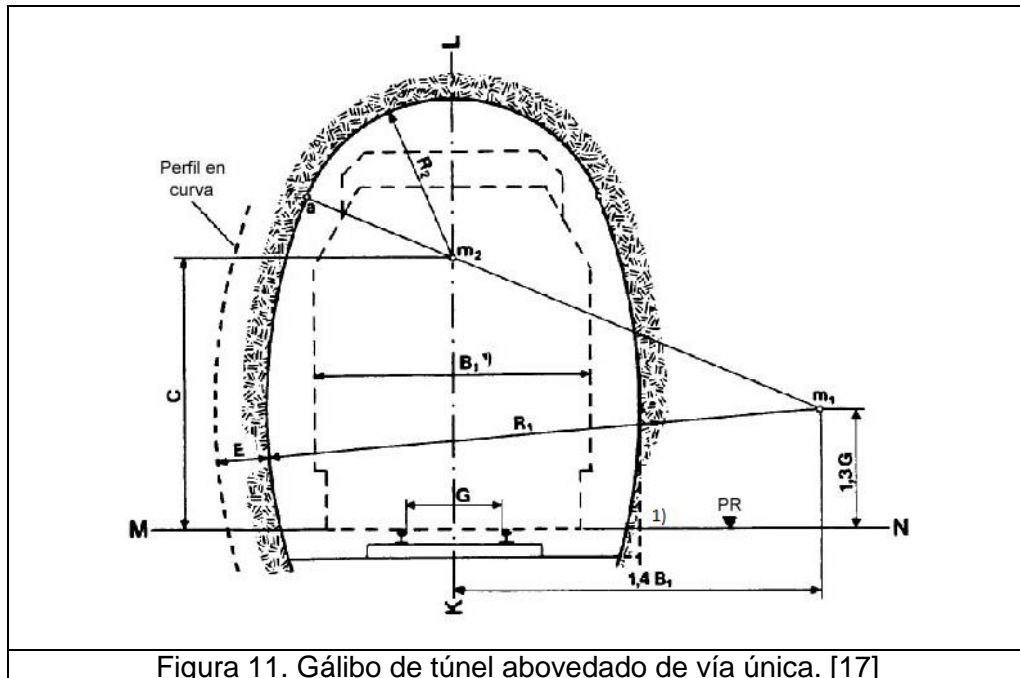
Los valores de las cotas " $B_1$ ", " $H_4$ ", " $H_5$ " y el sobre-ancho " $E$ " están detallados en el apartado "5.7- Gálibo." La cota " $A$ " es la distancia entre-ejes de vía descrita en el apartado "5.8- Entre-ejes de vía".

A la hora de la construcción se tendrá en cuenta que la altura de la embocadura es la suma de sus componentes acotados verticalmente en la figura, distinguiendo entre circulación con catenaria o sin catenaria, mientras que la anchura consta de la cota " $B_1$ ", teniendo en cuenta la entre-vía (cota " $A$ ") si fuera necesario, más la

ampliación lateral "0,3·G". Se sumará el sobre-ancho "E" en el caso de que se tratara de un tramo de vía en curva.

- b) *Túneles abovedados*: se trata de túneles que presentan techo en bóveda. Los espacios libres de seguridad y para las instalaciones está proporcionados por el arco que forma la bóveda. La pared puede estar formada en las partes bajas por jambas verticales. Se distingue entre dos tipos, los que contemplan una vía única y los de doble vía. Se describirán ambos tipos así como su construcción geométrica.

- 1- Túnel abovedado de vía única: la siguiente figura (figura 11) representa las cotas que hay que tener en cuenta a la hora de construir este tipo de túnel. La cota "B<sub>1</sub>" corresponde al gálibo de libre circulación y "E" es el sobredimensionado pertinente en un tramo de vía en curva. Cabe recordar que "G" es la cota del ancho de vía.



La construcción geométrica consta de los siguientes pasos:

**Paso1-** Se traza el eje vertical pasando por el centro del ancho de vía (KL) y el horizontal (MN) coincidente con el plano de rodadura (PR).

**Paso2-** Se halla el punto "m<sub>1</sub>" que se encuentra a una altura de "1,3·G" y a una distancia horizontal desde del centro de "1,4·B<sub>1</sub>".

**Paso3-** Se pone el punto "m<sub>2</sub>" tal que, el valor de la cota "C" será según la siguiente tabla (tabla 7).

	Con catenaria.	Sin catenaria.
Tramo en recta.	$C = 2,8 \cdot G$	$C = 2,2 \cdot G$
Tamo en curva.	$C = 2,3 \cdot G$	$C = 2,2 \cdot G$

**Tabla 7. Valor de la cota C para túnel abovedado de vía única [mm].**

Paso4- Se unen los puntos “m<sub>1</sub>” y “m<sub>2</sub>” prolongando la recta más allá de “m<sub>2</sub>”.

Paso5- Se construye una de las paredes como se describe a continuación. Con centro en “m<sub>1</sub>” se traza el arco de radio “R<sub>1</sub> = 2·B<sub>1</sub>” hasta que corta a la recta prolongada de “m<sub>1</sub>” con “m<sub>2</sub>”, esto dará el punto “a” de la figura. Se tendrá en cuenta que a “R<sub>1</sub>” habría que sumarle el sobre-ancho “E” en caso de que se tratara de un tramo de vía curvo. El siguiente ejemplo explica con más detalle este último paso.

*Ejemplo1:* para una escala H0 se tiene un radio de curva de 700 [mm] la cota de gálibo B<sub>1</sub> = 48 [mm] y el sobre-ancho E = 7 [mm]. Por lo tanto la cota del radio R<sub>1</sub> es:

$$R_1 = 2 \cdot B_1 + E = 96 + 7 = 103 \text{ [mm].}$$

Paso6- Para trazar la otra pared se procede por simetría repitiendo los pasos anteriores.

Paso7- Se finaliza la construcción geométrica trazando el arco de centro en “m<sub>2</sub>” y que pasa por el punto “a”, con lo que conseguimos la bóveda.

- 2- Túnel abovedado de doble vía: la siguiente figura (figura 12) muestra las cotas del gálibo para la construcción de un túnel de embocadura abovedada que contiene doble vía. Al igual que en el túnel abovedado de vía única, “B<sub>1</sub>” corresponde a la cota de gálibo de libre circulación descrito anteriormente, la cota “E” es el sobre-dimensionado aplicable en tramos de vía curvos y la cota “A” es la distancia de entre-ejes también descrita en apartados anteriores. Y por último la cota “G” corresponde al ancho de vía.

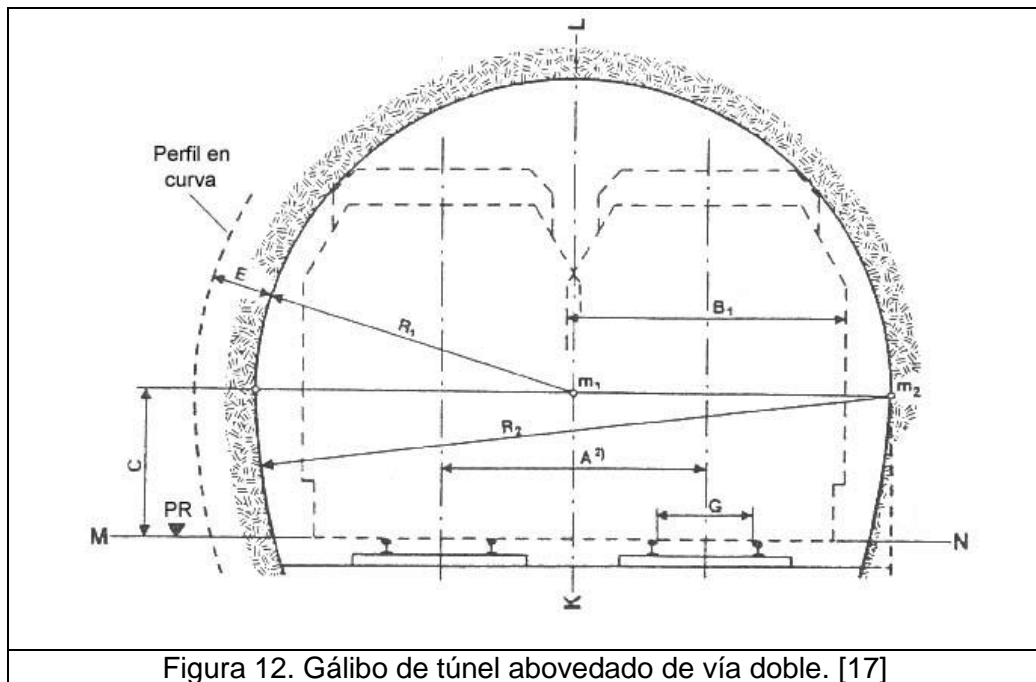


Figura 12. Gálibo de túnel abovedado de vía doble. [17]

La construcción geométrica consta de los siguientes pasos:

**Paso1-** Se traza el eje vertical (KL) que pasa por el centro de la embocadura y el eje horizontal (MN) coincidente con el plano de rodadura (PR).

**Paso2-** Para trazar los ejes verticales que pasan por el centro de cada vía, previamente se debe calcular la distancia entre-ejes “A” descrita en el apartado anterior (5.8-Entre-ejes de vía).

**Paso3-** Se halla el punto “m<sub>1</sub>” sobre el eje principal teniendo en cuenta la cota “C” que se calcula según la siguiente tabla (tabla 8):

	Con catenaria.	Sin Catenaria.
Tramo en recta.	$C = 1,8 \cdot G$	$C = 1,5 \cdot G$
Tramos en curva.	$C = 1,7 \cdot G$	$C = 1,7 \cdot G$

**Tabla 8. Valor de la cota C para túnel abovedado de doble vía.**

**Paso4-** Se traza una horizontal al plano de rodadura (PR) que pase por el punto “m<sub>1</sub>”.

**Paso5-** Con centro en “m<sub>1</sub>” y radio “ $R_1 = 0,5 \cdot A + 0,6 \cdot B_1$ ” se traza el arco que describe la pared por encima del nivel de “m<sub>1</sub>”. Se recuerda que en tramos en curva hay que añadir el sobre-ancho “E” a la cota de “R<sub>1</sub>”. Con la ayuda del siguiente ejemplo se tratará de explicar este último paso.



Ejemplo2: para una escala H0 se tiene un radio de curva de 700 [mm] con una distancia entre-ejes  $A = 52$  [mm]. La cota  $B_1$  del gálibo de libre circulación es de 48 [mm] y el sobre-ancho  $E$  correspondiente de 7 [mm]. Por lo tanto la cota del radio  $R_1$  es:

$$R_1 = 0,5 \cdot A + 0,6 \cdot B_1 + E = 26 + 29 + 7 = 62 \text{ [mm].}$$

Paso6- El punto “ $m_2$ ” se encuentra donde cortan el arco de centro “ $m_1$ ” y radio “ $R_1$ ” con la horizontal al planto de rodadura que pasa por “ $m_1$ ”.

Paso7- Con centro en “ $m_2$ ” y radio “ $R_2 = 2 \cdot R_1$ ” se traza el arco que corresponde a la pared por debajo del nivel de “ $m_1$ ”.

Paso8- La otra pared se construye mediante simetría repitiendo los pasos anteriores, con lo que se consigue la construcción total de la embocadura para un túnel abovedado de doble vía.

#### 5.10- Construcción de la curva.

La construcción de una curva conlleva el estudio de dos aspectos importantes. El primero el radio mínimo de curvatura y el segundo la transición entre un tramo de vía recto y uno curvo. Ambos aspectos se describen a continuación.

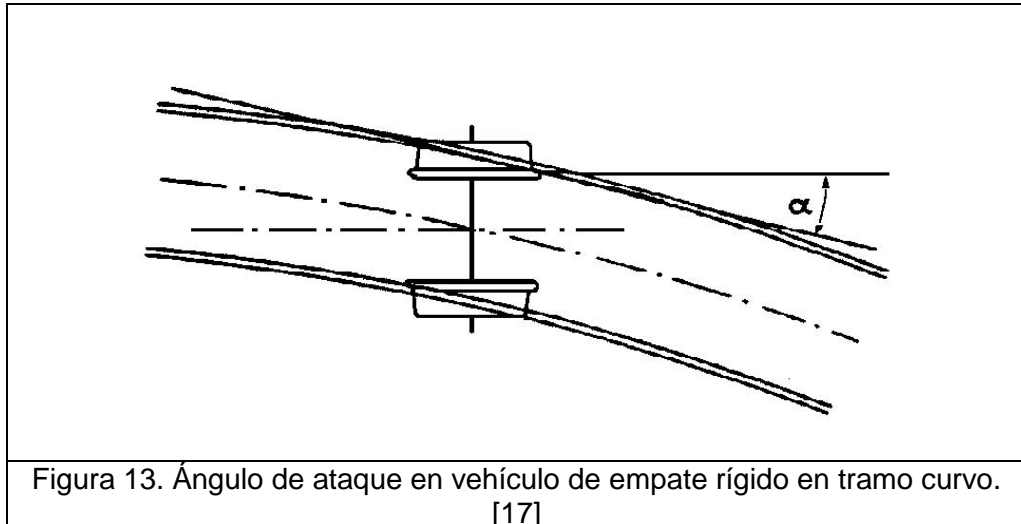
- a) Radio mínimo de curvatura: Uno de los aspectos que se debe tratar a la hora de construir una curva es el radio de la misma. Se concretarán los valores mínimos del radio de la curva atendiendo a los esfuerzos mecánicos a los que está sometido el vehículo durante la circulación en curva, es decir la NEM sólo toma en cuenta las condiciones mecánicas de la inscripción de la curva. Efectos como la velocidad que en el estudio de prototipos a escala sería importante, no toman un valor significativo en el modelismo. No obstante, la NEM 111 tiene como propósito imponer un límite en la sobre-reducción de los radios de curvatura teniendo en cuenta los esfuerzos mecánicos y cubriendo las necesidades de realismo. La siguiente tabla (tabla 9) recoge los radios de curvatura mínimos teniendo en cuenta el grupo del vehículo en vía normal y en vía estrecha. Los radios resultantes vendrán expresados en milímetros. Cabe recordar que “ $G$ ” es la cota del ancho de vía en milímetros.

	Vía normal y grupo de vehículo.			Vía estrecha
	A	B	C	
<b>Radio mínimo practicable.</b>	22·G	25·G	30·G	15·G
<b>Radio mínimo recomendado para vía secundaria de estación.</b>	25·G	30·G	35·G	20·G
<b>Vía de línea secundaria.</b>	30·G	35·G	40·G	25·G
<b>Vía de línea principal</b>	35·G	40·G	45·G	30·G

**Tabla 9. Radio mínimo de curvatura.**

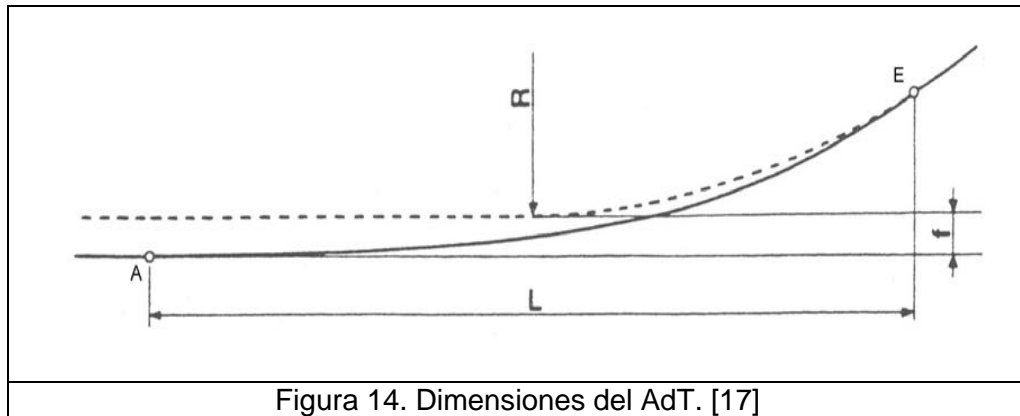
Existe una interdependencia entre el vehículo y el radio de la curva. Se distinguen dos tipos de vehículos:

- 1- Vehículos con empate rígido: Se trata de vehículos en los que los ejes extremos no son orientables, el ángulo de ataque " $\alpha$ " del raíl no debe exceder los  $12^\circ$ . No obstante la tabla anterior (tabla 9) proporciona la seguridad aceptable para reducir los rozamientos e incrementar la seguridad en el descarrilamiento.



- 2- Vehículos con bogies: en este tipo de vehículos la norma limita la obtención del radio mínimo de curvatura a la interpretación de la tabla anterior (tabla 9).
- b) Curvas de transición: Una vez deducido el radio mínimo que podemos practicar, se deberá tratar el paso de transición de un tramo de vía recto a uno curvo o de un tramo de vía curvo a otro tramo con diferente radio de curvatura. Esta transición apacigua la sacudida lateral que sufre el vehículo producida por el cambio repentino de orientación. De esta forma se asegura la circulación del vehículo sin sufrir descarrilamientos. Otro aspecto que evita dicha transición es el distanciamiento transversal entre extremidades enganchadas de dos vehículos contiguos. El tramo de transición citado se conoce como curva de transición o arco de transición (a partir de ahora citado como AdT). El AdT entre un tramo de vía recto y otro curvo es un arco de curva progresiva. En el inicio de la alineación, el radio comienza con un valor infinito, lo que correspondería a una recta, y disminuye de forma continua hasta que alcanza el valor del radio del tramo curvo. Los AdT se utilizan en vía principal y en vías directas de estaciones, sobre todo donde el radio del tramo de vía curvo sea de radio pequeño. Para tramos de vía curvos de radios grandes, del orden de " $60 \cdot G$ " siendo " $G$ " el ancho de vía, no son necesarios practicar un AdT. A continuación se describirán las dimensiones de un AdT y la forma de construcción.

- 1- Dimensiones: la longitud “L” y la desviación de la alineación o reducción del radio de la curva “f” son las dos dimensiones que describen el AdT. Puede observarse en la siguiente figura (figura 14) el croquis de las dimensiones, donde “R” es el radio del tramo de vía curvo, “A” el inicio del AdT y “E” el final del AdT.



Las dimensiones “L” y “f” dependen del radio del tramo curvo de la vía y pueden calcularse mediante dos métodos.

Método 1- Utilizando las dimensiones recomendadas según el ancho de vía. La siguiente tabla (tabla 10) relaciona los diferentes anchos de vía con la dimensión “f”, todas las cotas expresadas en milímetros.

Ancho de vía.	6,5	9	12	16,5	22,5	32	45
Dimensión “f”.	3	4	6	9	13	18	25

**Tabla 10. Relación entre ancho de vía y dimensión de “f” [mm].**

Una vez calculada la dimensión “f”, la longitud “L” responde a la siguiente ecuación (ecuación 2).

$$L = \sqrt{f \cdot 24 \cdot R}$$

Ecuación 2. Longitud “L” para el AdT.

Con el fin de facilitar los cálculos se proporciona la siguiente tabla (tabla 11) donde se pueden encontrar los valores de “L” de cada ancho de vía enfrentados con los radios más comunes, aunque la interpolación hace posible obtener cualquier dimensión de “L”. Todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

Radio.	Ancho de vía.						
	6,5	9	12	16,5	22,5	32	45
150	100						
175	110	130					
200	120	140					
250	135	155	190				
300	145	170	210				
350	160	185	225	275			
400		195	240	295			
500		220	270	330	395		
600			295	360	430		
700			320	390	465	550	
800				415	500	590	
1000				465	560	655	775
1200					610	720	850
1400					660	780	915
1600						830	980
2000						980	1095

Tabla 11. Valores más significativos de la dimensión "L" [mm].

Método 2- Siguiendo este método, la longitud "L" puede ser elegida arbitrariamente dentro de los siguientes límites:

- "L" debe ser al menos del orden de la mayor longitud de los vehículos en circulación.
- "L" debe ser más pequeño que el radio del tramo de vía curvo "R". Se aconseja que la dimensión "L" sea menor que "0,8·R".

Una vez elegida la longitud "L" la cota "f" varía según la siguiente tabla (tabla 12) en función de la relación "L/R". Todas las cotas de la tabla están en milímetros.

L/R	$L/R < 0,6$	$0,6 < L/R < 0,8$	$L/R > 0,8$
f	$L^2 / (24 \cdot R)$	$L^2 / (23 \cdot R)$	$L^2 / (22 \cdot R)$

Tabla 12. Dimensión de "f" según la relación L/R [mm].

- 2- Construcción del trazado: una vez determinadas las cotas, "L" longitud del AdT y "f" desviación de la alineación o reducción del radio de la curva, se debe elegir, precisamente, si la cota "f" afectará a la desviación de la alineación o a la reducción del radio del tramo de vía curvo. Es decir, o bien que el tramo recto se desplace paralelamente a la dimensión "f", como muestra la figura 15, o bien que el radio del tramo de vía curvo disminuya el valor de la dimensión "f" como muestra la figura 16.

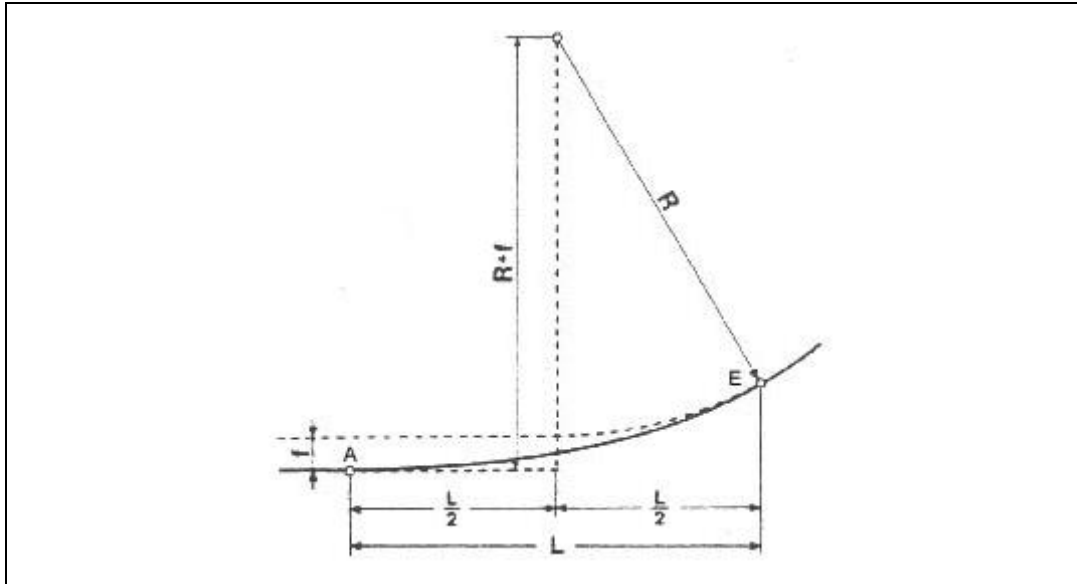


Figura 15. Desviación de la alineación del tramo de vía recto. [17]

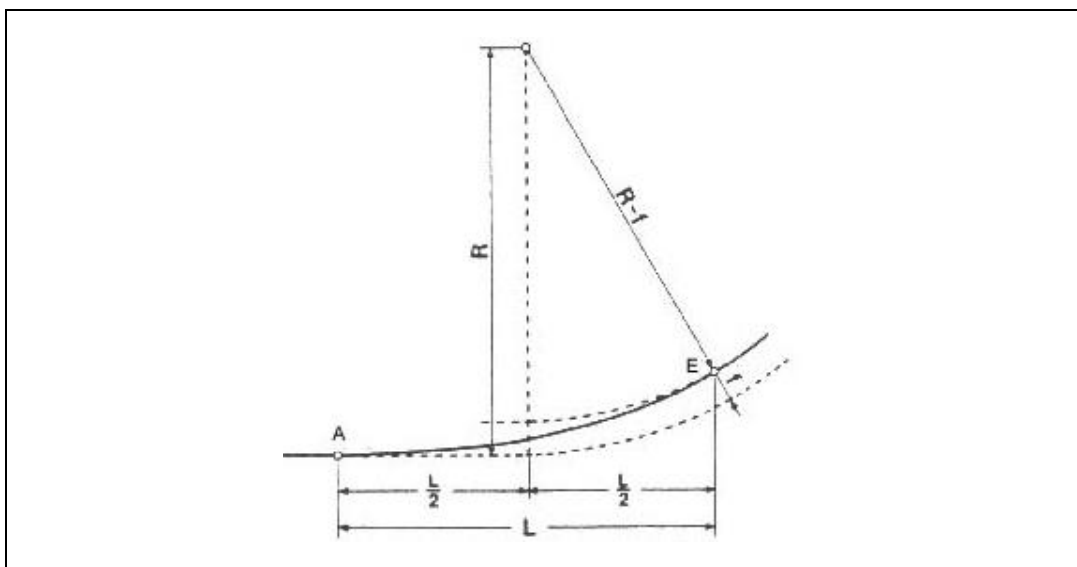


Figura 16. Disminución del radio del tramo de vía curvo. [17]

Las opciones reflejadas en las figuras anteriores (figura 15 y figura 16) son válidas y su elección dependerá de la comodidad a la hora de construir el tramo de vía curvo. En cualquiera de las dos opciones la longitud "L" está dividida en dos mitades equivalentes, de manera que la perpendicular al tramo de vía recto y que pasa por el centro de la circunferencia que traza el tramo de vía curvo divida la

longitud “L” en dos mitades equivalentes. En la opción de desviación de la alineación del tramo de vía recto esta perpendicular es la suma del radio “R” y la desviación “f” como se refleja en la figura 15. En la opción de disminución del radio del tramo de vía curvo la perpendicular será simplemente el radio “R”. Por otro lado, en la figura 15 se observa como “R” es la distancia entre el centro de la curva que traza el tramo de vía curvo y el inicio del tramo de vía curvo. Mientras en la figura 16 esta distancia se ve disminuida por la dimensión “f”.

Para obtener los puntos “E” inicio del tramo de vía curvo y “A” final del tramo de vía recta, basta con trazar una paralela al tramo de vía recto que diste una distancia “ $y_E = 4 \cdot f$ ”, el punto de intersección con la curva es el punto “E”, el punto “A” estará a la distancia “L” de la perpendicular al tramo de vía recto y que pasa por el punto “E”.

Una vez definidos los puntos “A” y “E”, se obtienen los valores intermedios de “ $x_i$ ” e “ $y_i$ ” del AdT tal como reflejan la siguiente tabla (tabla 13) y figura (figura 17). A este tipo de construcción se le llama construcción por puntos.

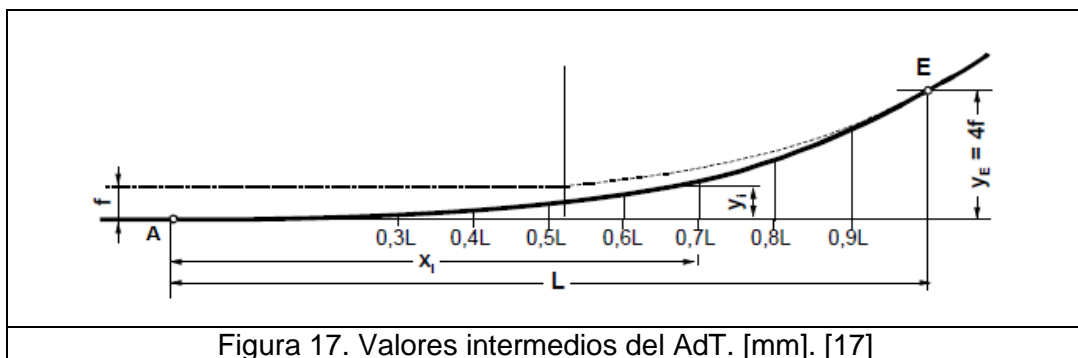


Figura 17. Valores intermedios del AdT. [mm]. [17]

$x_i$	0	0,3·L	0,4·L	0,5·L	0,6·L	0,7·L	0,8·L	0,9·L	1,0·L
$y_i$	0	0,03· $y_E$	0,06· $y_E$	0,125· $y_E$	0,21· $y_E$	0,33· $y_E$	0,49· $y_E$	0,72· $y_E$	1,0· $y_E$

Tabla 13. Puntos intermedios del AdT [mm].

Con el objetivo de aclarar como calcular el tramo de un arco de transición (AdT), a continuación se muestran dos ejemplos. El primero ejemplo sigue el *método 1* descrito anteriormente, donde se utilizan las dimensiones recomendadas para la cota “f”, mientras que en el segundo ejemplo se seguirá el *método 2*, en el que la elección de la longitud “L” se realiza arbitrariamente.

**Ejemplo 1:** Partiendo de un ancho de vía  $G = 16,5$  [mm] se construirá por puntos un AdT. Que una un tramo de vía recto con un tramo de vía curvo de radio  $R = 600$  [mm].

Según la tabla 10 la dimensión  $f$  correspondiente al ancho de vía  $G = 16,5$  [mm] es  $f = 9$  [mm]

La tabla 11 indica un valor de  $L = 360$  [mm] dado que el radio  $R = 600$  [mm].

Se calcula la ordenada de la extremidad  $y_E$  como:

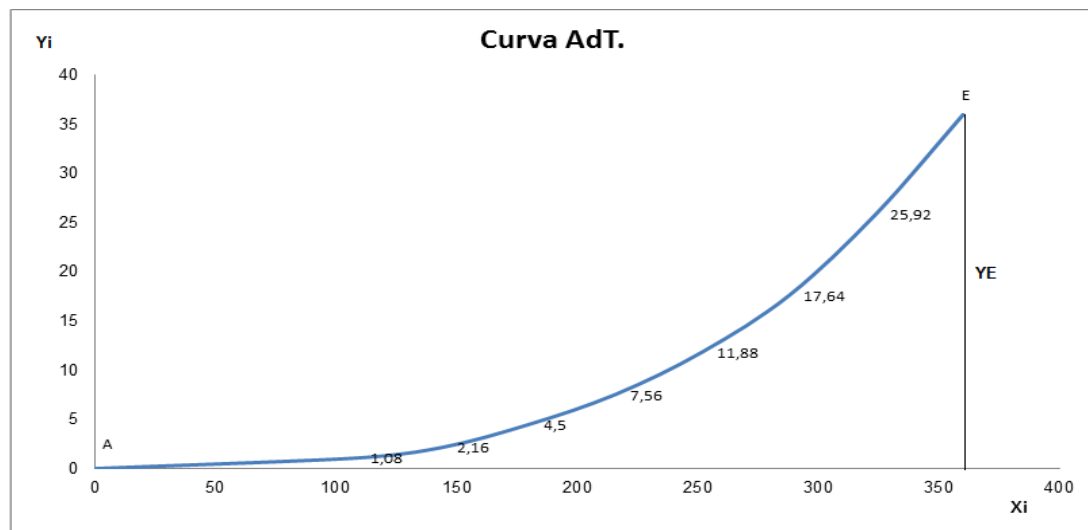
$$y_E = 4 \cdot f$$

$$y_E = 4 \cdot 9 = 36 \text{ [mm].}$$

Una vez calculada la ordenada de la extremidad y la longitud  $L$ , utilizando la tabla 13 se completa el AdT con los valores de los puntos intermedios  $x_i$  e  $y_i$ .

	Valor inicial	1	2	3	4	5	6	7	8
$X_i$	0	108	144	180	216	252	288	324	360
$Y_i$	0	0,108	2,16	4,5	7,56	11,88	17,64	25,92	36

La siguiente gráfica simula como quedaría el AdT de nuestro ejemplo.



El punto A de la gráfica representa el final del tramo de vía recto. A partir del punto E comienza el tramo de vía curvo con radio de 600 [mm].

Ejemplo 2: Con un ancho de vía de  $G = 16,5$  [mm] y con radio  $R = 600$  [mm] correspondiente al tramo de vía curvo se construirá el AdT tomando la longitud "L" aleatoriamente.

La longitud L del AdT elegida será  $L = 420$  [mm] por tanto la relación entre la longitud y el radio es:

$$L/R = \frac{420}{600} = 0,7$$

$$0,7 \in (0,6 - 0,8)$$

Obtenido la relación L/R y su intervalo, el valor de f según la tabla 12 es:

$$f = \frac{L^2}{23 \cdot R} = \frac{420^2}{23 \cdot 600} = 12,78 \approx 13 \text{ [mm]}.$$

Se tomarán redondeo al milímetro con el fin de facilitar la construcción el AdT. Se calcula la ordenada de la extremidad  $y_E$ :

$$y_E = 4 \cdot f$$

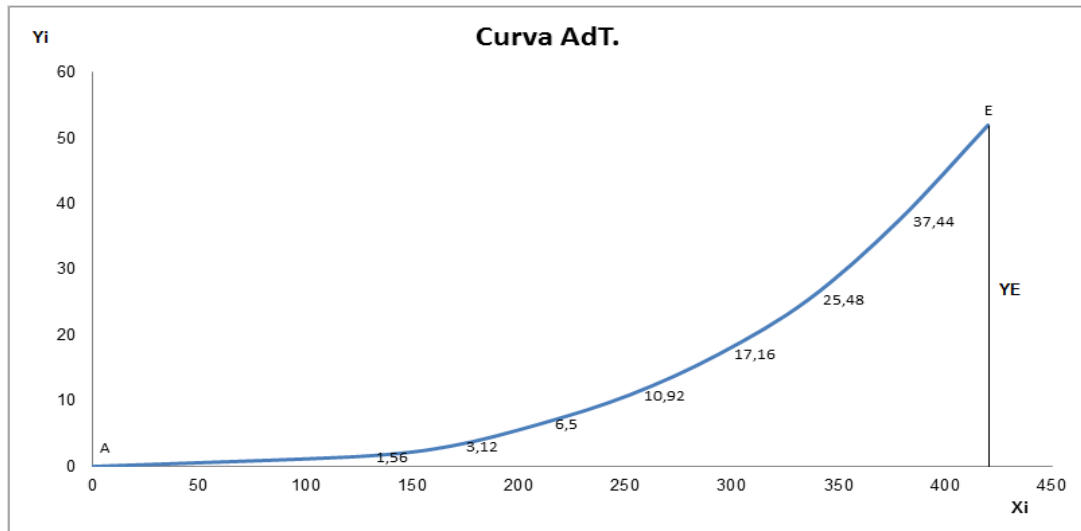
$$y_E = 4 \cdot 13 = 52 \text{ [mm]}.$$

Una vez calculada la ordenada de la extremidad y la longitud L, utilizando la tabla 13 se completa el AdT con los valores de los puntos intermedios  $x_i$  e  $y_i$ .

	Valor inicial	1	2	3	4	5	6	7	8
$X_i$	0	126	168	210	252	294	336	378	420
$Y_i$	0	1,56	3,12	6,5	10,92	17,16	25,48	37,44	52

La siguiente gráfica simula como quedaría el AdT de nuestro ejemplo.





El punto A de la gráfica representa el final del tramo de vía recto. A partir del punto E comienza el tramo de vía curvo con radio de 600 [mm].

El peralte está estrechamente relacionado con la construcción de un tramo vía en curva por ello se atenderá a su explicación en un apartado distinto con el fin de facilitar la comprensión.

#### 5.11- Peralte en curva.

El objetivo que persigue, a groso modo, el peralte en curva en las vías de ferrocarril real es contribuir a la seguridad de los vehículos por el hecho de que la aceleración transversal provocada en el vehículo y en la vía al trazar la curva se encuentra compensada, total o parcialmente, gracias a la sobre-elevación del raíl exterior con relación al raíl interior. La NEM 114 entiende que la práctica del peraltado en la recreación a escala de un tramo de vía real sólo cumple con el objetivo estético y de fidelidad con el modelo real a reproducir. Es decir, el peralte a escala no es necesario para corregir los fenómenos dinámicos que se producen en el trazado de una curva e incluso puede llegar a ser contraproducente al incrementar la basculación hacia el interior de la curva en determinados vehículos. No obstante, la NEM 114 recomienda, en caso de reproducir un peralte, seguir la siguiente tabla (tabla 14) donde encontramos la relación en milímetros de la cota " $d_{max}$ " y el ancho de vía "G". En ningún caso la cota "d" debe ser mayor de " $G/15$ ".

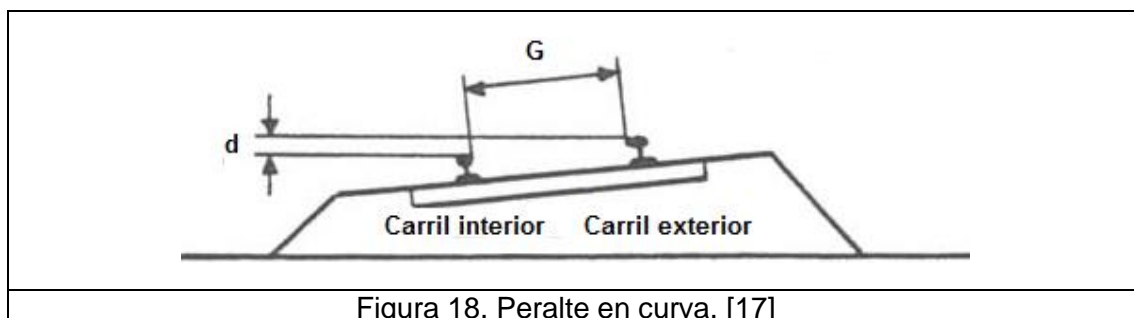


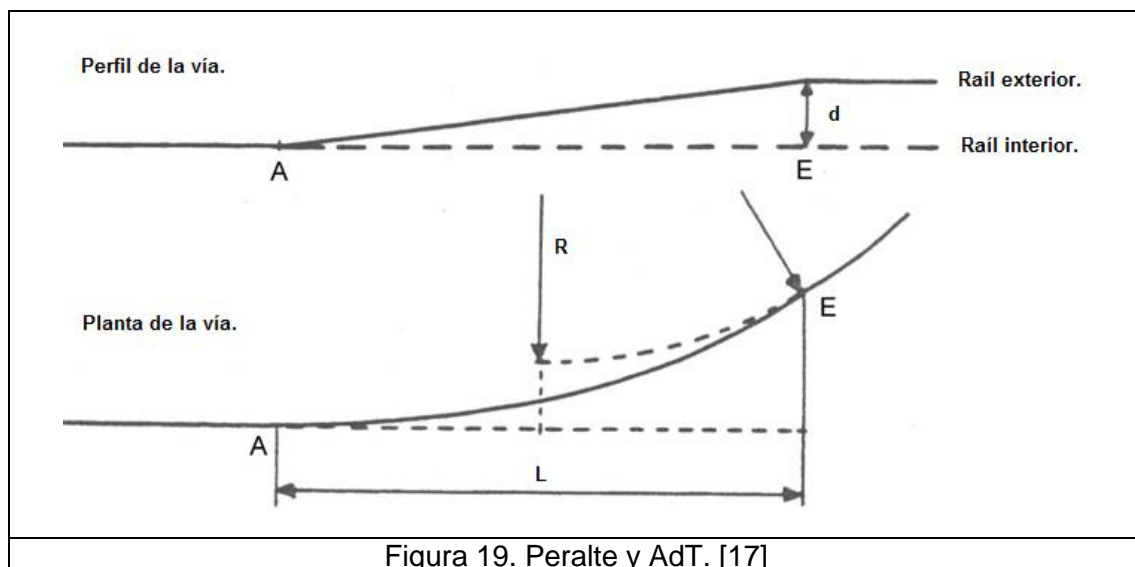
Figura 18. Peralte en curva. [17]

G	6,5	9	12	16,5	22,5	32	45	64
$d_{max}$	0,4	0,6	0,8	1	1,5	3	3	5

**Tabla 14. Peralte máximo [mm].**

Como se observa en la figura anterior (figura 18) en el tramo de vía curvo el carril interior conserva el perfil en toda su longitud, en cambio el raíl exterior se sobre-eleva el valor de la cota "d".

La sobre-elevación se alcanza de forma progresiva en la llamada rampa de peraltado. Esta rampa se practica a lo largo de la longitud "L" del arco de transición descrito en el apartado anterior. En la siguiente figura (figura 19) el punto "A" corresponde al final del tramo de vía recto, el punto "E" indica el inicio de tramo curvo con radio "R" y "L" la longitud del arco de transición donde se practica el peralte con sobre-elevación "d".



#### 5.12- Altura de la línea aérea de alimentación.

Al igual que los ferrocarriles que utilizan la tracción eléctrica necesitan suministro de la corriente por medio de un sistema de captación, las maquetas también necesitan algún sistema de captación de corriente. Dado que el sistema más común en la realidad es mediante una línea aérea, o también llamada catenaria y un pantógrafo, se explicarán la NEM 201 y 202 que proporcionan las normas que debe seguir el modelismo ferroviario en una explotación que utilice este sistema de captación eléctrica.

La NEM 201, de obligado cumplimiento, cumple con el objetivo de acotar el descentramiento vertical y el horizontal de la línea aérea. El descentramiento vertical se produce por razones de perfil, normalmente las catenarias son más altas en las estaciones y más bajas en túneles. La NEM 201 proporciona las cotas máximas de

estas alturas (cotas HF1, HF2 y HF3 de la siguiente figura). Por otro lado, la aplicación del descentramiento horizontal produce un desgaste igualatorio a lo largo del frotador lo que aumenta la vida útil de este, cosa que no sucedería si el hilo conductor de la catenaria incidiera constante sobre un mismo punto de la superficie del frotador. La longitud útil de desgaste del frotador está relacionada con la posición de los postes que soportan la catenaria. Se recomienda utilizar el descentramiento lateral máximo en curvas calculando la distancia entre los postes, " $L_{max}$ ", según la siguiente ecuación (ecuación 3) donde " $R$ " el radio del tramo de vía curvo y " $S$ " el descentramiento lateral máximo.

$$L_{max} = 4 \cdot \sqrt{R \cdot S}$$

Ecuación 3. Distancia entre postes en tramo de vía curvo [mm].

Para una explotación con varias vías, se debe utilizar el radio de curvatura más grande, siempre y cuando el ancho de vía sea normal. Para otros casos se debe tener en cuenta los radios mínimos descritos anteriormente en la norma NEM 111.

En tramo de vía recto la norma aconseja utilizar una disposición de los postes en "zigzag" utilizando sólo 2/3 del descentramiento lateral máximo.

La siguiente figura (figura 20) representa la posición de la catenaria y las cotas del descentramiento vertical y horizontal.

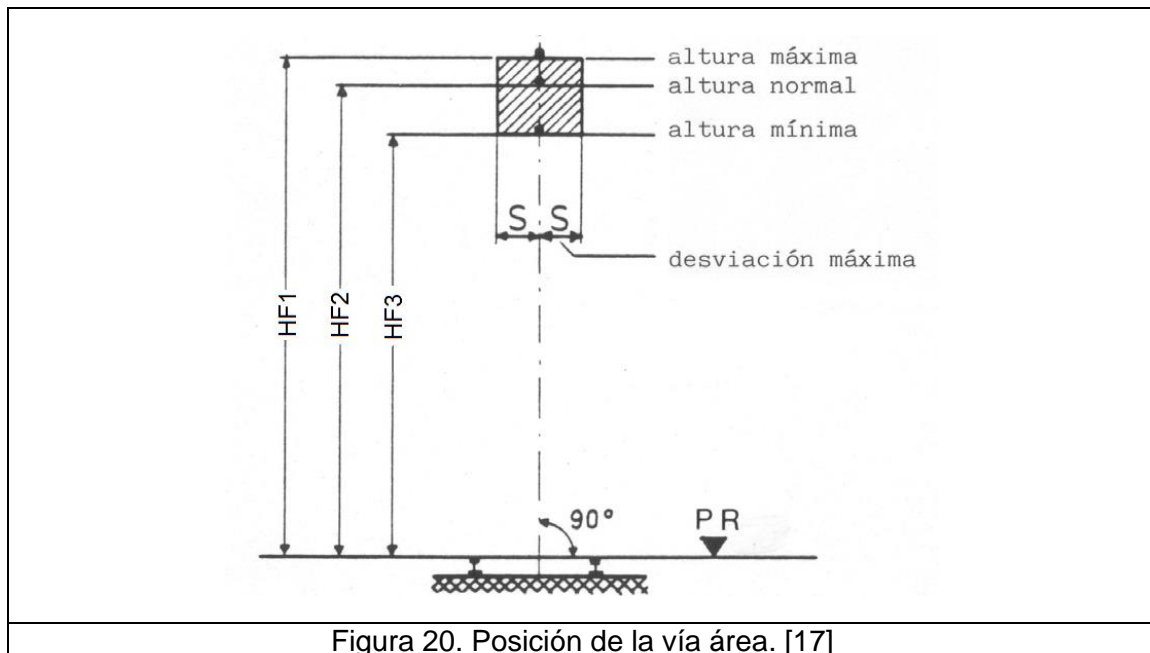


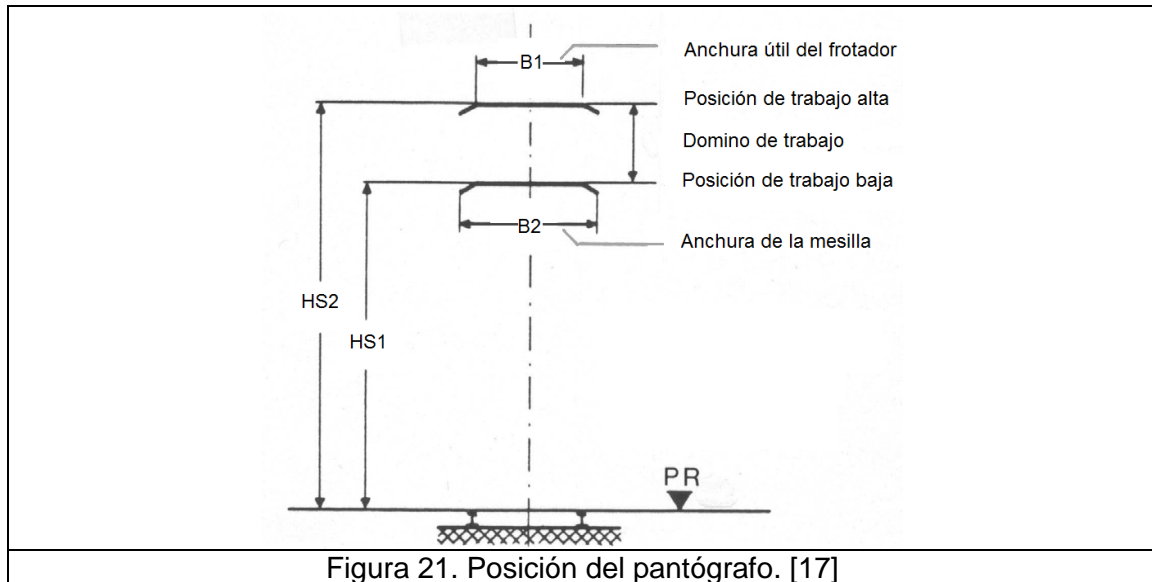
Figura 20. Posición de la vía área. [17]

La anterior figura se completa con los valores de la siguiente tabla (tabla 15) donde todos los valores se encuentran en milímetros. En dicha tabla hay que distinguir entre los dos sistemas de pantógrafo que existen en la realidad, el sistema ancho donde el descentramiento lateral real está entre 300 y 400 milímetros y se utiliza un pantógrafo ancho y el sistema estrecho con descentramiento lateral comprendido entre los 200 y 300 milímetros y se utiliza un pantógrafo estrecho. Dado que podemos realizar la explotación por catenaria tanto en vía normal o vía estrecha, las alturas tendrán dos valores, los correspondientes a “ $V_N$ ” serán para vía normal y los correspondientes a “ $V_E$ ” serán para vía estrecha (m,e,i).

Escala	S ancho	S estrecho	HF1		HF2		HF3	
			$V_N$	$V_E$	$V_N$	$V_E$	$V_N$	$V_E$
<b>Z</b>	2	1	25	23	28	26	30	28
<b>N</b>	3,5	1,5	34	29	38	35	40	38
<b>TT</b>	4,5	2	44	38	50	47	52	51
<b>H0</b>	6,5	3	60	50	69	65	73	70
<b>S</b>	8,5	4	80	69	93	86	98	93
<b>O</b>	11	6	110	98	130	124	139	133
<b>I</b>	17	8	150	134	180	172	194	181
<b>II</b>	27	11	213	190	260	245	176	260

**Tabla 15. Valores de las cotas de la vía aérea [mm].**

Los pantógrafos necesarios en la explotación por catenaria deben cumplir las cotas de gálibo descritas en la NEM 202, de obligado cumplimiento. Esta norma determina las anchuras máximas del frotador y el rango de alturas que puede alcanzar el pantógrafo para respetar las cotas de gálibo descritas en la NEM 201. Como ya se dijo, la NEM 201 está estrechamente relacionada con la NEM 202. Al igual que en la NEM 201, se distinguen dos tipos de cotas dependiendo si queremos reproducir a escala un pantógrafo ancho (de 300 [mm] a 400 [mm]) o un pantógrafo estrecho (entre 200 [mm] y 300 [mm]). En la siguiente figura, (figura 21) se pueden observar los intervalos de trabajo (HS1 y HS2) del pantógrafo así como la anchura útil del frotador “B1”. Se deberá tener en cuenta que aunque se quiera reproducir la realidad con exactitud, aplicando un redondeo exacto entre frotador y cuerno o tomando la inclinación real del cuerno, en ningún caso deberá sobrepasarse la cota “B2” de la figura. Así como la posición de reposo del pantógrafo, es decir estando el pantógrafo bajado, no puede sobrepasar la cota “H<sub>4</sub>” de la tabla 1.



La siguiente tabla, (tabla 16) muestra los valores, en milímetros, de las cotas reflejadas en la anterior figura según la escala en la que se esté trabajando, el tipo de vía (vía estrecha o vía normal) y el tipo de frotador que se quiere reproducir a escala (ancho o estrecho).

Escala	B1 ancha	B2 ancha	B1 estrecha	B2 estrecha	HS1		HS2	
					V <sub>N</sub>	V <sub>E</sub>	V <sub>N</sub>	V <sub>E</sub>
<b>Z</b>	7,5	8	3,5	4	25	33	31	29
<b>N</b>	10	11	5	6	34	29	41	39
<b>TT</b>	13,5	15	7,5	9	44	38	54	53
<b>H0</b>	18	20	10	12	60	50	75	72
<b>S</b>	25	27	14	16	80	69	101	96
<b>O</b>	34	36	22	24	110	98	142	136
<b>I</b>	48	50	30	32	150	134	198	185
<b>II</b>	69	71	43	45	213	190	282	266

**Tabla 16. Valores de las cotas del pantógrafo [mm].**

5.13- Gálibo de material móvil.

Una vez que se ha definido el gálibo de la red ferroviaria, cualquier vehículo que quede dentro del gálibo de la red podrá circular sin ningún problema por toda la red. No obstante, los vehículos y cualquier material móvil también tienen su gálibo, reflejado en la NEM 301. Esta norma, de obligado cumplimiento, satisface la necesidad de reproducir a escala vehículos reales, de tal modo que deben cumplir con las cotas reflejadas en la siguiente figura (figura 22). Todas las partes del vehículo, incluidos los pantógrafos en posición de reposo, deben albergarse dentro de este gálibo.

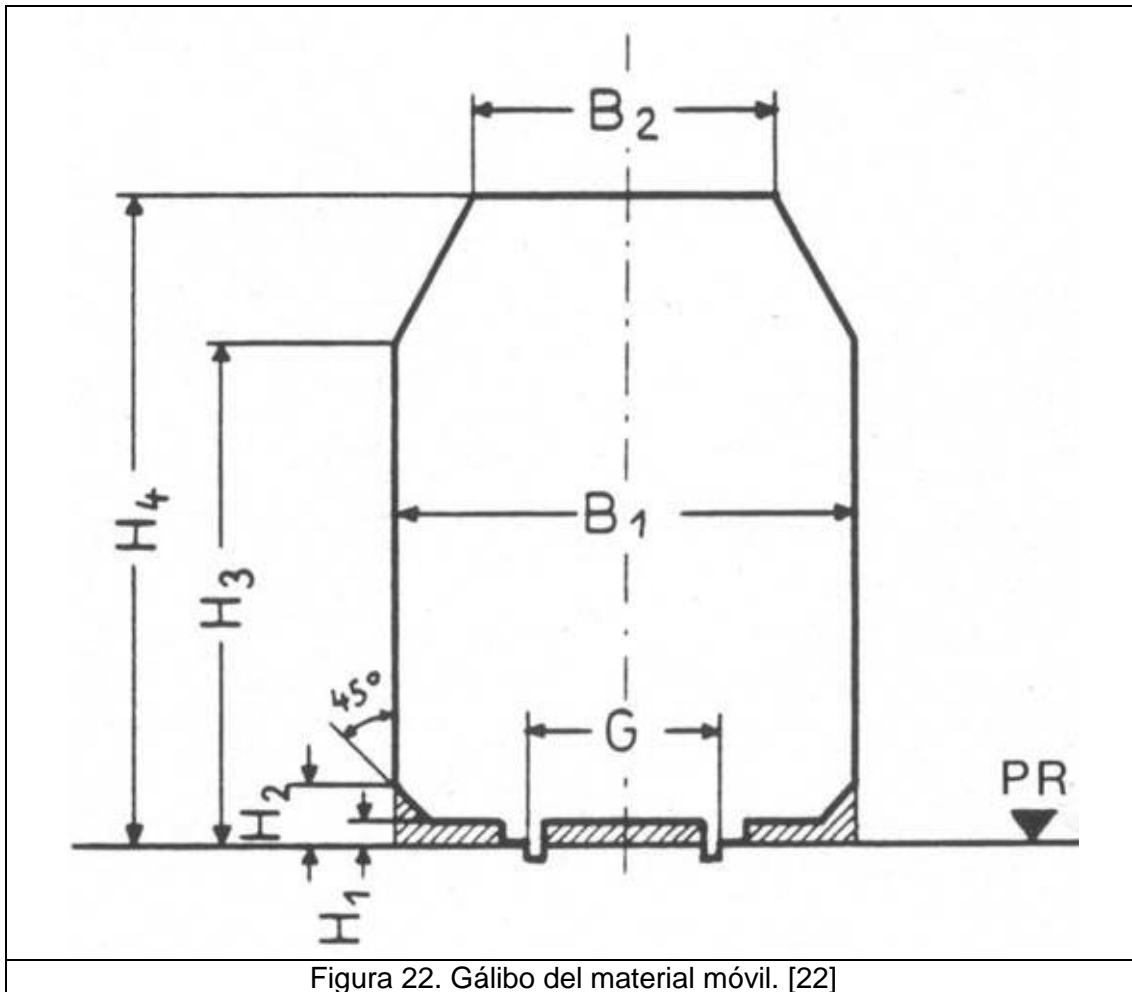


Figura 22. Gálibo del material móvil. [22]

La siguiente tabla (tabla 17) muestra los valores de las cotas en milímetros dependiendo de la escala.

Escala	G	B1	B2	H1	H2	H3	H4
Z	6,5	17	11	1	2	17	23
N	9	23	14	1	3	24	32
TT	12	30	18	1,5	4	32	42
H0	16,5	40	26	2	5	44	57
S	22,5	54	35	3	7	59	75
0	32	78	48	4	10	83	106
I	45	110	68	5	13	115	146
II	64	148	94	6	20	163	207

**Tabla 17. Valores de cota para el gálibo de material móvil [mm].**

Al comparar el gálibo del material móvil y el gálibo de libre circulación en vía recta, obtenemos el margen que debe existir entre ambos para lograr una circulación sin colisiones entre material rodante y elementos de la vía.

5.14- Masa de los vehículos a escala.

La norma 302 de la normativa NEM, define las directrices de la masa del vehículo para evitar el vuelco en los tramos de vía curvos. La normativa NEM recomienda un peso mínimo del vehículo en función de la distancia entre los topes del vehículo. No obstante, factores como el centro de gravedad del vehículo no son tomados en cuenta por la normativa NEM. La siguiente tabla (tabla 18) detalla la masa mínima por milímetro de longitud entre los topes del vehículo.

Escala	Z	N	TT	H0	S	0	I	II
<b>Masa [g/mm]</b>	0,12	0,17	0,25	0,40	0,60	1,00	2,00	4,00
<b>Tabla 18. Masa mínima del vehículo a escala.</b>								

La masa del vehículo no puede aumentarse más del 30% de los valores que refleja la tabla anterior. Si no se alcanzara la masa mínima del vehículo, se podrá obtener con la ayuda de lastres o placas de metal. Dado que la normativa NEM no estudia el peralte mas que como un elemento que reproduce la realidad, en las curvas con peralte se deberán tener en cuenta el peligro de vuelco del vehículo.

## **Capítulo VI: Análisis del Gálibo Ferroviario.**

- **Introducción.**
- **Definiciones y conceptos para la obtención del gálibo.**
- **Descripción de los distintos gálibos.**
- **Medida del gálibo.**
- **Conclusiones del gálibo.**



## **Capítulo VI: Análisis del Gálibo Ferroviario.**

### 6.1- Introducción.

La *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC) define el gálibo como la unión de dos elementos fundamentales, un contorno de referencia y la normativa asociada a ese contorno de referencia. La normativa no es más que un conjunto de fórmulas y de condiciones que han de ser aplicadas a partir de un contorno de referencia determinado.

Tanto el Departamento de Material como el Departamento de Obras e Instalaciones de la red ferroviaria deben conocer y respetar cada uno de los diferentes contornos de referencia que existen, es decir cada gálibo. Mientras que el Departamento de Material se preocupa por el gálibo máximo de construcción, el Departamento de Obras se centra en el gálibo límite de obstáculos, de tal manera que ambos deben coexistir dentro de la misma red ferroviaria.

A lo largo de la vía se reproduce una sección transversal y perpendicular a esta de dimensiones específicas que se denomina gálibo de obras. En otras palabras, se trata de un túnel imaginario que recorre toda la vía con el objetivo de limitar el espacio para que ningún elemento de la vía (catenaria, señales verticales, puentes, etc.) pueda invadir el espacio reservado para los vehículos que circulen por la vía y viceversa, ningún vehículo traspasará dicho límite para el buen funcionamiento de la línea ferroviaria.

Cualquier vehículo que quede dentro del gálibo mínimo de una red ferroviaria, podrá circular por dicha red sin ningún problema. El gálibo mínimo de una red se obtiene con el estudio de todos los tramos de dicha red y proyectando la envolvente del contorno mínimo resultante. A la hora de comprobar si un vehículo es apto para circular por una red, primero se considerarán las dimensiones de dicho vehículo o también llamado gálibo estático. Después, al aplicar las condiciones de movimiento al vehículo se obtiene el gálibo dinámico y por último, mediante el estudio de la normativa vigente, se obtienen las distancias a obstáculos representadas en el gálibo de obras. Si el vehículo queda dentro del gálibo de obras, dicho vehículo podrá circular por la red ferroviaria siempre y cuando se respeten las condiciones de cálculo aplicadas en la obtención de los distintos gálibos. En el caso de que un vehículo quede fuera del gálibo en algún tramo de vía, habría que estudiar en qué condiciones particulares de velocidad podría circular en dicho tramo de vía.

Ya se ha hablado de algunos de los gálibos que posteriormente se desarrollaran ampliamente. No obstante, cabe citar el resto de gálibos y su competencia.

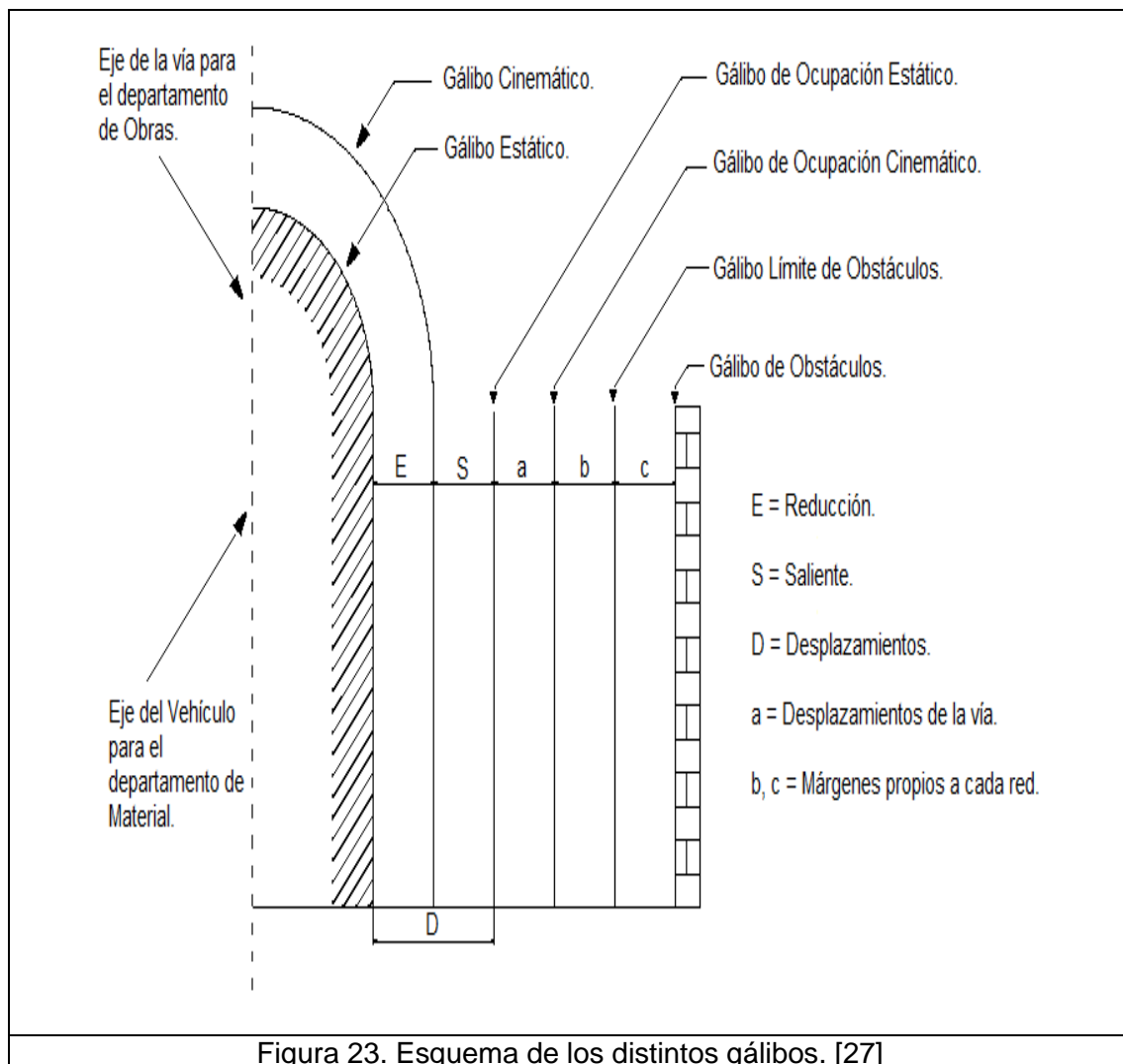
Los gálibos que recaen en la responsabilidad del Departamento de Material son:

- 1- Gálibo de construcción de material o gálibo estático.
- 2- Gálibo cinemático.
- 3- Gálibo de ocupación estático o posición límite del material considerando las fórmulas de reducción del Departamento de Material.

Los gálibos de los que es responsable el Departamento de Obras e Instalaciones son:

- 1- Gálibo de ocupación cinemática de material.
- 2- Gálibo límite de obstáculos.
- 3- Gálibo de implantación de obstáculos o gálibo de obstáculos.

En la siguiente figura (figura 23) se pueden observar dichos gálibos.



## 6.2- Definiciones y conceptos para la obtención del gálibo.

Con el objetivo de comprender los siguientes apartados es necesario definir una serie de conceptos relacionados con el gálibo ferroviario.

### 6.2.1- Coordenadas normales.

El eje de coordenadas normales coincide con el eje del vehículo con el objetivo de poder comparar los gálibos límite máximo de los obstáculos y los gálibos de construcción del vehículo, ambos dos se calculan a partir del contorno de referencia del gálibo cinemático ya que es común tanto para vía como para el vehículo.

El eje de coordenadas normales es un par de ejes ortogonales definidos dentro de un plano normal al eje longitudinal de los carriles en posición nominal. El eje horizontal coincide con el plano de rodadura y es la intersección del plano normal citado anteriormente. El eje vertical es perpendicular a esta intersección y equidistante a los dos carriles de la vía. En la siguiente figura (figura 24) se representa el eje de coordenadas normales.

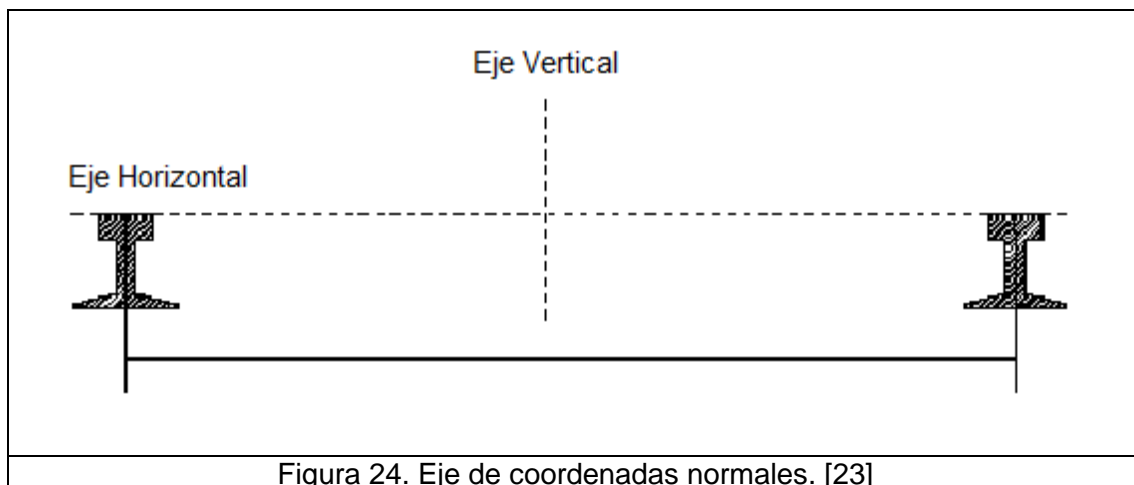


Figura 24. Eje de coordenadas normales. [23]

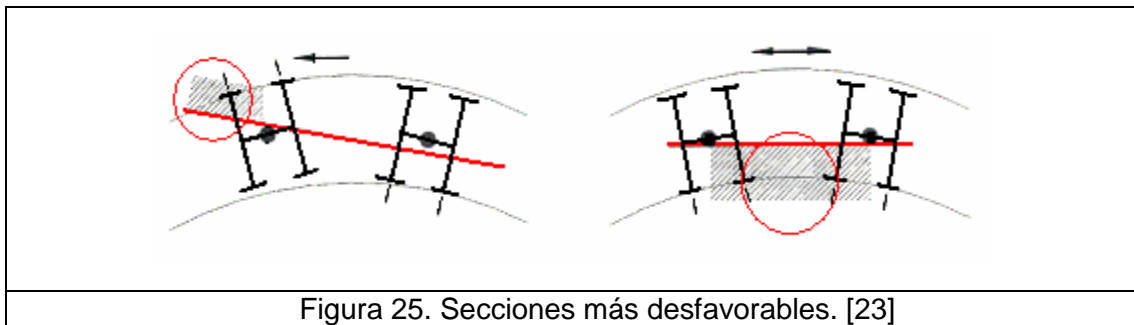
### 6.2.2- Contorno de referencia.

El objetivo del contorno de referencia es determinar el gálibo estático y el gálibo de obstáculos aplicando las reglas pertinentes. Si se calcula el contorno de referencia a partir de las reglas definidas por los servicios de la vía, los ejes del contorno de referencia coinciden con los ejes de la vía. El gálibo de ocupación estático y el cinemático con respecto a la vía se verán afectados, además de por las cotas del contorno de referencia, por los salientes máximos y los desplazamientos cuasi-estáticos. Si por el contrario, el contorno de referencia está asociado al material, sus ejes coincidirán con el eje del vehículo. Debido a los desplazamientos verticales, las cotas verticales del contorno de referencia disminuyen por las partes altas o aumentan por las partes bajas, mientras que las cotas horizontales del gálibo de construcción disminuyen con respecto a los ejes del vehículo.

### 6.2.3- Desplazamiento geométrico.

Se define el desplazamiento geométrico como los desplazamientos que sufre un vagón al describir un tramo de vía en curva. Este desplazamiento es diferente para cada sección transversal del vehículo y dependerá de factores geométricos de la vía y del vehículo. A mayor longitud entre boguies y menor radio de la curva, mayor será el desplazamiento que se produce.

Del conjunto de secciones del vagón se estudiarán los desplazamientos geométricos de las secciones más desfavorables, es decir aquellas que sufren un mayor desplazamiento lateral. En palabras más llanas, el desplazamiento geométrico no es más que la parte que sobresale del eje del elemento del vehículo debido a la curvatura de la vía. En la figura siguiente (figura 25) se observa como las secciones más desfavorables se encuentran en los extremos del vagón y en su sección central. Si el vehículo se encuentra cruzado en la vía, sus extremos sobresalen hacia el exterior y si el vagón se apoya sobre el carril interno, las secciones internas sobresalen hacia el interior de la curva.



Los desplazamientos geométricos que se estudiarán a continuación son los que se producen en estas dos secciones que se llamarán.

- 1- Desplazamiento de las secciones internas (dgi): Sección comprendida entre pivotes o ejes extremos en vehículos sin bogies.
- 2- Desplazamiento de las secciones externas (dga): sección comprendida más allá de los pivotes o ejes externos en vehículos sin bogies.

En las siguientes ecuaciones se emplearán los siguientes símbolos para el cálculo de los desplazamientos:

- **a** : Empate del vehículo. Se define como la distancia entre pivotes de vehículos montados sobre bogies o entre los ejes extremos de vehículos no montados sobre bogies.
- **R** : es el radio del tramo de vía curvo por el que circula el vehículo.
- **n** : es el eje extremo más cercano en los vehículos sin bogies o la distancia de la sección considerada hasta el pivote más cercano.
- **p** : es la distancia entre los ejes extremos del bogie (es el empate del bogie).

Para el cálculo de los desplazamientos geométricos se utilizará el concepto geométrico de la potencia que se define de la siguiente manera:

$PA \cdot PB = PC \cdot PD$
Ecuación 4. Potencia.

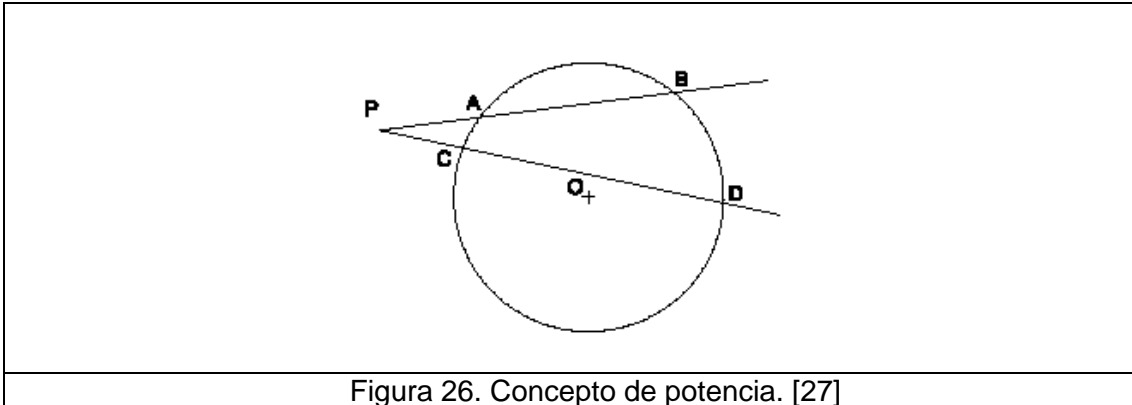


Figura 26. Concepto de potencia. [27]

Se comenzará calculando el desplazamiento geométrico dga. Se parte de un vehículo circulando por un tramo de vía curvo de radio “R”. Con la ayuda del concepto de potencia y la definición de dga, se puede concluir que la distancia “MP” de la siguiente figura (figura 27) corresponde al valor del desplazamiento de las secciones externas.

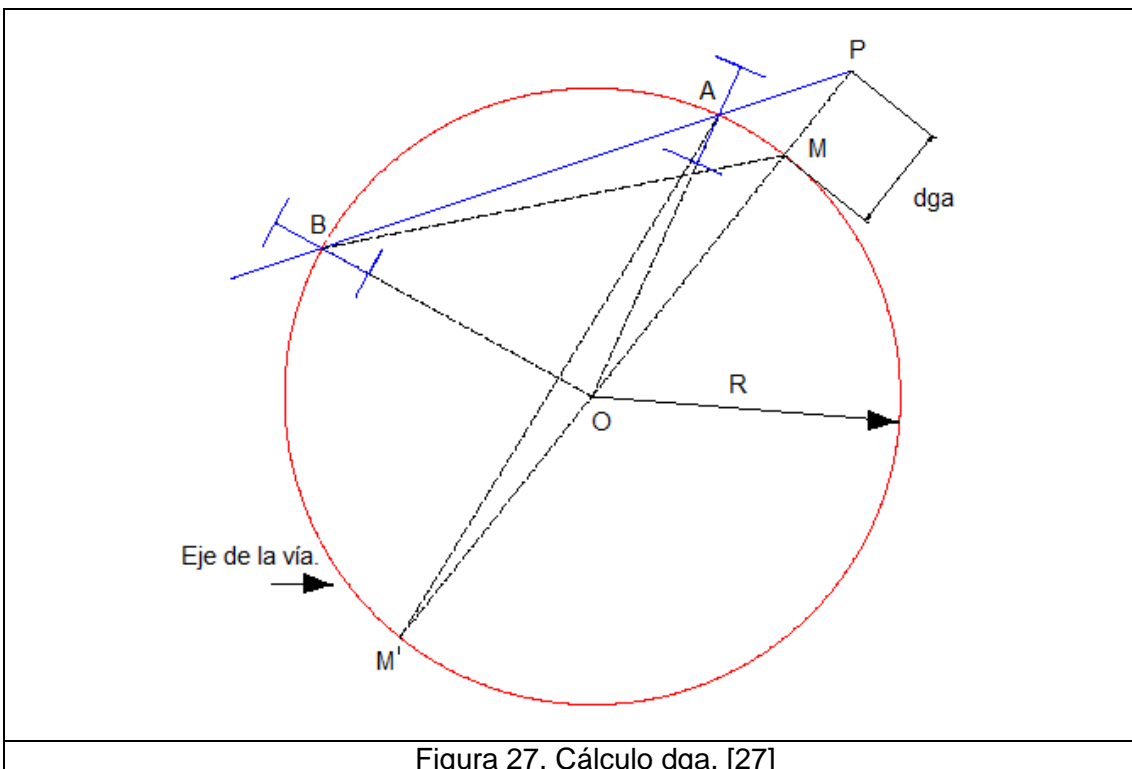


Figura 27. Cálculo dga. [27]

Como ya se dijo, se partirá del concepto de potencia obteniendo:

$$PA \cdot PB = PM \cdot PM'$$

Donde la distancia "PM" es el desplazamiento de las secciones externas (dga).

$$PM = dga$$

$$PA = n$$

$$AB = a \rightarrow PB = a + n$$

$$MM' = 2 \cdot R \rightarrow PM' = 2 \cdot R + dga$$

$$dga \cdot (2 \cdot R + dga) = n \cdot (a + n)$$

$$(dga)^2 + 2 \cdot R \cdot dga - n \cdot (a + n) = 0$$

Si despreciamos el término  $(dga)^2$  debido a que el orden de magnitud es muy pequeño en relación con el término  $(2 \cdot R \cdot dga)$ , se obtiene el valor simplificado:

$$dga = \frac{n \cdot (a + n)}{2 \cdot R}$$

Ecuación 5. Desplazamiento de las secciones externas.

De la misma forma se pasará a calcular el desplazamiento de las secciones internas (dgi), partiendo de un vehículo circulando por un tramo de vía de radio "R" y haciendo uso del concepto de potencia.

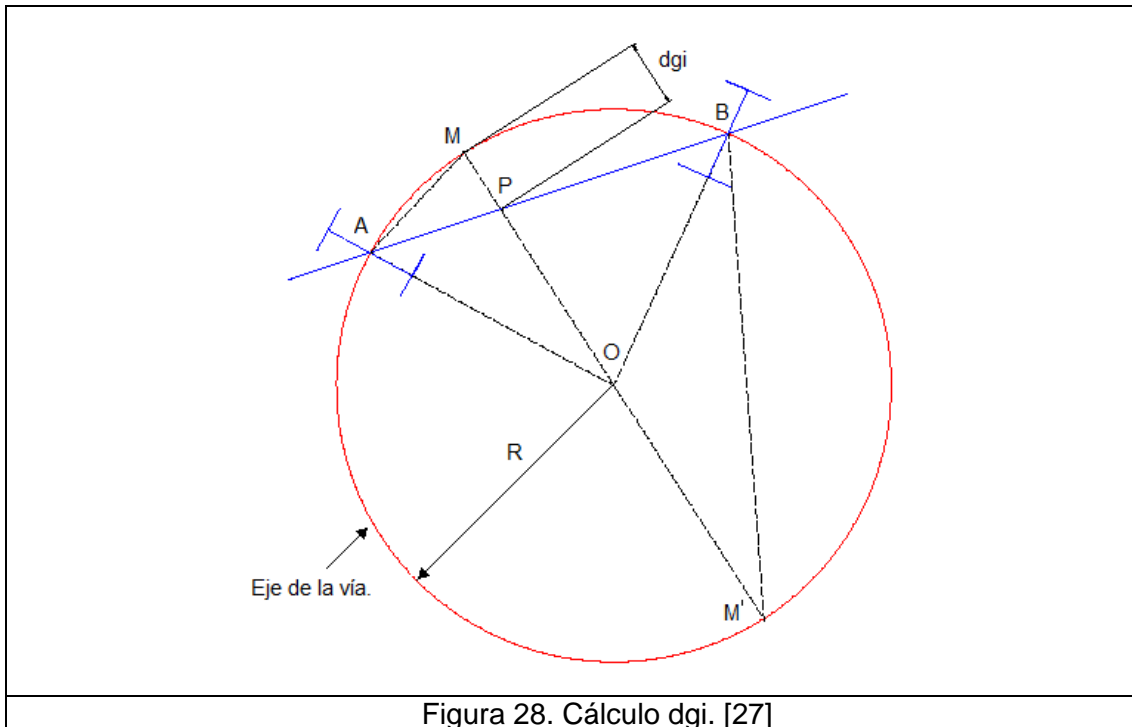


Figura 28. Cálculo dgi. [27]

Se parte del concepto de potencia y se obtiene:

$$PA \cdot PB = PM \cdot PM'$$

Donde "PM" es el desplazamiento de las secciones internas (dgi).

$$PM = dgi$$

$$PA = n$$

$$AB = a \rightarrow PB = a - n$$

$$MM' = 2 \cdot R \rightarrow PM' = 2 \cdot R - dgi$$

$$dgi \cdot (2 \cdot R - dgi) = n \cdot (a - n)$$

$$-(dgi)^2 + 2 \cdot R \cdot dgi - n \cdot (a - n) = 0$$

Debido al orden de magnitud del término  $(dgi)^2$  en comparación con  $(2 \cdot R \cdot dgi)$  se puede simplificar obteniendo:

$$dgi = \frac{n \cdot (a - n)}{2 \cdot R}$$

Ecuación 6. Desplazamiento de las secciones internas.

Estos desplazamientos geométricos no tienen en cuenta que el vehículo está montado sobre bogies. Si se considera este caso, el pivote de un bogie en la posición media sobre la vía se desplaza un valor  $dgi_{bogie}$  hacia el interior de la curva, por lo que hay que introducir este valor en las ecuaciones anteriores.

$$dgi_{bogie} = \frac{p^2}{8 \cdot R}$$

Ecuación 7. Valor máximo de  $dgi_{bogie}$ .

En conclusión, los desplazamientos geométricos para vehículos montados sobre bogies responden a las siguientes ecuaciones.

$$dga = \frac{n \cdot (a + n)}{2 \cdot R} - \frac{p^2}{8 \cdot R} = \frac{n \cdot a - n^2 - \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R}$$

Ecuación 8. Desplazamiento de las secciones externas con bogie.

$$dgi = \frac{n \cdot (a - n)}{2 \cdot R} + \frac{p^2}{8 \cdot R} = \frac{n \cdot a - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R}$$

Ecuación 9. Desplazamiento de las secciones internas con bogie.

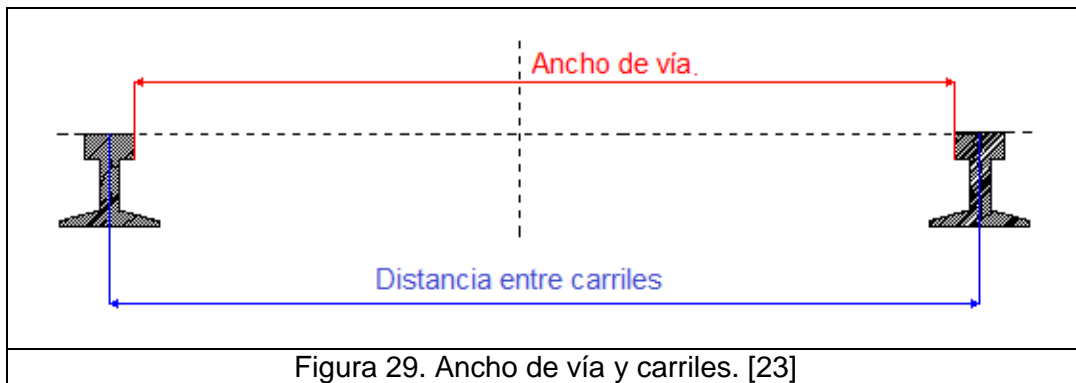
#### 6.2.4- Holguras laterales.

A continuación se describen los tres tipos de holguras laterales que existen.

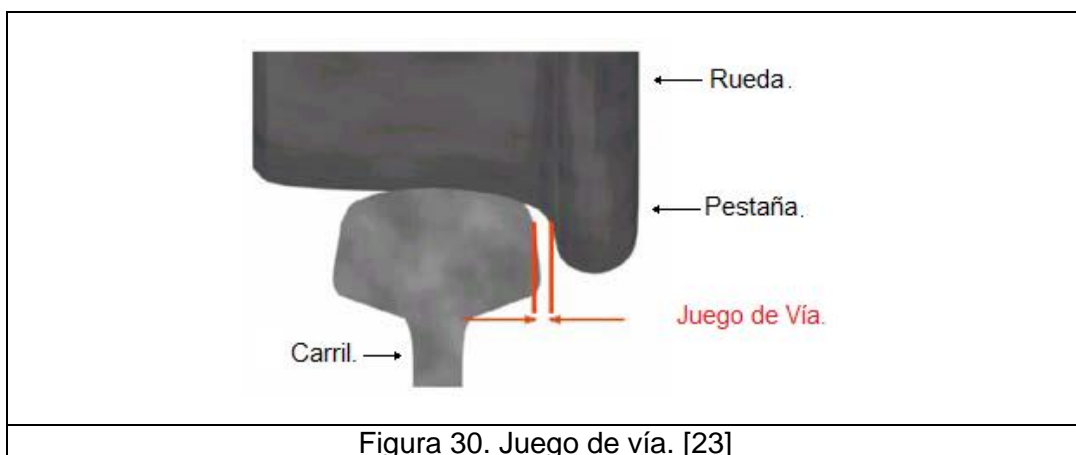
a) Holgura lateral entre ejes y vía con los máximos desgastes:

La siguiente figura (figura 29) muestra la disposición de los carriles en la vía, la línea azul es la distancia entre carriles (1.740 [mm] para RENFE y 1.507 [mm] para el ancho internacional UIC), mientras que la línea roja representa el ancho de vía (1.668 [mm] para RENFE y 1.435 [mm] para el ancho internacional UIC).





El medio de desplazamiento del ferrocarril se debe al sistema de rodadura entre rueda y carril. Las pestañas de las ruedas realizan el sistema de guiado con la particularidad de dejar cierto espacio entre la pestaña y el carril como se puede observar en la siguiente figura (figura 30). Ese espacio se llama juego de vía, el cual es diferente en cada red ferroviaria. El objetivo del juego de vía es permitir que haya cierta holgura entre carril y pestaña, lo que permite que haya movimientos relativos entre pestaña y carril. Esta situación, mal calibrada, podría dar como consecuencia el descarrilamiento en curva del vehículo.



Se define como holgura lateral entre ejes y vía ( $j$ ) como:

$$j = \frac{l - d}{2}$$

Ecuación 10. Holgura lateral entre ejes y vía.

El parámetro “d” es la separación exterior entre pestañas, medida a 10 [mm] por debajo del círculo de rodadura en un eje con ambas pestañas al límite del desgaste. Este valor es a cada lado del eje. Por motivos de seguridad existe un máximo de 1.643 [mm] para RENFE y 1.410 [mm] para el ancho internacional UIC. Mientras que el parámetro “l” es la anchura de la vía medida entre las caras

activas del carril. Este valor también tiene valores máximos de 1.698 [mm] para RENFE y 1.465 [mm] para el ancho internacional UIC.

El motivo de los valores máximos es que durante el trazado de una curva se puede producir un contacto excesivo entre el carril y la pestaña de la rueda. Para evitarlo se utiliza un sobre-ancho diferente en cada red ferroviaria y proporcional al radio de la curva a trazar. Este sobre-ancho dota al conjunto rueda-carril de cierta libertad de movimiento que se ve incrementada si se tienen en cuenta el desgaste de las llantas o del carril.

b) Holgura lateral entre ejes y bastidor de bogie con los máximos desgastes:

Se define como holgura lateral “q” entre ejes y el bastidor del bogie al posible desplazamiento entre eje y la caja de grasas a partir de su posición media y a cada lado del eje, considerando la condición de límite de desgaste.

c) Holgura lateral entre bastidores de bogie y caja:

La referencia que se debe tener en cuenta es el posible desplazamiento entre el pivote de los bogies y la caja del vehículo. En caso de ser un vehículo sin pivotes, será el desplazamiento entre la caja y el bastidor del bogie. Se define “w” como holgura lateral entre bastidor de bogie y caja. El valor de esta holgura dependerá del radio de la curva y de la sección a considerar, siendo “w<sub>i</sub>” para el lado interior de la curva y “w<sub>a</sub>” para el lado exterior de la curva.

La holgura lateral total será la suma de las tres holguras anteriormente descritas.

$$\text{holgura Total} = q + w + j$$

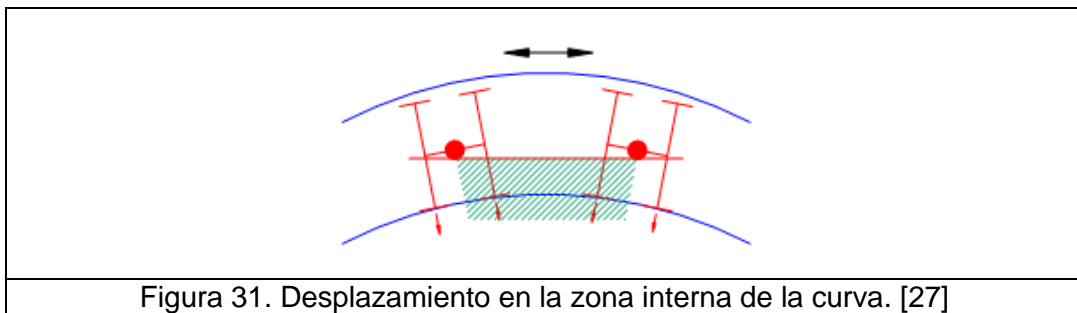
Ecuación 11. Holgura lateral total.

6.2.5- Coeficiente de inscripción.

Las holguras y los desplazamientos laterales que se han tratado hasta ahora consideran que los ejes están situados correctamente en la curva y que la posición media del vehículo se sitúa sobre el eje de la vía. Esta consideración es muy arriesgada si se tiene en cuenta que los bogies pueden adoptar cualquier situación debido a los patinajes entre ruedas y carril. Se debe considerar, para un cálculo del gálibo correcto, las secciones más desfavorables añadiendo a las holguras laterales un factor según el tipo de vehículo, la inscripción en curva y la sección considerada.

Si se supone que el vehículo está montado sobre bogies y va a circular por un tramo en curva de radio "R" , las tres holguras laterales anteriormente descritas se ven afectadas por los siguientes coeficientes de inscripción según la zona de la curva donde se produzca el desplazamiento:

- a) Coeficientes de inscripción cuando el desplazamiento se produce en la zona interna de la curva.



Holgura.	Coeficiente.	Holgura Real.
J	1	$j_{Re} = j = \frac{l - d}{2}$
q	1	$q_{Re} = q$
w	1	$w_{Re} = w$

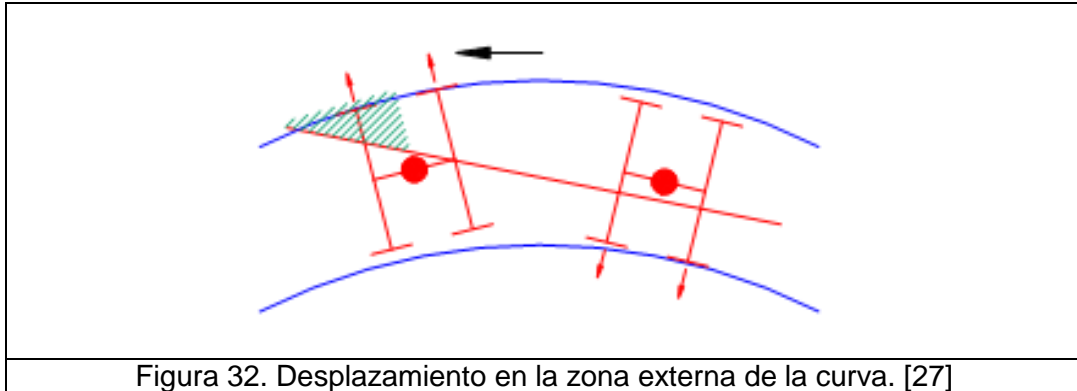
**Tabla 19. Coeficiente de inscripción para la zona interna de la curva.**

En la figura anterior (figura 31) se detalla la zona donde se produce el desplazamiento que en este caso es en el interior de la curva. En esta zona los coeficientes no afectan a las holguras. Por tanto el desplazamiento interno de las secciones internas quedará:

$$D_i = dgi + j_{Re} + q_{Re} + w_{Re} = \frac{n \cdot a - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} + \frac{l - d}{2} + q_{Re} + w_{Re}$$

Ecuación 12. Desplazamiento total de la sección interna.

- b) Coeficientes de inscripción cuando el desplazamiento se produce en la zona externa de la curva.



Holgura.	Coeficiente.	Holgura Real.
<b>J</b>	$\frac{2n + a}{a}$	$j_{Ri} = \left(\frac{2 \cdot n + a}{a}\right) \cdot \frac{l - d}{2}$
<b>q</b>	$\frac{2n + a}{a}$	$q_{Ri} = \left(\frac{2n + a}{a}\right) \cdot q$
<b>w</b>	$\frac{n + a}{2}$	$w_{Ri} = \left(\frac{n + a}{2}\right) \cdot w$

**Tabla 20. Coeficiente de inscripción para la zona externa de la curva.**

En la figura anterior (figura 32) se detalla la zona donde se produce el desplazamiento más desfavorable, en este caso en el exterior de la curva. Al contrario del caso anterior, en esta zona las holguras se ven afectadas por los coeficientes de inscripción, de tal manera que el desplazamiento externo de las secciones total queda según la siguiente ecuación.

$$D_a = dga + j_{Ri} + q_{Ri} + w_{Ri}$$

$$D_a = \frac{n \cdot a + n^2 - \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} + \left(\frac{2 \cdot n + a}{a}\right) \cdot \frac{l - d}{2} + \left(\frac{2n + a}{a}\right) \cdot q + \left(\frac{n + a}{2}\right) \cdot w$$

Ecuación 13. Desplazamiento total de la sección externa.

#### 6.2.6- Curva de transición.

Los primeros trazos de vías férreas encadenaban tramos rectos con simples arcos de circunferencia para poder ir sorteando los diferentes obstáculos que podía encontrar el tren a su paso. La relativa baja velocidad de estos vehículos permitía que el tránsito de un tramo recto de vía a otro curvo careciera de peligro. A medida que los trenes alcanzaban velocidades más elevadas dicho tránsito se convertía en un problema tanto de seguridad como de confort.

El aumento de la velocidad de los vehículos se traducían en un problema cuyos dos puntos de estudio eran el radio de la curva que quería trazar el tren y la fuerza centrífuga que experimentaba el vehículo. En el instante en el que un vehículo (con velocidad y masa constante se supone) pasa de circular por un tramo recto a otro curvo de radio "R", el vehículo sufre una sacudida, más o menos violenta, según el radio del tramo curvo, debido a la fuerza centrífuga que sufre el vehículo.

$$F = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

Ecuación 14. Fuerza centrífuga.

Por otro lado, la fuerza centrífuga desplaza al coche lateralmente de manera que una de las pestañas de la rueda se aproxima al carril haciendo desaparecer el juego de vía. Este hecho provoca un desgaste prematuro entre la vía y la rueda o incluso el descarrilamiento del vehículo.

En definitiva, cuando un tren se dispone a trazar un tramo de vía curvo, el vehículo experimenta una aceleración transversal repentina de valor " $v^2/R$ ". Si se deriva la aceleración respecto al tiempo y se obtiene la sobre-aceleración, se puede concluir que la sobre-aceleración alcanzaría un valor infinito justo en el instante del cambio de tramo recto al curvo, lo que provoca los problemas anteriormente descritos. La solución a todo esto es la construcción de la curva de transición.

El objetivo de la curva de transición es garantizar la continuidad dinámica y geométrica entre el tramo de vía recto y el tramo de vía curvo de radio "R". La continuidad dinámica persigue que la fuerza centrífuga ocasionada al modificar la trayectoria se

haga de manera gradual, de tal modo que el vehículo pueda trazar el tramo de vía curvo de forma suave, es decir, con velocidad angular constante, adecuándose al cambio de tramo. La continuidad geométrica está ligada al concepto anterior. Persigue la inexistencia de discontinuidades o puntos angulosos entre los elementos geométricos de dos alineaciones consecutivas, como pueden ser la curvatura o el peralte.

La curva de transición es una alineación que sirve como enlace entre dos tramos, uno curvo y otro recto, pero puede darse el caso de existir tramos de vía compuestos exclusivamente por este tipo de curvas.

Existen diferentes tipos de curvas de transición, la clotoide, la lemniscata de Bernoulli o la parábola cúbica, esta última fue la primera curva utilizada a medida que comenzaron los problemas con el aumento de la velocidad.

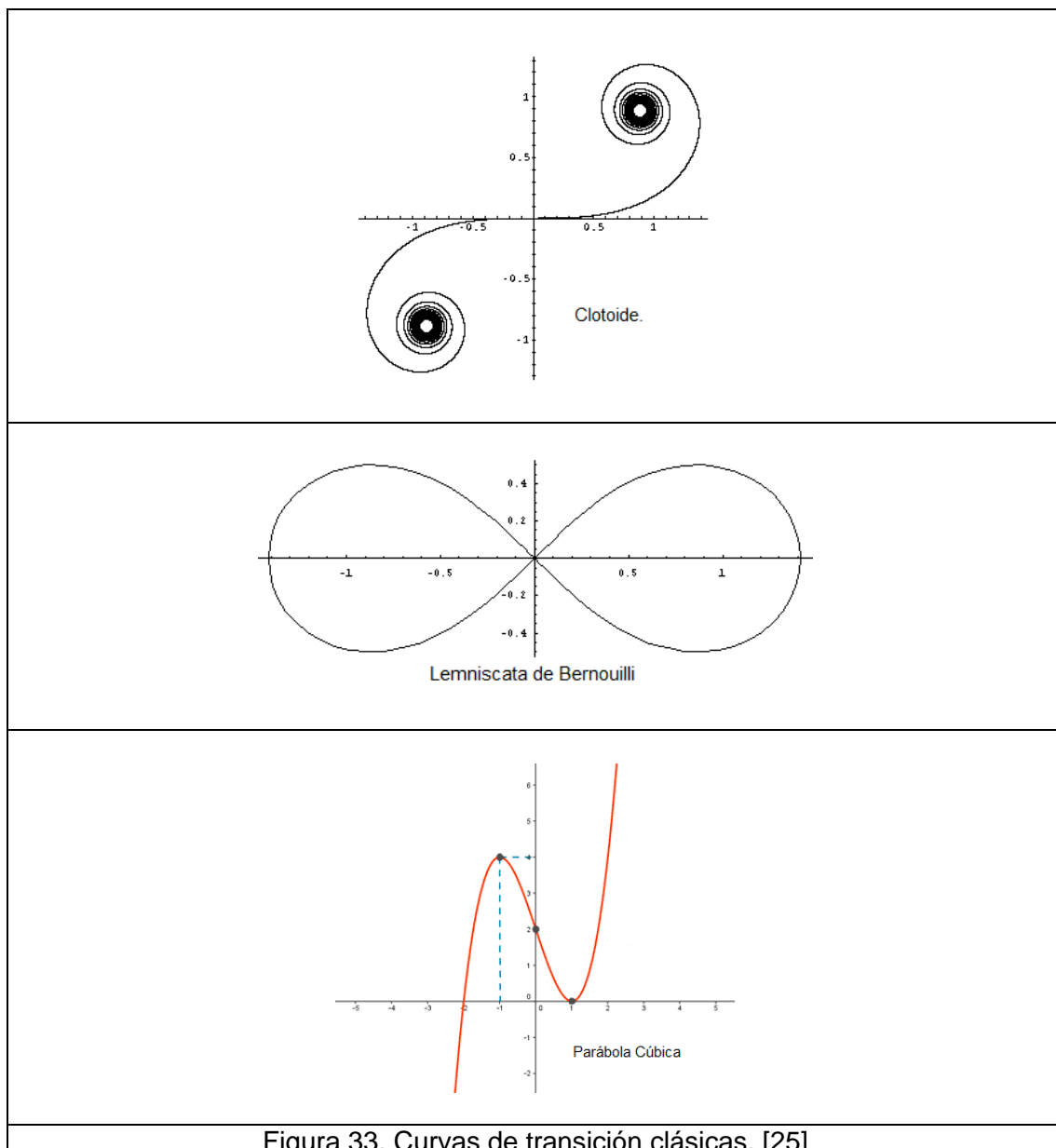


Figura 33. Curvas de transición clásicas. [25]

De todas ellas, la clotoide posee mejores características dinámicas por lo que es la que más se emplea en la construcción de curvas de transición ferroviarias.

La ecuación característica de la curva clotoide es la siguiente:

$$R \cdot L = A^2$$

Ecuación 15. Ecuación característica de la curva clotoide.

Donde “A” es el parámetro característico de la clotoide o constante, “L” la longitud recorrida y “R” es el radio de la curva que corresponde a dicha longitud.

La principal característica de una clotoide y que hace de esta una magnífica curva de transición es que el radio de curvatura disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia recorrida sobre ella, característica que permite al vehículo adaptarse de forma progresiva al cambio de trayectoria. Otra ventaja de este tipo de curvas es la perspectiva que nos ofrece su diseño geométrico que se traduce a una mayor distancia de visibilidad por parte del conductor. Por otro lado el estudio dinámico de la clotoide revela que una adecuada relación entre el radio de curvatura, el peralte y la velocidad proporciona una sensación de seguridad y comodidad al viajero, aumentando el confort del vehículo.

En los siguientes apartados se tratará de profundizar en la definición de una curva de transición como la clotoide, así como se expondrá un caso de su cálculo desde un punto de vista matemático. Se considera que merece dicha mención dada su importancia en el mundo ferroviario.

#### 6.2.6.1- Aspectos fundamentales.

En la siguiente figura (figura 34) se representa un arco de clotoide con los elementos que se utilizan en el trazado de curvas para unir un tramo recto con un tramo de circunferencia.





- h) La recta tangente al tramo de vía curvo en el punto  $F$  se denomina  $T_F$ .
- i) El ángulo entre  $T_F$  y el eje  $OX$  se llama ángulo girado y se designa como  $\varphi_F$ , siendo:

$$\tan\varphi_F = \frac{x_F - x_0}{y_0 - y_F}$$

Ecuación 16. Ángulo girado.

- j) Como se describirá en el siguiente apartado, se considera la siguiente relación entre el ángulo girado,  $\varphi_F$ , el radio de curvatura en  $F$ ,  $R$ , y la longitud de la clotoide,  $L$ :

$$\varphi_F = \frac{L}{2 \cdot R}$$

Ecuación 17. Función del ángulo girado.

- k) Los segmentos  $\overline{OM} = T_L$  y  $\overline{MF} = T_c$  se denominan tangente larga y tangente corta, respectivamente.
- l) El segmento o cuerda que une el origen  $O$  con  $F$  se designa como  $S_L = \overline{OF}$ .
- m) El ángulo que forma la cuerda  $S_L$  con la recta estado de alineaciones lo llamamos  $\sigma$ .

Una vez definidos los conceptos fundamentales de la curva clotoide se expondrá cómo calcular su ecuación.

#### 6.2.6.2- Cálculo de la ecuación de la curva de transición, la clotoide.

Para conocer una clotoide en particular se necesita conocer su parámetro "A", dado que su ecuación característica es " $A^2 = RL$ " como se citó anteriormente. Pero otra forma de expresar matemáticamente esta curva es en función del ángulo girado " $\varphi_F$ " según la longitud recorrida " $L$ " y siendo " $F$ " el punto de enlace con el tramo de la circunferencia de radio " $R$ ". Para ello, se debe partir de la propiedad que dice que el arco recorrido es proporcional al ángulo girado en una clotoide:

$$dL = R \cdot d\varphi_F$$

Si en la expresión anterior incluimos la ecuación característica de la clotoide, se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$dL = \frac{A^2}{L} \cdot d\varphi$$

Agrupando variables e integrando:

$$L \cdot dL = A^2 \cdot d\varphi \Rightarrow \int L \cdot dL = \int A^2 \cdot d\varphi \Rightarrow \frac{L^2}{2} = A^2 \cdot \varphi_F$$

Despejando el valor de  $L$ :

$$L = \sqrt{2 \cdot A^2 \cdot \varphi_F}$$

Si se llama:

$$m = \sqrt{2} \cdot A \Rightarrow L = m \cdot \sqrt{\varphi_F}$$

Se reemplaza " $m$ " por su valor en la expresión anterior y elevándolo al cuadrado se puede hallar una expresión que relaciona el ángulo girado, " $\varphi_F$ ", el radio de curvatura en " $F$ ", que es el radio del tramo curvo de vía " $R$ ", y la longitud de la clotoide, " $L$ ".

$$\begin{cases} L \cdot R = A^2 \\ L^2 = 2 \cdot A^2 \cdot \varphi_F \end{cases} \Rightarrow L \cdot R = \frac{L^2}{2 \cdot \varphi_F} \Rightarrow \boxed{\varphi_F = \frac{L}{2 \cdot R}}$$

El problema que plantea este tipo de expresiones es que no permite representar de forma rápida la curva en un sistema de coordenadas cartesianas. Por ello, en lugar de utilizar la relación " $\varphi_F = \frac{L}{2 \cdot R}$ " para calcular una aproximación de la longitud de la recta transición, se utiliza una herramienta matemática, los desarrollos en serie de la tangente de orden 7 que permite obtener las ecuaciones paramétricas de la siguiente forma:

$$\tan x \simeq x + \frac{1}{3} \cdot x^3 + \frac{2}{15} \cdot x^5 + \frac{17}{315} \cdot x^7$$

Ecuación 18. Desarrollo de orden 7.

En general, en cada punto " $P = r(s)$ " de la curva de transición o clotoide se cumple:

$$r(s) = \left( \int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds, \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r' = \left( \cos\left(\frac{s^2}{2RL}\right), \sin\left(\frac{s^2}{2RL}\right) \right) \Rightarrow \tan \varphi_P = \frac{\sin\left(\frac{s^2}{2RL}\right)}{\cos\left(\frac{s^2}{2RL}\right)}$$

Si aplicamos este desarrollo para el punto de enlace " $F$ " que une la recta de transición con el tramo de vía curvo de radio " $R$ ", se obtiene:

$$\tan \varphi_F = \frac{x_F - x_0}{y_0 - y_F} = \frac{\sin\left(\frac{L^2}{2RL}\right)}{\cos\left(\frac{L^2}{2RL}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{L}{2R}\right)}{\cos\left(\frac{L}{2R}\right)} = \tan\left(\frac{L}{2R}\right)$$

Si se aplica el desarrollo de orden 7, se obtiene:

$$\tan\left(\frac{L}{2R}\right) \approx \frac{L}{2R} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L}{2R}\right)^3 + \frac{2}{15} \cdot \left(\frac{L}{2R}\right)^5 + \frac{17}{315} \cdot \left(\frac{L}{2R}\right)^7$$

Una vez deducido lo anterior se seguirán los siguientes pasos para obtener las fórmulas para el cálculo de las coordenadas de " $r(s)$ ".

1- Se calcula el valor de la  $\tan(\varphi_F)$ , a partir de los puntos  $F = (x_F, y_F)$  y  $C = (x_0, y_0)$ :

$$\tan \varphi_F = \frac{x_F - x_0}{y_0 - y_F}$$

2- Se aplica la relación anterior para obtener una ecuación de séptimo grado en  $L$  que se resuelve de forma aproximada:

$$\tan\left(\frac{L}{2R}\right) \approx \frac{L}{2R} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L}{2R}\right)^3 + \frac{2}{15} \cdot \left(\frac{L}{2R}\right)^5 + \frac{17}{315} \cdot \left(\frac{L}{2R}\right)^7 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{x_F - x_0}{y_0 - y_F} = \frac{L}{2R} + \frac{L^3}{24R^3} + \frac{L^5}{240R^5} + \frac{17L^7}{40320R^7} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7$$

- 3- Únicamente será válido el valor de  $L$  Real. Este valor se sustituye en la expresión inicial:

$$\begin{aligned} r(s) = (x(s), y(s)) &= \left( \int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds, \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2A^2}\right) ds \right) = \\ &= \left( \int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds, \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds \right) \end{aligned}$$

- 4- Se aproxima las funciones trigonométricas tomando los desarrollos de Taylor con los seis términos no nulos para  $x(s)$ :

$$\begin{aligned} x(s) &= \int_0^s \cos\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds \simeq \\ &\simeq \int_0^s \left[ 1 - \frac{1}{2!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^4 - \frac{1}{6!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^6 + \frac{1}{8!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^8 - \frac{1}{10!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^{10} \right] ds = \\ &= \int_0^s \left[ 1 - \frac{s^4}{2!(2RL)^2} + \frac{s^8}{4!(2RL)^4} - \frac{s^{12}}{6!(2RL)^6} + \frac{s^{16}}{8!(2RL)^8} - \frac{s^{20}}{10!(2RL)^{10}} \right] ds = \\ &= s - \frac{s^5}{2! \cdot 5(2RL)^2} + \frac{s^9}{4! \cdot 9(2RL)^4} - \frac{s^{13}}{6! \cdot 13(2RL)^6} + \frac{s^{17}}{8! \cdot 17(2RL)^8} - \frac{s^{21}}{10! \cdot 21(2RL)^{10}} \end{aligned}$$

Y para  $y(s)$ :

$$\begin{aligned} y(s) &= \int_0^s \sin\left(\frac{s^2}{2RL}\right) ds \simeq \\ &\simeq \int_0^s \left[ \frac{s^2}{2RL} - \frac{1}{3!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^5 - \frac{1}{7!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^7 + \frac{1}{9!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^9 - \frac{1}{11!} \left(\frac{s^2}{2RL}\right)^{11} \right] ds = \\ &= \int_0^s \left[ \frac{s^2}{2RL} - \frac{s^6}{3!(2RL)^3} + \frac{s^{10}}{5!(2RL)^5} - \frac{s^{14}}{7!(2RL)^7} + \frac{s^{18}}{9!(2RL)^9} - \frac{s^{22}}{11!(2RL)^{11}} \right] ds = \\ &= \frac{s^3}{6RL} - \frac{s^7}{3! \cdot 7(2RL)^3} + \frac{s^{11}}{5! \cdot 11(2RL)^5} - \frac{s^{15}}{7! \cdot 15(2RL)^7} + \frac{s^{19}}{9! \cdot 19(2RL)^9} - \frac{s^{23}}{11! \cdot 23(2RL)^{11}} \end{aligned}$$

Resumiendo, las coordenadas de  $r(s)$  se pueden calcular aplicando la siguiente aproximación:

$$x(s) \approx s - \frac{s^5}{2!5(2RL)^2} + \frac{s^9}{4!9(2RL)^4} - \frac{s^{13}}{6!13(2RL)^6} + \frac{s^{17}}{8!17(2RL)^8} - \frac{s^{21}}{10!21(2RL)^{10}}$$

Ecuación 19. Aproximación de la coordenada "x" en una clotoide.

$$y(s) \approx \frac{s^3}{6RL} - \frac{s^7}{3!7(2RL)^3} + \frac{s^{11}}{5!11(2RL)^5} - \frac{s^{15}}{7!15(2RL)^7} + \frac{s^{19}}{9!19(2RL)^9} - \frac{s^{23}}{11!23(2RL)^{11}}$$

Ecuación 20. Aproximación de la coordenada "y" en una clotoide.

### 6.2.6.3- Construcción de una curva de transición a partir de una curva clotoide.

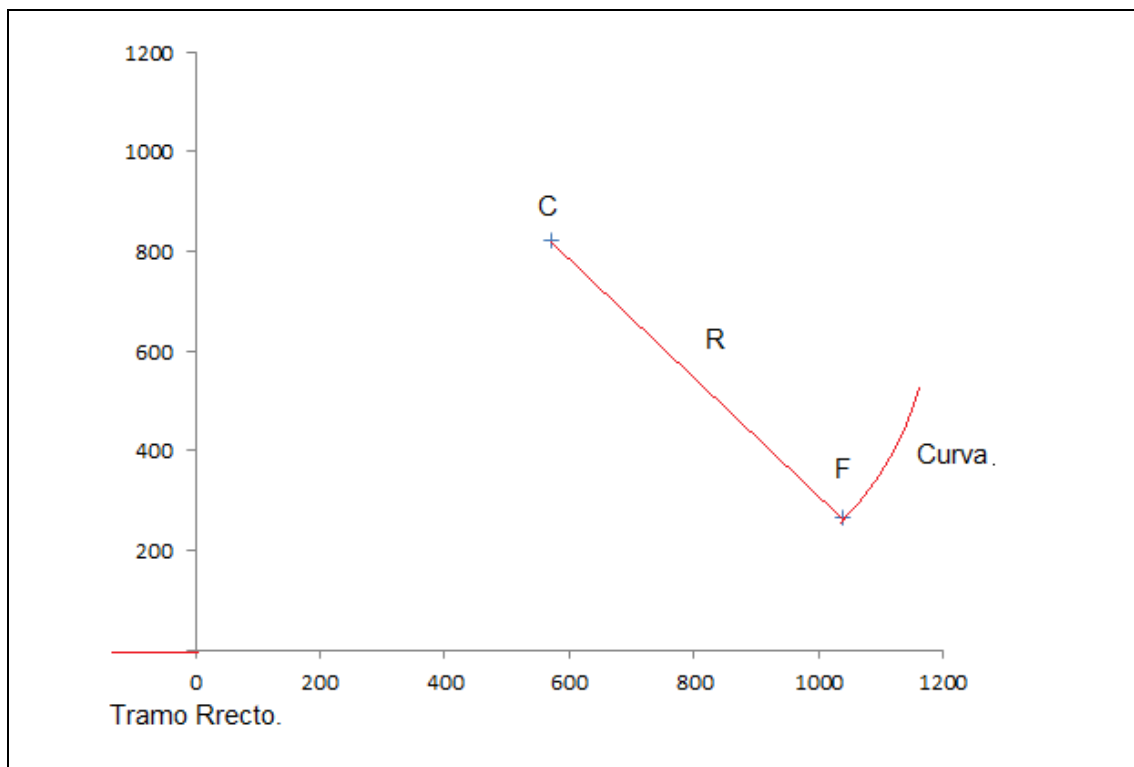
A continuación se expondrá el caso de la construcción de una curva de transición a partir de la aproximación de la ecuación de la clotoide. Se buscará la ecuación de la clotoide que una un tramo recto de vía, ubicado en el origen de coordenadas, con el punto "F" de enlace del arco de circunferencia y siendo "C" el centro de dicha circunferencia. Todas las medidas están expresadas en unidades sin dimensión.

Se parte de los puntos  $F = (x_F, y_F)$  y  $C = (x_0, y_0)$  como datos iniciales:

$$F = (x_F, y_F) = (1040, 267)$$

$$C = (x_0, y_0) = (570, 820)$$

La representación en coordenadas cartesianas de los datos iniciales sería:



El primer paso será calcular el radio de curvatura  $R$  y el ángulo girado  $\varphi_F$ :

$$R = \sqrt{(1040 - 570)^2 + (267 - 820)^2} \approx 725.75$$

$$\tan(\varphi_F) = \frac{1040 - 570}{820 - 267} = \frac{470}{553} \approx 0.84991$$

Se plantea la ecuación de séptimo grado para determinar  $L$ :

$$\begin{aligned} \tan(\varphi_F) &\approx \frac{L}{2R} + \frac{L^3}{24R^3} + \frac{L^5}{240R^5} + \frac{17L^7}{40320R^7} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{470}{553} &= \frac{20160LR^6 + 1680L^3R^4 + 168L^5R^2 + 17L^7}{40320R^7} \Rightarrow \\ \Rightarrow 20160LR^6 + 1680L^3R^4 + 168L^5R^2 + 17L^7 - \frac{470}{553}40320R^7 &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \boxed{L = 1022.49 \text{ única solución real.}} \end{aligned}$$

Se calcula el parámetro de la clotoide  $A^2$  :

$$A^2 = RL = 742071.43$$

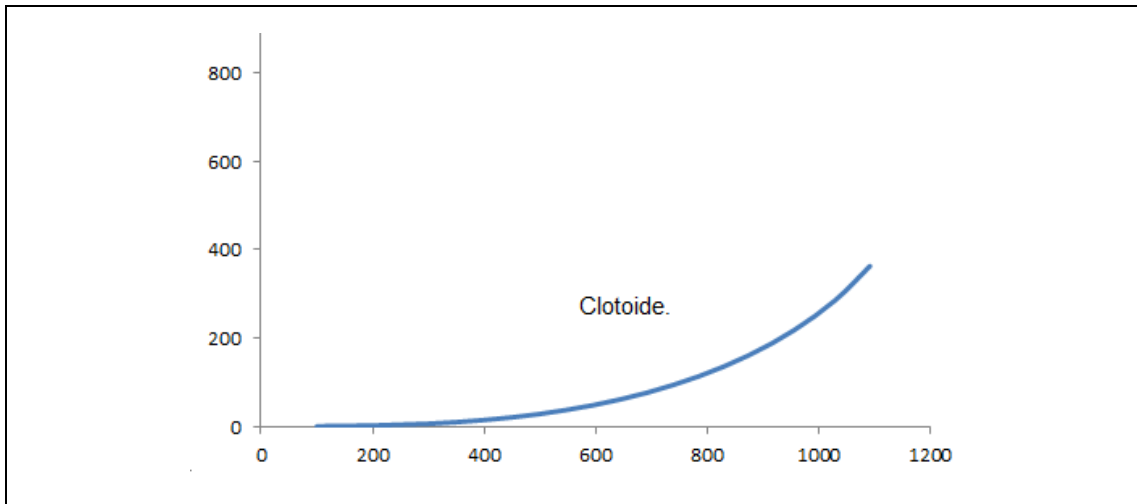
Y por último se obtienen de las ecuaciones paramétricas las coordenadas de  $r(s) = (x(s), y(s))$  para dibujar el tramo de la clotoide que corresponde a la vía de transición.

$$x(s) \approx s - \frac{s^5}{2! 5(2RL)^2} + \frac{s^9}{4! 9(2RL)^4} - \frac{s^{13}}{6! 13(2RL)^6} + \frac{s^{17}}{8! 17(2RL)^8} - \frac{s^{21}}{10! 21(2RL)^{10}}$$

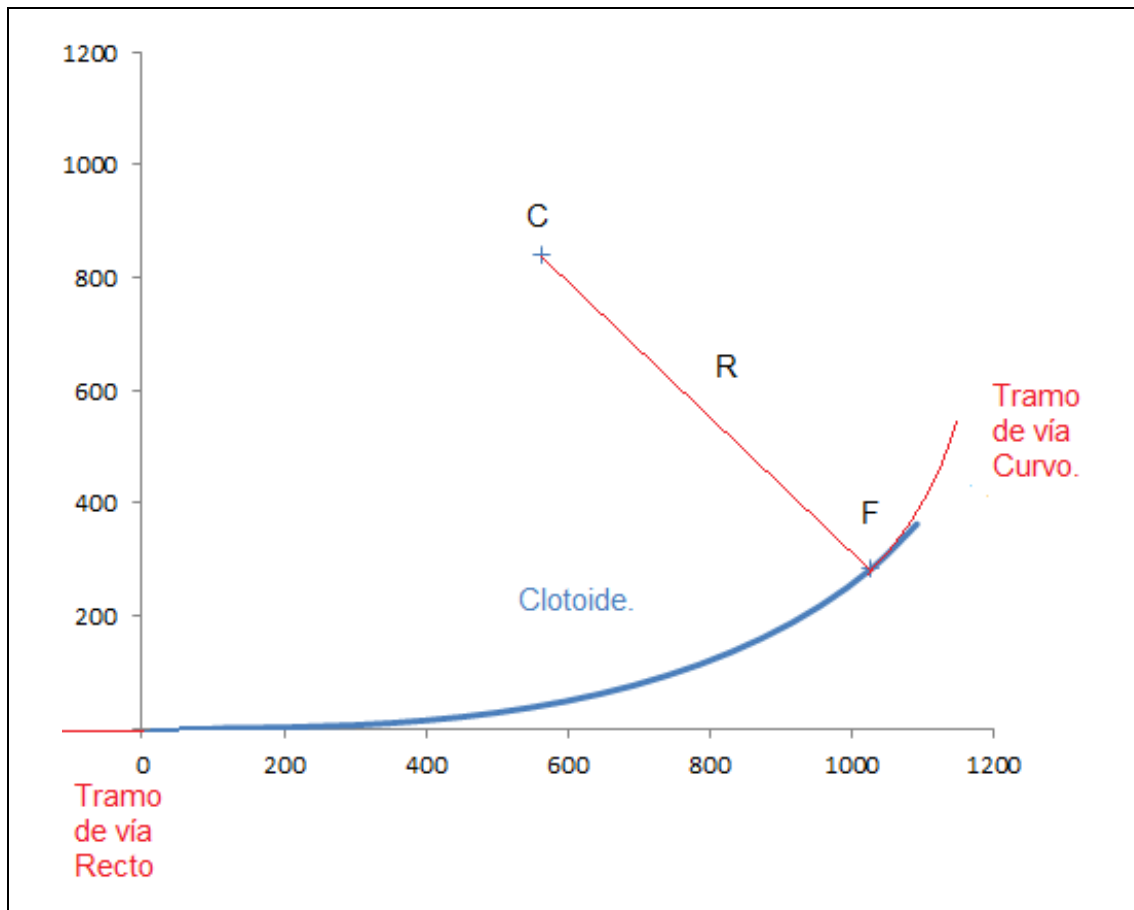
$$y(s) \approx \frac{s^3}{6RL} - \frac{s^7}{3! 7(2RL)^3} + \frac{s^{11}}{5! 11(2RL)^5} - \frac{s^{15}}{7! 15(2RL)^7} + \frac{s^{19}}{9! 19(2RL)^9} - \frac{s^{23}}{11! 23(2RL)^{11}}$$

La siguiente tabla refleja los valores calculados para la construcción de la gráfica que representa la curva de transición:

<b>s</b>	<b>x(s)</b>	<b>y(s)</b>
<b>100</b>	99,999546	0,2245958
<b>200</b>	199,985473	1,796679
<b>300</b>	299,889699	6,06251359
<b>400</b>	399,535362	14,3622494
<b>500</b>	498,583136	28,0177171
<b>600</b>	596,479358	48,3093477
<b>700</b>	692,408159	76,4388807
<b>800</b>	785,2511	113,475028
<b>900</b>	873,559352	160,28017
<b>1000</b>	955,545033	217,417683
<b>1100</b>	1029,09984	285,041749
<b>1200</b>	1091,85007	362,774681



Si se superponen ambos dibujos, se puede observar como la clotoide conecta el tramo recto de vía con el tramo curvo de radio  $R$ , obteniendo de esta forma la continuidad dinámica y geométrica entre el tramo recto y el curvo.



#### 6.2.7- Peralte.

Se llama peralte a la elevación del carril exterior de la curva (el de mayor radio) de tal manera que el vehículo se incline y sus componentes dinámicas contrarresten a la fuerza centrífuga originada por el tramo curvo.

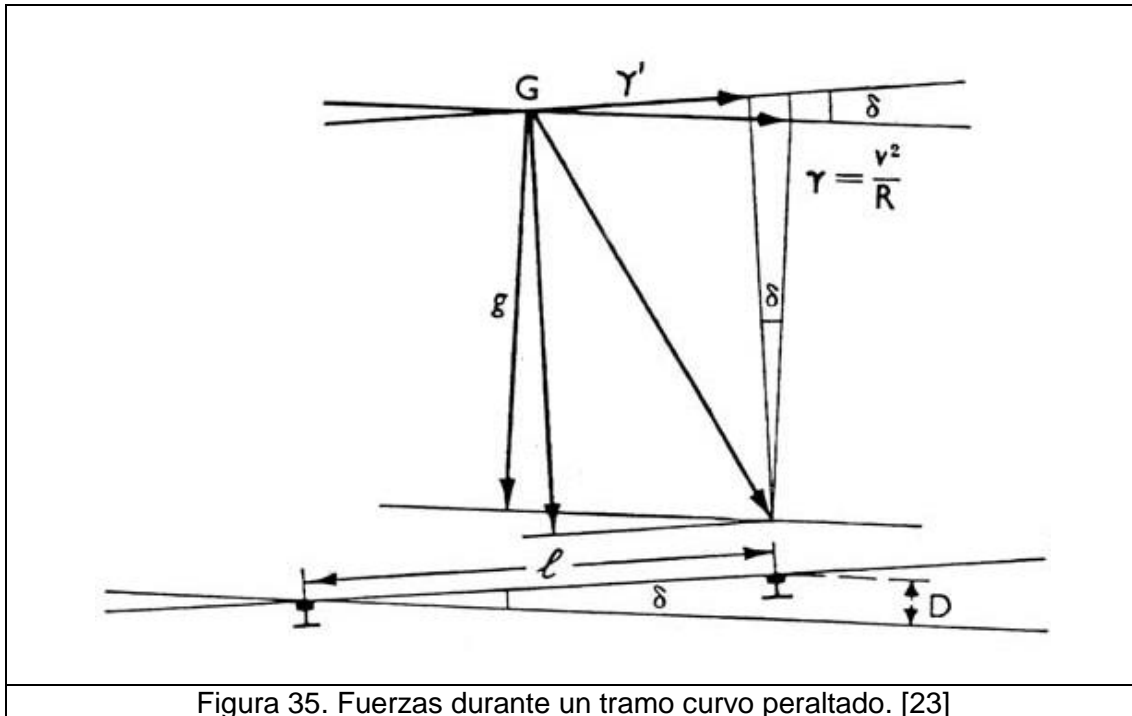
Como ya se indicó anteriormente, cuando un vehículo ferroviario traza una curva, el tren sufre una fuerza transversal llamada fuerza centrífuga. Esta fuerza desplaza al vehículo lateralmente aproximando la pestaña de la rueda al carril de la vía y haciendo desaparecer el juego entre carril y rueda. Este hecho, provoca un desgaste prematuro tanto en la rueda como en el carril disparando los gastos de mantenimiento de ambos. Por otro lado, el confort del viajero se ve afectado de forma negativa por la misma causa.

Las curvas de transición compensan estos problemas, pero sólo en combinación con el peralte permite al tren trazar curvas a grandes velocidades con seguridad y desgaste reducido. Como se verá más adelante, los conceptos de peralte y curvas de transición están estrechamente ligados.



6.2.7.1- Cálculo del peralte.

En los cálculos siguientes referidos al peralte, se supondrá que la suspensión del vehículo es infinitamente rígida, es decir, que no existe giro de la caja respecto al eje, de este modo, se pueden representar en la siguiente figura (figura 35) la aceleración de la gravedad "g" y la aceleración centrífuga "γ" en un sistema de coordenadas. Dicho sistema consta de dos ejes, uno paralelo al plano de la vía y el otro perpendicular a ella, de tal modo que el punto de corte coincide con el centro de gravedad del vehículo "G".



A partir de la figura anterior se define el concepto de peralte teórico o peralte exacto de equilibrio "D<sub>e</sub>", entendiéndose por tal peralte en el que la suspensión del vehículo no está sometida a ningún esfuerzo lateral. A continuación se muestra el desarrollo del cálculo del peralte en base a la figura anterior.

La aceleración centrífuga "γ" depende de la velocidad "v" y del radio de la curva "R":

$$\gamma = \frac{v^2}{R}$$

Entonces:

$$\gamma \cdot \cos(\delta) = g \cdot \sin(\delta)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot \cos(\delta) = g \cdot \sin(\delta)$$

Se puede asumir que el ángulo " $\delta$ " es de un orden de magnitud mucho más pequeño que la separación entre planos de rodadura de los carriles " $l$ ". Por lo tanto se pueden aproximar las siguientes expresiones del seno y el coseno:

$$\cos(\delta) = 1$$

$$\sin(\delta) = \frac{D_e}{l}$$

Con estas aproximaciones se obtiene:

$$\frac{v^2}{R} = g \cdot \frac{D_e}{l}$$

$$D_e = \frac{v^2 \cdot l}{R \cdot g}$$

Ecuación 21. Peralte teórico.

Siendo la expresión de la aceleración centrífuga compensada por el peralte lo que resulta al despejar " $\frac{v^2}{R}$ " de la ecuación anterior:

$$\frac{D_e \cdot g}{l} = \frac{v^2}{R}$$

$$\gamma = \frac{D_e \cdot g}{l} = \frac{v^2}{R}$$

Ecuación 22. Aceleración centrífuga compensada por el peralte.

#### 6.2.7.2- Exceso o insuficiencia de peralte.

Dado que la aceleración centrífuga que sufre un vehículo dependerá de la velocidad con la que dicho vehículo circula por el tramo de vía curva, se han de definir los conceptos de Insuficiencia de peralte "I" y Exceso de peralte "E".

Como se ha visto, la aceleración centrífuga que sufre el vehículo es corregida con la implantación del peralte en la curva. Pues bien, la diferencia entre la aceleración

centrífuga que sufre el vehículo y la corrección que se aplica con el peralte se denomina aceleración centrífuga no compensada “ $\gamma'$ ”.

$$\gamma' = \gamma - \frac{D}{l} \cdot g = \frac{v^2}{R} - \frac{D}{l} \cdot g = \frac{g}{l} \cdot \left( \frac{v^2 \cdot l}{g \cdot R} - D \right) = \frac{g}{l} \cdot (I \text{ ó } E)$$

Ecuación 23. Aceleración centrífuga no compensada.

Por tanto, un exceso de peralte provoca una aceleración no compensada negativa de modo que el tren se inclinará sobre sus muelles hacia el interior de la curva, mientras que una insuficiencia de peralte provocará una aceleración no compensada positiva haciendo que el tren se incline sobre sus muelles hacia el exterior de la curva.

Se pueden definir entonces los términos de Insuficiencia “I” o Exceso “E” de peralte como los valores de la aceleración centrífuga no compensada que superan al peralte exacto de equilibrio por lo cual la suspensión no sufre ningún esfuerzo lateral en ese tramo en curva.

Si se circula con un peralte inferior al de equilibrio “ $D_e - \varepsilon$ ” aparece una insuficiencia de peralte “ $I = \varepsilon$ ” y el vehículo se inclinará hacia el exterior de la curva, obteniendo una aceleración centrífuga no compensada de valor:

$$\gamma' = \frac{g \cdot \varepsilon}{l}$$

Si el peralte es superior al de equilibrio “ $D_e + \varepsilon$ ” se tiene un exceso de peralte de valor “ $E = \varepsilon$ ”, haciendo que el vehículo bascule hacia el interior de la curva obteniéndose una aceleración centrífuga no compensada de valor:

$$\gamma' = -\frac{g \cdot \varepsilon}{l}$$

Los intervalos de valores para la Insuficiencia o Exceso de peralte que consideran las redes ferroviarias son:

$$0.050 [m] < I < 0.160 [m]$$

$$0.050 [m] < E < 0.200 [m]$$

### 6.2.7.3- Peralte y curva de transición.

La curva de transición descrita en apartados anteriores y el peralte están estrechamente ligados. El inicio de la curva de radio constante debe contar con el peralte adecuado para evitar los desgastes de vía y carril descritos anteriormente a consecuencia de la aceleración centrífuga. Evidentemente, la elevación del peralte no puede hacerse de forma súbita, así que se aprovecha la curva de transición para ir elevando progresivamente la cota del carril, de forma que cuando se acabe y entre en la curva de radio constante, el carril exterior haya alcanzado la cota necesaria de peralte. Dado que la curva de transición más común es una clotoide en el que el crecimiento de la aceleración transversal será lineal, el crecimiento del peralte en la rampa de peralte también será lineal.

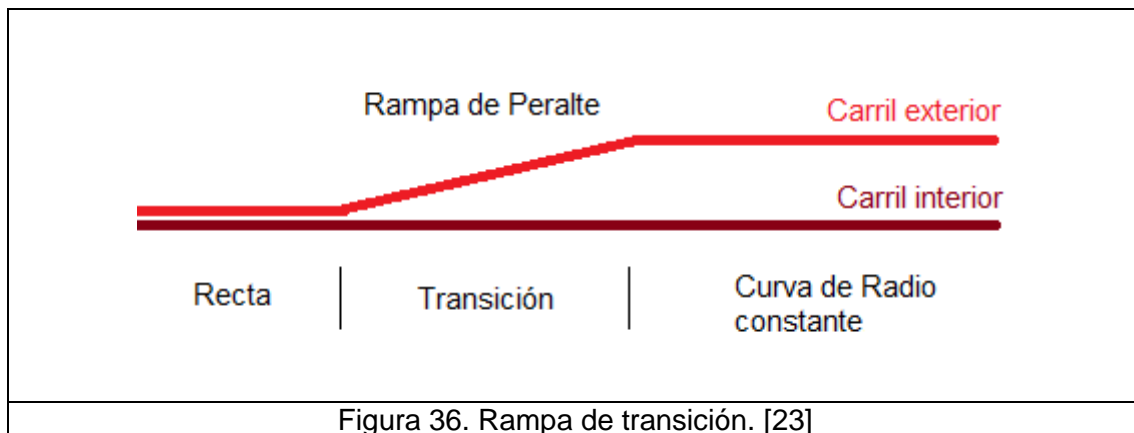


Figura 36. Rampa de transición. [23]

### 6.2.8- Centro de balanceo y desplazamiento cuasi-estático.

Se llamará centro de balanceo, al punto alrededor del cual la caja de un vehículo gira inclinándose sobre los muelles de la suspensión, a causa de una fuerza transversal paralela al plano de rodadura, sin tener en cuenta ni las holguras laterales ni los efectos de los amortiguadores. Cuando un vehículo recorre un tramo de vía curvo, un exceso o insuficiencia de peralte somete al vehículo a una fuerza transversal debida a la aceleración centrífuga que experimenta el vehículo. El vehículo reacciona a esta fuerza mediante una inclinación cuasi-estática en relación a la posición de equilibrio. Por otro lado, los vehículos en movimiento siempre estarán sujetos a fenómenos aleatorios como el estado de la vía, el desgaste del material, generación de resonancias, etcétera, fenómenos que provocan oscilaciones incluidas en la inclinación cuasi-estática.

La siguiente figura (figura 37) representa el centro de balanceo en el punto "C" que dista del plano de rodadura una distancia " $h_c$ ". La posición del centro de balanceo, puede considerarse independiente de la magnitud de la fuerza transversal que sufra el vehículo.

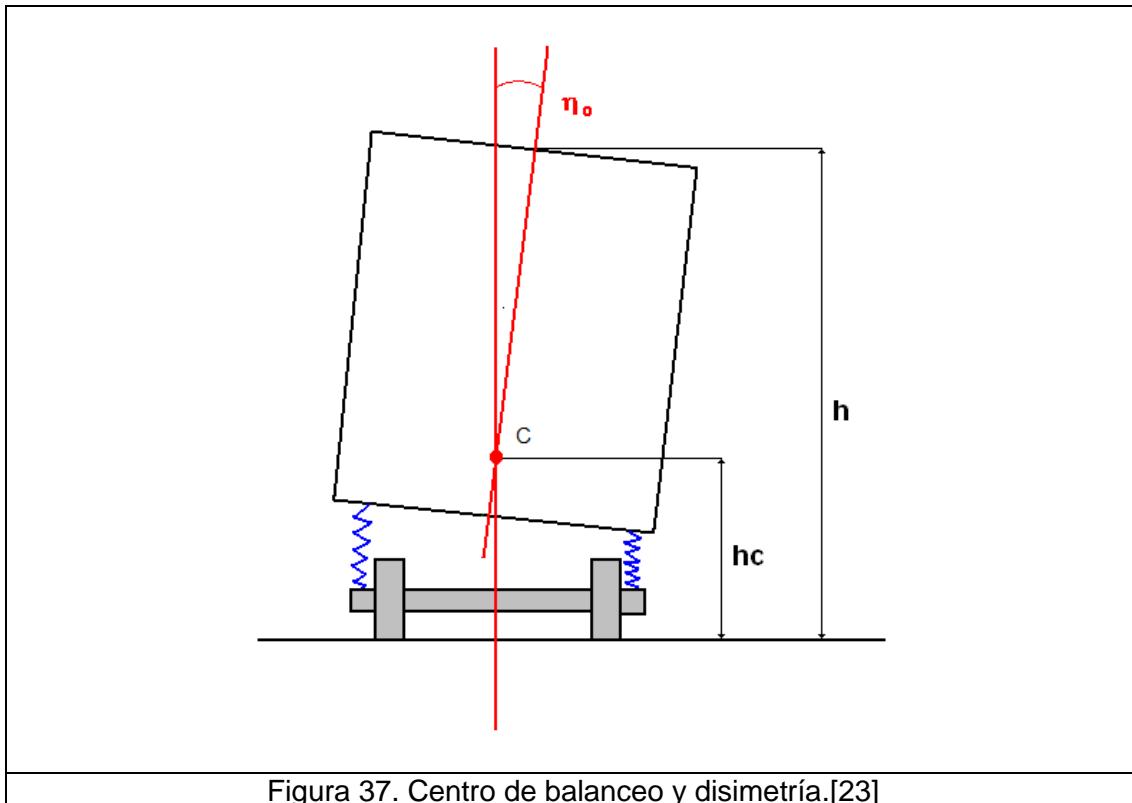


Figura 37. Centro de balanceo y disimetría.[23]

Haciendo uso de la anterior figura, se puede definir el concepto de disimetría. Cuando un vehículo presenta un reparto desigual de la carga estando sobre una vía recta y nivelada respecto de la perpendicular al plano de rodadura en estado de reposo, la caja del vehículo se inclinará un ángulo “ $\eta_0$ ” denominado disimetría.

La desviación de un punto de la caja situado a una altura “ $h$ ”, como se representa en la anterior figura (figura 37) se puede valorar mediante:

$$\tan[\eta_0 - 1^\circ]_{>0} \cdot (h - h_c)$$

Ecuación 24. Desviación de un punto de la caja.

Como aclaración, cabe destacar que el término entre corchetes toma su valor siempre y cuando sea mayor que cero y valdrá cero si es negativo o propiamente cero. En consecuencia sólo son relevantes los ángulos de disimetría mayores de un grado.

La disimetría está ligada a los desplazamientos cuasi-estáticos, de tal forma que disimetrías mayores de  $1^\circ$  producen el desplazamiento lateral de un punto a una altura considerada. Por otro lado, los desplazamientos cuasi-estáticos también tienen en cuenta los efectos de la suspensión del vehículo que producen desplazamientos laterales. Por tanto la suma de los dos efectos provocados por la suspensión y la disimetría producen el siguiente desplazamiento cuasi-estático:

$$z = \left( s \cdot \frac{(I \delta E)}{l} + \tan[\eta_0 - 1]_{>0} \right) \cdot (h - h_0)$$

Ecuación 25. Desplazamientos cuasi-estáticos.

#### 6.2.8.1- Coeficiente de souplesse.

El coeficiente de souplesse o coeficiente de flexibilidad “s”, representa el efecto de la suspensión en el balanceo y se puede definir como la relación entre el ángulo que forma la caja de un vehículo con la perpendicular al plano de rodadura “ $\eta$ ” y el ángulo que forma el plano de rodadura con la horizontal “ $\delta$ ” al encontrarse el vehículo parado sobre una vía con peralte.

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

Ecuación 26. Coeficiente de souplesse.

En la figura siguiente (figura 38) se observa como la suspensión del vehículo permite a la caja mantener una posición paralela a la horizontal del plano, manteniendo el confort en el interior del vehículo. En ella, también se representan los ángulos “ $\eta$ ” y “ $\delta$ ” descritos anteriormente.

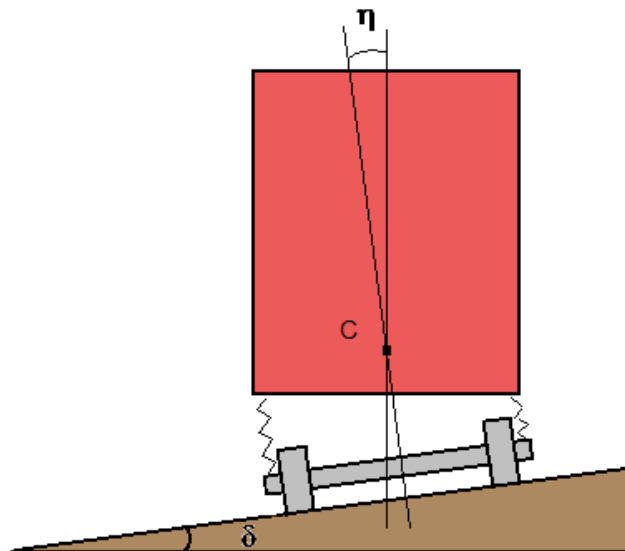


Figura 38. Ángulos de inclinación del vehículo.[27]

Las dos figuras anteriores (figura 37 y 38) representan situaciones del vehículo estacionarias, es decir, las magnitudes de los ángulos no varían con el tiempo. En una situación donde el vehículo experimenta cambios a lo largo del tiempo, el estudio

cuasi-estático, donde se concretan todas las variables en cada instante de tiempo, define la magnitud de cada ángulo o coeficiente. El coeficiente de souplesse está relacionado con el ángulo de giro cuasi-estático de la masa de la caja " $\varphi_2$ ", la acción de la gravedad "g" y la aceleración centrífuga no compensada por el peralte "j".

$$s = \varphi_2 \cdot \frac{g}{j}$$

Ecuación 27. Coeficiente de souplesse.

En el siguiente apartado se expondrá el cálculo teórico del ángulo de giro cuasi-estático " $\varphi_2$ ".

#### 6.2.8.2- Cálculo teórico del ángulo de giro cuasi-estático.

La necesidad de conocer la ocupación cinemática de los vehículos en la vía implica conocer la amplitud de los desplazamientos debidos al coeficiente de souplesse de la suspensión. Este conjunto de desplazamientos, en relación a su posición de equilibrio, están definidos generalmente en función del ángulo de balanceo.

Para el cálculo teórico del ángulo de giro cuasi-estático se va a definir, previamente, la notación que se va a emplear y sus unidades de medida:

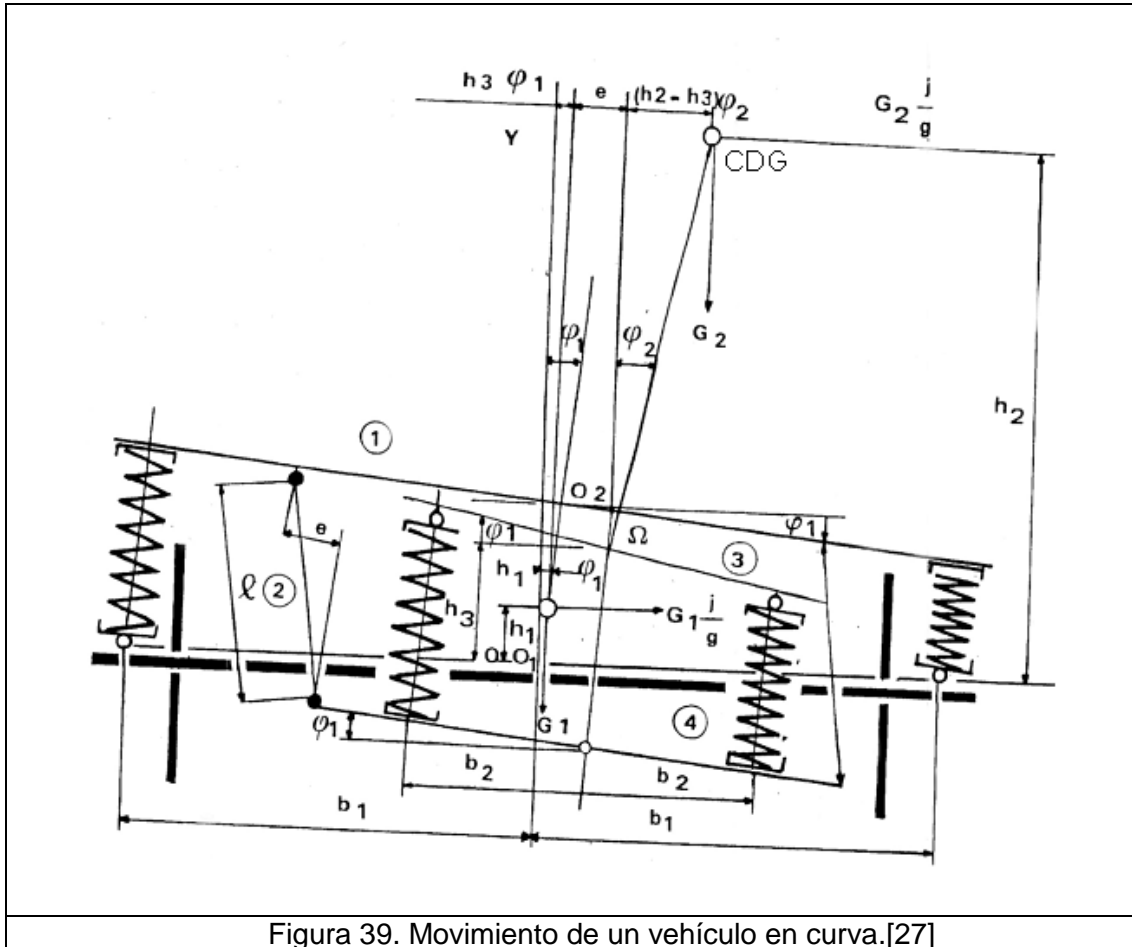
- **G<sub>1</sub>** Peso de la parte suspendida de los bogies (etapa primaria) [kg].
- **G<sub>2</sub>** Peso de la caja del vehículo (etapa secundaria) [kg].
- **j** Aceleración centrífuga no compensada [m/s<sup>2</sup>].
- **g** Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>].
- **V** Velocidad de circulación [m/s].
- **R** Radio de curvatura [m].
- **D** Peralte [mm].
- **I** Insuficiencia de peralte [mm].
- **E** Exceso de peralte [mm].

- $h_1$  Altura del centro de gravedad de la masa suspendida del bogie por encima de su eje de rotación "O" [mm].
- $h_2$  Altura del centro de gravedad de la masa de la caja del vehículo por encima de su eje de rotación "O" [mm].
- $h_3$  Altura por encima de su eje de rotación "O" de los puntos de la caja del vehículo donde se aplican las fuerzas de acoplamiento transversal entre bogies y la masa de la caja [mm].
- $2b_1$  Distancia de la base de los resortes de la suspensión al eje de la caja (suspensión primaria) [mm].
- $2b_2$  Distancia de la base de los resortes de la suspensión al eje de las traviesas móviles (suspensión secundaria) [mm].
- $c_1$  Rigidez vertical de los muelles de la suspensión primaria sobre un lado del vehículo [kg/mm].
- $c_2$  Rigidez vertical de los muelles de la suspensión secundaria sobre un lado del vehículo [kg/mm].
- $e$  Desplazamiento lateral con respecto a los puntos iniciales [mm].
- $l$  Longitud de las bielas de la suspensión [mm].
- $\varphi_1$  Ángulo de inclinación cuasi-estático de la parte suspendida de los bogies en relación a la unión de las cabezas de los carriles [radianes].
- $\varphi_2$  Ángulo de inclinación cuasi-estático de la masa de la caja en relación a la unión de las cabezas de los carriles [radianes].

Como observación destacar que se consideran negativas las cotas " $h_1$ ", " $h_2$ " y " $h_3$ " si se encuentran por debajo del eje de rotación "O".



A partir de la siguiente figura (figura 39) y con la notación se expondrá el cálculo teórico del ángulo de giro cuasi-estático " $\varphi_2$ " durante las siguientes páginas.



La figura anterior (figura 39) muestra el par de fuerzas al que está sometido un vehículo circulando por un tramo de vía curvo peraltada. Estas dos fuerzas laterales actúan debido a la aceleración centrífuga no compensada por el peralte teniendo:

- $G_1 \cdot j$ : Fuerza aplicada en el centro de gravedad de las masas suspendidas del bogie, lo que se llamará etapa primaria.
- $G_2 \cdot j$ : Fuerza aplicada en el centro de gravedad de la masa de la caja, lo que se llamará etapa secundaria.

Estas fuerzas provocan la inclinación, en sentido transversal, de la etapa primaria y secundaria, siendo los ángulos " $\varphi_1$ " y " $\varphi_2$ " los resultados, respectivamente, de tal inclinación. Debido a que estos ángulos son pequeños, pueden darse por correctas las siguientes aproximaciones para los cálculos:

$$\sin \varphi = \tan \varphi = \varphi$$

$$\cos \varphi = 1$$

Por otro lado, se considera que la etapa secundaria se desplaza transversalmente una distancia “e” con respecto a la etapa primaria.

Si se considera que la etapa primaria se inclina hacia la derecha un ángulo “ $\varphi_1$ ” (tomando como positivo el giro hacia la derecha), los resortes de la suspensión primaria del lado derecho del vehículo se comprimen un valor “ $x_1 = b_1 \cdot \varphi_1$ ”. Como consecuencia evidente, los resortes del lado izquierdo se alargan “ $x_1 = -b_1 \cdot \varphi_1$ ”. La consecuencia de estas elongaciones es un par de torsión “ $M_1 = 2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_1$ ” aplicada en la etapa primaria, provocando una rotación hacia la izquierda. Por otra parte, se considera que la inclinación relativa entre las etapas primaria y secundaria es “ $\varphi_2 - \varphi_1$ ” dando lugar a un par “ $M_2 = 2 \cdot c_2 \cdot b_2^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)$ ” que provoca una rotación hacia la derecha de la etapa primaria y una rotación hacia la izquierda en la etapa secundaria. Durante la inclinación transversal de las dos etapas, sus respectivos centros de gravedad se desplazan lateralmente a partir de un plano de simetría de apoyo, de modo que sus fuerzas de gravedad dan lugar a la aparición de un par que actúa en el sentido creciente de los ángulos de inclinación cuasi-estáticos. Dicho esto, si se aplica equilibrio de momentos en el punto de articulación “ $\Omega$ ” y en el centro de rotación “O”, se podrá calcular el ángulo de giro cuasi-estático “ $\varphi_2$ ”, necesario para el cálculo del coeficiente de souplesse.

La figura 39 servirá de apoyo para plantear los siguientes equilibrios de momentos. Se considera el punto de articulación “ $\Omega$ ”, donde se aplican las fuerzas de acoplamiento transversal como el punto desde el cual se tomarán los momentos de las fuerzas ejercidas en la etapa secundaria:

$$\sum M_{\Omega} = 0$$

$$G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot j + G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2 \cdot g - 2 \cdot c_2 \cdot b_2^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot g = 0$$

$$G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \frac{j}{g} + G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2 - 2 \cdot c_2 \cdot b_2^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = 0$$

Ecuación 28. Sumatorio de momentos respecto el punto  $\Omega$ .

De la misma forma, se considera el equilibrio de momentos en el centro de rotación “O” de la suspensión primaria. Se tendrán en cuenta el conjunto de fuerzas aplicadas sobre ambas etapas, primaria y secundaria, obteniendo el siguiente equilibrio:

$$\sum M_O = 0$$

$$G_1 \cdot h_1 \cdot j + G_1 \cdot h_1 \cdot \varphi_1 \cdot g + G_2 \cdot h_2 \cdot j + G_2 \cdot [h_3 \cdot \varphi_1 + e + (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2] \cdot g - 2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_1 \cdot g = 0$$

$$G_1 \cdot h_1 \cdot \frac{j}{g} + G_1 \cdot h_1 \cdot \varphi_1 + G_2 \cdot h_2 \cdot \frac{j}{g} + G_2 \cdot [h_3 \cdot \varphi_1 + e + (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2] - 2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_1 = 0$$

Ecuación 29. Sumatorio de momentos respecto el punto O.

De la ecuación 28 se despeja la expresión “ $\varphi_1 + \frac{j}{g}$ ”:

$$G_2 \cdot (h_2 - h_3) + G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2 \cdot \frac{g}{j} - 2 \cdot c_2 \cdot b_2^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \frac{g}{j} = 0$$

$$G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \left[ \varphi_2 \cdot \frac{g}{j} + 1 \right] - 2 \cdot c_2 \cdot b_2^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \frac{g}{j} = 0$$

$$G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \left[ \varphi_2 + \frac{j}{g} \right] - 2 \cdot c_2 \cdot b_2^2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = 0$$

$$\frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \cdot \left[ \varphi_2 + \frac{j}{g} \right] - (\varphi_2 - \varphi_1) = 0$$

$$\varphi_1 + \frac{j}{g} = \varphi_2 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right) + \frac{j}{g}$$

$$\varphi_1 + \frac{j}{g} = \varphi_2 \cdot \left( 1 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \right) + \frac{j}{g} \cdot \left( 1 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \right)$$

$$\varphi_1 + \frac{j}{g} = \left( 1 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \right) \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right)$$

Ecuación 30. Valor de  $\varphi_1 + \frac{j}{g}$ .

Se trabaja la ecuación 29 para despejar el valor del ángulo “ $\varphi_2$ ”:

$$G_1 \cdot h_1 \cdot \left( \frac{j}{g} + \varphi_1 \right) + G_2 \cdot h_2 \cdot \frac{j}{g} + G_2 \cdot h_3 \cdot \varphi_1 + G_2 \cdot e + G_2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2 - 2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_1 = 0$$

Se introduce el valor de “ $\varphi_1 + \frac{j}{g}$ ” de la ecuación 30 y se obtiene:

$$\frac{G_1}{G_2} \cdot h_1 \cdot \left( 1 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \right) \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right) + h_2 \cdot \frac{j}{g} + h_3 \cdot \left[ \left( 1 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \right) \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right) - \frac{j}{g} \right] + e + (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2 - \frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2}{G_2} \left[ \left( 1 - \frac{G_2 \cdot (h_2 - h_3)}{2 \cdot c_2 \cdot b_2^2} \right) \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right) - \frac{j}{g} \right] = 0$$

Desarrollando la anterior expresión se obtiene:

$$\left[ \frac{c_1}{c_2} \cdot \left( \frac{b_1}{b_2} \right)^2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \left[ 1 - \frac{G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_3}{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2} \right] + h_2 + \frac{G_1}{G_2} \cdot h_1 \right] \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right) + e - \frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_2}{G_2} = 0$$

Para los siguientes desarrollos se emplea la variable auxiliar “Z”, siendo esta la siguiente expresión:

$$Z = \frac{c_1}{c_2} \cdot \left( \frac{b_1}{b_2} \right)^2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \left[ 1 - \frac{G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_3}{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2} \right] + h_2 + \frac{G_1}{G_2} \cdot h_1$$

Ecuación 31. Variable auxiliar Z.

Se introduce la variable auxiliar en el desarrollo anterior para determinar finalmente la expresión del ángulo “ $\varphi_2$ ”, teniendo en cuenta que se supondrá que las bielas se encuentran bloqueadas por lo que “ $e = 0$ ”

$$Z \cdot \left( \varphi_2 + \frac{j}{g} \right) + e - \frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_2}{G_2} = 0$$

$$\varphi_2 + \frac{j}{g} + \frac{e}{Z} - \frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2 \cdot \varphi_2}{G_2 \cdot Z} = 0$$

$$\varphi_2 \cdot \left( \frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2}{G_2 \cdot Z} - 1 \right) = \frac{e}{Z} + \frac{j}{g}$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{\frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2}{G_2 \cdot Z} - 1} \cdot \frac{j}{g}$$

Ecuación 32. Ángulo de giro cuasi-estático  $\varphi_2$ .

Una vez que se ha llegado a la expresión del ángulo de giro cuasi-estático “ $\varphi_2$ ” el cálculo del coeficiente de souplesse “s” queda de la siguiente forma:

$$s = \frac{1}{\frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2}{G_2 \cdot Z} - 1}$$

Ecuación 33. Coeficiente de souplesse.

### 6.2.8.3- Cálculo teórico del centro de balanceo.

Como se introdujo en el inicio del presente apartado, el centro de balanceo es el punto alrededor del cual la caja gira de forma que esta queda inclinada. Este punto queda definido por la altura “ $h_c$ ” como se observa en la figura 37.

Partiendo de la figura 39, se define el sistema de coordenadas de ejes “OX” y “OY” que cortan en el punto “O” de dicha figura. Si se construye la recta que pasa por el punto “ $\Omega$ ” y por el centro de gravedad de la caja, el punto de corte de esta recta con el eje “OY” será el centro de balanceo.

Se definen el punto “ $\Omega$ ” en el sistema de coordenadas “OXOY” como:

$$\Omega_x = h_3 \cdot \varphi_1 + e$$

$$\Omega_y = h_3$$

También, se define el centro de gravedad de la caja (C.D.G) como:

$$C.D.G._x = h_3 \cdot \varphi_1 + e + (h_2 - h_3) \cdot \varphi_2$$

$$C.D.G._y = h_2$$

Definidos los dos puntos la ecuación de la recta será:

$$x - y \cdot \varphi_2 + h_3 \cdot \varphi_2 - h_3 \cdot \varphi_1 - e = 0$$

Si se considera que el desplazamiento lateral “ $e$ ” vale cero se obtiene la posición relativa del centro de balanceo “ $y_c$ ” dentro del sistema de coordenadas “OXOY”:

$$y_c = h_3 \cdot \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_2}$$

Los ángulos de inclinación cuasi-estáticos de la parte suspendida del bogie y de la masa de la caja, “ $\varphi_1$ ” y “ $\varphi_2$ ” respectivamente, fueron calculados anteriormente. Si introducimos estos valores en la expresión anterior se obtiene:

$$y_c = h_3 \cdot \frac{\frac{c_1}{c_2} \cdot \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \cdot (h_2 - h_3)}{Z}$$

Cabe recordar que la variable auxiliar “Z” fue definida en la ecuación 28.

Por último para obtener la altura del centro de balanceo “ $h_c$ ” se añade la altura desde el plano de la vía hasta el punto “0”.

$$h_c = h_0 + h_3 \cdot \frac{\frac{c_1}{c_2} \cdot \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \cdot (h_2 - h_3)}{Z}$$

Ecuación 34. Altura del centro de balanceo.

#### 6.2.9- Reducciones.

Si se estudia un vehículo que está circulando por un tramo de vía en curva, se debe tener en cuenta los desplazamientos geométricos, las holguras laterales y los coeficientes de inscripción, por un lado y por otro, los desplazamientos cuasi-estáticos debidos al peralte, el coeficiente de souplesse y disimetría, para que dicho vehículo no sobrepase la posición límite. La suma de todos estos factores, dará como resultado el desplazamiento que se deberá tener en cuenta en el cálculo del gálibo de ocupación estático.

Haciendo alusión a la figura 23, donde se representa de forma esquemática los diferentes gálibos, se puede observar la cota de los desplazamientos “D”. Esta cota no es más que la suma de los salientes “S” (descritos en el apartado 6.2.10) y las reducciones “E”. Dicho de otra forma, las reducciones se obtienen al restar el valor de los salientes al desplazamiento. Las cotas de semiancho deben sufrir una reducción “ $E_i$ ” o “ $E_a$ ” en relación con el semiancho del contorno de referencia de tal forma que se debe cumplir:

$$E_i \text{ ó } E_a \geq D - S$$

Ecuación 35. Reducciones.

Se pueden distinguir dos tipos de reducciones:

- a) Reducciones internas “ $E_i$ ” como el valor de las cotas del semiancho del contorno de referencia para las secciones comprendidas entre los ejes extremos de los vehículos no montados sobre bogies o entre pivotes de los que cuentan con bogies.
- b) Reducciones externas “ $E_a$ ” como el valor de las cotas del semiancho del contorno de referencia para las secciones situadas más allá de los ejes extremos de los vehículos no montados sobre bogies o entre pivotes de los que cuentan con bogies.

### 6.2.10- Salientes.

Se puede definir el saliente como el exceso de las cotas del semiancho del gálibo de ocupación estático del material con respecto a las cotas del semiancho del contorno de referencia. En la figura 23 se representa con la letra “S” y de forma análoga a como se describió la reducción “E”, se puede calcular el saliente de la siguiente forma:

$S = D - E$
Ecuación 36. Saliente.

Con el uso de la siguiente tabla (tabla 21) se puede calcular los diferentes valores de los salientes para el ancho de Vía Internacional, según el radio de la curva y de la altura a estudiar. Dado que el objetivo de los salientes es aumentar las cotas del semiancho del contorno de referencia al circular por un tramo de vía en curva, cada saliente es un valor experimental que se produce al circular en curva. Estos factores se encuentran recogidos en la siguiente tabla (tabla 21), siendo “l” el ancho de vía, “h” la altura sobre el plano de rodadura, “R” el radio de la curva, “S<sub>i</sub>” el saliente del lado interior de la curva y “S<sub>e</sub>” el saliente del lado exterior de la curva, todo ello expresado en metros.

Radio	Elementos (excepto pantógrafos en posición de captación) situados a altura:		Pantógrafos en posición de captación.
	$h < 0,400m.$ (Partes bajas).	$h > 0,400m.$ (Partes altas).	
$R \geq 250m.$	$S_i = S_e = \frac{2,5}{R} + \frac{l - 1,435}{R}$	$S_i = S_e = \frac{3,75}{R} + \frac{l - 1,435}{R}$	$S_i = S_e = \frac{2,5}{R} + \frac{l - 1,435}{R}$
$250m. \geq R \geq 150m$	$S_i = \frac{50}{R} - 0,19 + \frac{l - 1,435}{2}$ $S_e = \frac{60}{R} - 0,23 + \frac{l - 1,435}{2}$	$S_i = \frac{50}{R} - 0,185 + \frac{l - 1,435}{2}$ $S_e = \frac{60}{R} - 0,225 + \frac{l - 1,435}{2}$	

**Tabla 21. Valores de los salientes para el ancho de vía internacional [m].**

Cabe destacar que simplemente sustituyendo el valor de “1,435” por “1,668” se obtendrán los salientes para el ancho de vía RENFE.

### 6.3- Descripción de los distintos Gálibos.

En los siguientes apartados se describirán los diferentes gálibos aplicados en el mundo ferroviario partiendo de los conceptos definidos en los apartados anteriores. La nomenclatura empleada será la misma que en el capítulo 6.2 del presente proyecto.

### 6.3.1- Gálibo de estático o de construcción del material.

Se denomina gálibo estático al perfil de un vehículo en las siguientes condiciones:

- 1- Vehículo parado.
- 2- Vehículo situado en una vía nivelada en posición centrada.
- 3- Correcto reglaje de la suspensión del vehículo.
- 4- La carga debe estar bien repartida.
- 5- Las ruedas del vehículo deben conservar su diámetro nominal.

El gálibo estático representa también las dimensiones de construcción del vehículo. Para el caso de vehículos de mercancías, se denomina gálibo de cargamento, ya que es el contorno referido a las coordenadas de la vía en el cual debe quedar incluido el contorno transversal del vehículo en posición estática sobre la vía.

Previamente, para determinar el gálibo estático es necesario conocer las medidas de construcción del vehículo. Estas medidas deben aportar las cotas del empate del vehículo o distancia entre centros de bogies, empate del bogie, es decir la distancia entre ejes de un bogie, distancia entre centro de bogie y testero, las distintas anchuras del vehículo a diferentes alturas, altura y anchura máxima del pantógrafo y la altura y anchura de las puntas del pantógrafo.

### 6.3.2- Gálibo cinemático.

Se denomina gálibo cinemático al contorno relacionado con los ejes de coordenadas normales a la vía, en el interior del cual debe permanecer en todo momento el vehículo en circulación normal. Para el cálculo de este contorno se considera las condiciones más desfavorables del vehículo en circulación mediante una combinación de estado de ruedas, movimientos laterales, desgaste de la suspensión e irregularidades de la vía.

Si se hace referencia a la figura 23, el gálibo cinemático puede obtenerse restando el término denominado saliente "S" a los desplazamientos "D", o bien, partiendo del gálibo estático y sumando el término de las reducciones "E".

En cualquier caso, la determinación del gálibo cinemático parte del conocimiento del gálibo estático. Por otro lado, se deben conocer una serie de factores previos al cálculo del gálibo estático. Factores como la velocidad máxima del vehículo, el peralte de la vía, la insuficiencia o exceso de peralte, la aceleración transversal no compensada, la situación del centro de balanceo, ángulo de disimetría y los desplazamientos producidos por la suma de juegos y desgastes, la inclinación cuasi-estática y las posibles deficiencias de la vía.



### 6.3.3- Gálbo de ocupación estático.

El gálbo de ocupación estático representa el contorno exterior de las posiciones extremas relacionadas con los ejes de coordenadas normales susceptibles de estar enfrentadas con los diferentes puntos del material. El gálbo de ocupación estático determina el contorno que debe respetar un vehículo que se encuentra circulando por un tramo de vía curvo, a una velocidad determinada y sufriendo una fuerza lateral debida a una aceleración centrífuga no compensada. La consecuencia de estas tres condiciones es el desplazamiento "D" que se puede observar en la figura 23. La cota "D" está determinada por:

- 1- Un primer término que es función del radio de la curva, de las dimensiones del vehículo y de la distancia de la sección considerada al pivote (eje) más cercano.
- 2- Un segundo término que es función del conjunto de holguras y juegos entre la vía y el carril, que provocan un desplazamiento lateral.
- 3- Un último término que es función de la flexibilidad de la suspensión y de las condiciones de circulación en curva. Este término define los desplazamientos cuasi-estáticos. El departamento de Material sólo tiene en cuenta los desplazamientos cuasi-estáticos por un exceso o insuficiencia de peralte máximo de 50 [mm] y una disimetría mayor de un 1°.

Cabe destacar que el gálbo de ocupación estático considera la vía como un elemento estático, mientras que si considera los movimientos dinámicos del vehículo.

### 6.3.4- Gálbo de ocupación cinemático.

El gálbo de ocupación cinemático determina el perfil de las posiciones extremas con respecto al contorno de referencia, en contacto con la vía, susceptibles de tener influencia sobre las partes del material móvil, teniendo en cuenta las posiciones más desfavorables de inscripción en curva, los juegos de los ejes, los juegos de la caja y además los desplazamientos laterales resultantes de la flexión de los resortes debidos a la fuerza centrífuga no compensada o al exceso o insuficiencia de peralte que dan lugar a los desplazamientos cuasi-estáticos.

### 6.3.5- Gálbo límite de obstáculos.

El gálbo límite de obstáculos delimita el contorno relacionado con los ejes de coordenadas normales a la vía en el que ningún obstáculo puede penetrar, a pesar de los desplazamientos, elásticos o no, de la vía. Se emplea para que circulen por la vía, de forma excepcional, ciertos vehículos ferroviarios especiales. Cada red aplica el gálbo límite de obstáculos según su criterio respetando el resto de gálbos.

### 6.3.6- Gálibo de obstáculos.

Este contorno delimita la posición de los diferentes equipos necesarios alrededor de la vía. Se trata de un margen de seguridad propio de cada red.

### 6.4- Medida del gálibo.

La interoperabilidad del sistema ferroviario, tanto a nivel nacional como internacional, recae en la necesidad del estudio del gálibo ferroviario. En los inicios del ferrocarril, cuando George Stephenson y un grupo de ingenieros crearon la primera línea de ferrocarril del mundo entre las ciudades de Stockton y Darlington (1825), el ancho de vía de 1435 [mm], sería el único requisito para que cualquier máquina circulara por sus vías. Pero la revolución en las comunicaciones que ocasión el ferrocarril atrajo a todo tipo de inversores que veían en el tren una oportunidad económica y cultural difícil de rechazar. Cada fabricante de máquinas optaba por unas dimensiones diferentes y la mayoría del material rodante se había construido con diferentes directrices, sin contar con que todo aquel material rodante debía poder circular por cualquier tramo de vía. El aumento del material rodante trajo la necesidad del estudio de los diferentes tramos de vía, tomando medidas precisas y exactas que aseguraran la concordancia entre vía y vehículo. El estudio del gálibo aportaría las directrices que debían cumplir vía y vehículo para una explotación ferroviaria óptima y compatible entre todos los fabricantes.

En ocasiones una carga excepcional o un nuevo vehículo debe circular por un tramo de vía. En tal situación, se debe examinar el gálibo real de ese tramo teniendo en consideración las variaciones que haya podido sufrir la vía. Estas variaciones se deben en mayor parte a los procesos de mantenimiento y renovación de la vía que pueden modificar la señalización y demás instalaciones de la vía. Tradicionalmente, el examen del gálibo se realizaba recorriendo todas las estructuras de la línea y se realizaba el contorno de la misma. Se tomaban las medias de la altura, curvatura, peralte y detalle de las esquinas y luego se dibujaba sobre la sección transversal de la carga y se obtenía un plano general del gálibo de la estructura. En la siguiente figura (figura 40) se puede observar un vehículo construido con el fin de determinar que no existiera ninguna restricción previa en el gálibo de una línea ferroviaria. El prototipo de la figura, realizaría diversos trayectos de prueba a lo largo de la línea para constatar que no existe ningún obstáculo que perturbara la explotación de la línea.

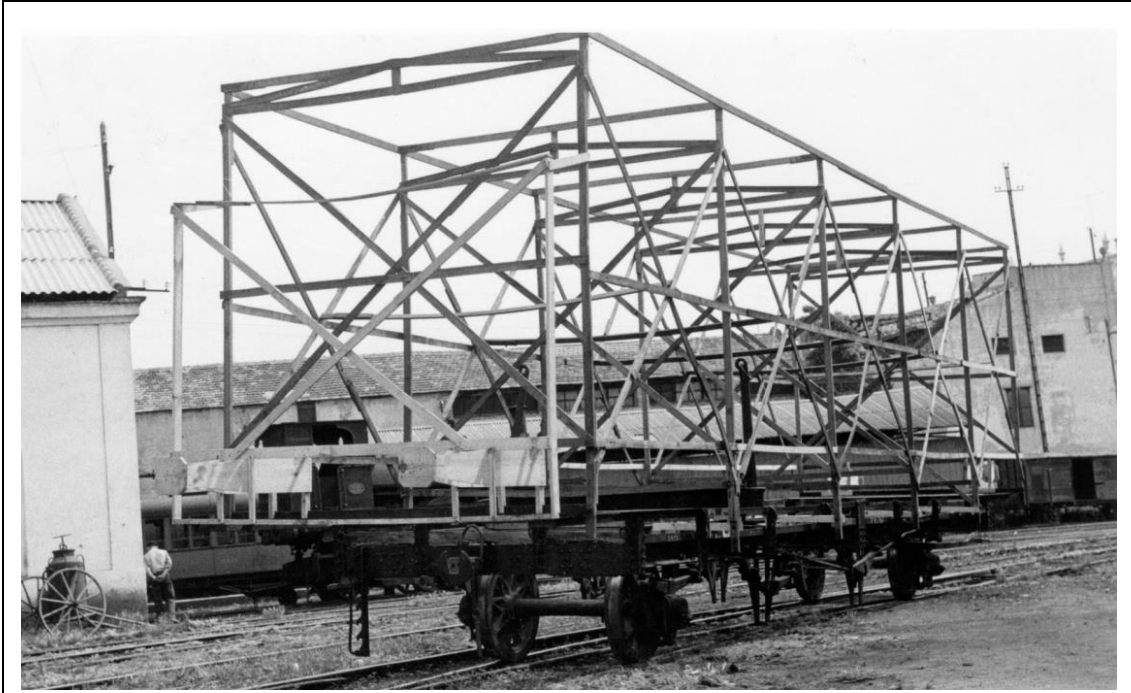


Figura 40. Vagón para comprobar los gálibos de la línea Carcaixent a Dénia. [37]

Este proceso, aunque válido en medidas detalladas y tramos individuales, está en desuso frente a los equipos de alta tecnología que son capaces, montados sobre vehículos, de recorrer una línea de vía completa obteniendo los datos necesarios. Los sistemas modernos de medida de gálibo utilizan equipos ópticos y laser para diseminar rayos de luz fuera del tren a lo largo de la línea que recorre.



Figura 41. Equipo laser de medición de gálibos.

Estas nuevas tecnologías no sólo son capaces de proyectar el gálibo de una determinada línea ferroviaria, también pueden detectar y clasificar anomalías en túneles a lo largo del tiempo, localizando posibles fisuras y deformaciones en las estructuras que afectarían tanto al gálibo como a la seguridad. Por otro lado, al obtener imágenes tridimensionales de alta resolución permite el cálculo de volúmenes, secciones, medición de distancias en cualquier dirección o el control evolutivo a lo largo del tiempo de las posibles anomalías entre otras opciones, pudiendo trabajar con los datos obtenidos tantas veces como sea necesario. La precisión de estos equipos

tiene un error aproximado de un milímetro pudiendo recorrer la línea a una velocidad aproximada de 5 [km/h] dependiendo de la precisión requerida.

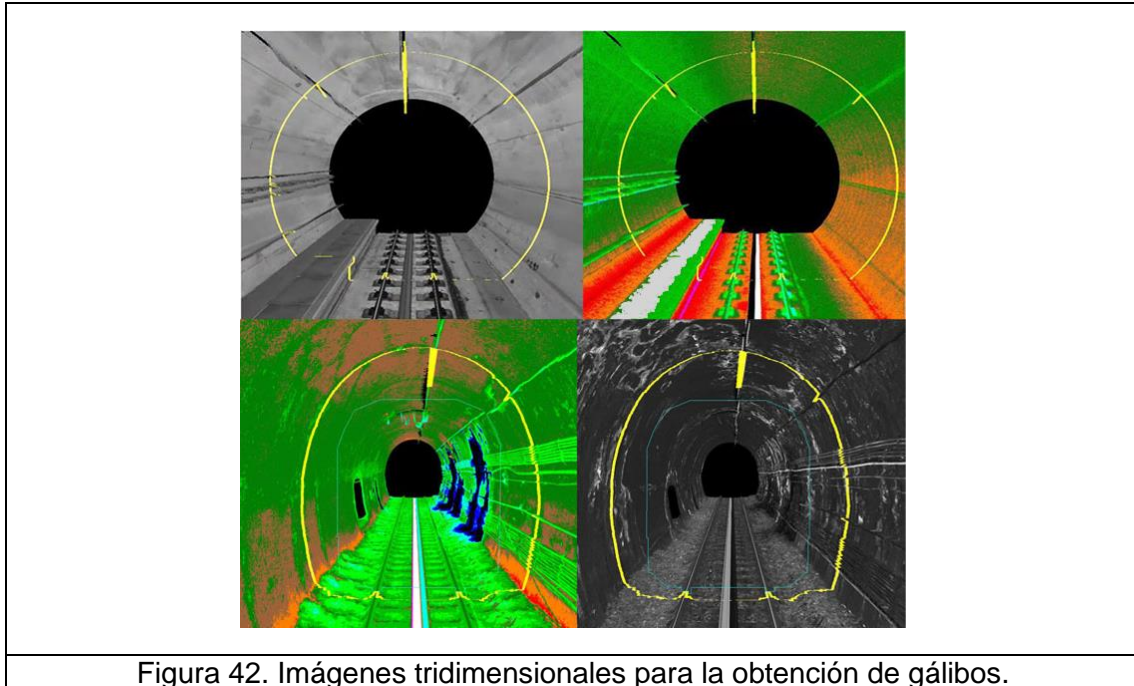


Figura 42. Imágenes tridimensionales para la obtención de gálbos.

La combinación de estos sistemas con la recreación a escala de tramos ferroviarios aporta la posibilidad de corregir y mejorar aspectos del gálibo que aumenten la capacidad de explotación de la vía.

#### 6.5- Conclusiones.

El cálculo del gálibo ferroviario parte de un vehículo definido por sus dimensiones geométricas, características de la suspensión y desgastes del perfil de rodadura, que circula por un trazado definido por su radio de curvatura, sobre-ancho de la vía y errores máximos permitidos de alineación y nivelación a una velocidad determinada y con una aceleración centrífuga no compensada. El desplazamiento de cualquier punto del vehículo en una sección dada vendrá determinada por tres términos:

- Un primer término que es función del radio de la curva, de las dimensiones del vehículo y de la sección considerada del pivote (eje) más próximo.
- Un segundo término que es función del conjunto de holguras y juegos entre vía y el punto considerado ( $q$ ,  $w$ , ancho de vía e inscripción en la vía) que determina unos desplazamientos transversales.
- Un tercer término que es función de la flexibilidad al balanceo de la suspensión y de las condiciones de circulación en curva.

Estos tres términos definen el concepto de desplazamiento “D” y con estos tres términos se define la posición límite del vehículo o el “Gálibo de Ocupación Estático”.

Los salientes “S” son la ampliación del contorno de referencia, está regulado por la UIC y este término lo absorbe como competencia suya el Departamento de Obras. Si a los desplazamientos “D” se resta los salientes “S” se obtienen las reducciones “E<sub>i</sub>” o “E<sub>a</sub>”. A partir de las reducciones se puede calcular el “Gálibo Cinemático” del vehículo. Si al “Gálibo de Ocupación Estático” se resta los desplazamientos “D” se obtiene el “Gálibo estático o de construcción de material” siendo este último el contorno de referencia que interesa al Departamento de Material porque permite definir las características de un vehículo dentro de una red ferroviaria.

El “Gálibo de Ocupación Estático” considera los movimientos del vehículo, pero no los posibles movimientos de la vía o defectos e imperfecciones de la misma. Es decir, considera términos dinámicos, pero que se definen sobre conceptos estáticos frente a la vía. Como lo cierto es que la vía puede tener defectos, el vehículo podrá tener una serie de desplazamientos adicionales, tales como:

- Desplazamientos transversales debidos a errores de colocación de la vía, desplazamientos de la vía sobre el balasto y modificaciones de la vía geométrica del balasto.
- Efectos dinámicos debidos a defectos en la superficie del carril, de nivelación de la vía o a errores de peraltado.

Estos términos definen el desplazamiento de la vía, que no son efectos aleatorios y que pueden tener un valor considerable en las condiciones normales de circulación. El desplazamiento de la vía, sumado a los desplazamientos “D”, permite obtener el “Gálibo de Ocupación Cinemático”. Este gálibo considera términos cinemáticos del vehículo y de la vía, es decir movimientos debidos al vehículo y a la vía.

Una vez definido el “Gálibo de Ocupación Cinemático”, cada red permite un margen para definir el “Gálibo Límite de Obstáculos”. Este contorno permite considerar la circulación excepcional de ciertos vehículos en condiciones especiales.

Finalmente, mediante un margen de seguridad propio de cada red, se obtiene el “Gálibo de Obstáculos” que define la posición de los distintos equipos necesarios alrededor de la vía.

A continuación se muestran una serie de figuras como ejemplos de gálibos de RENFE, en el que las cotas están en metros.

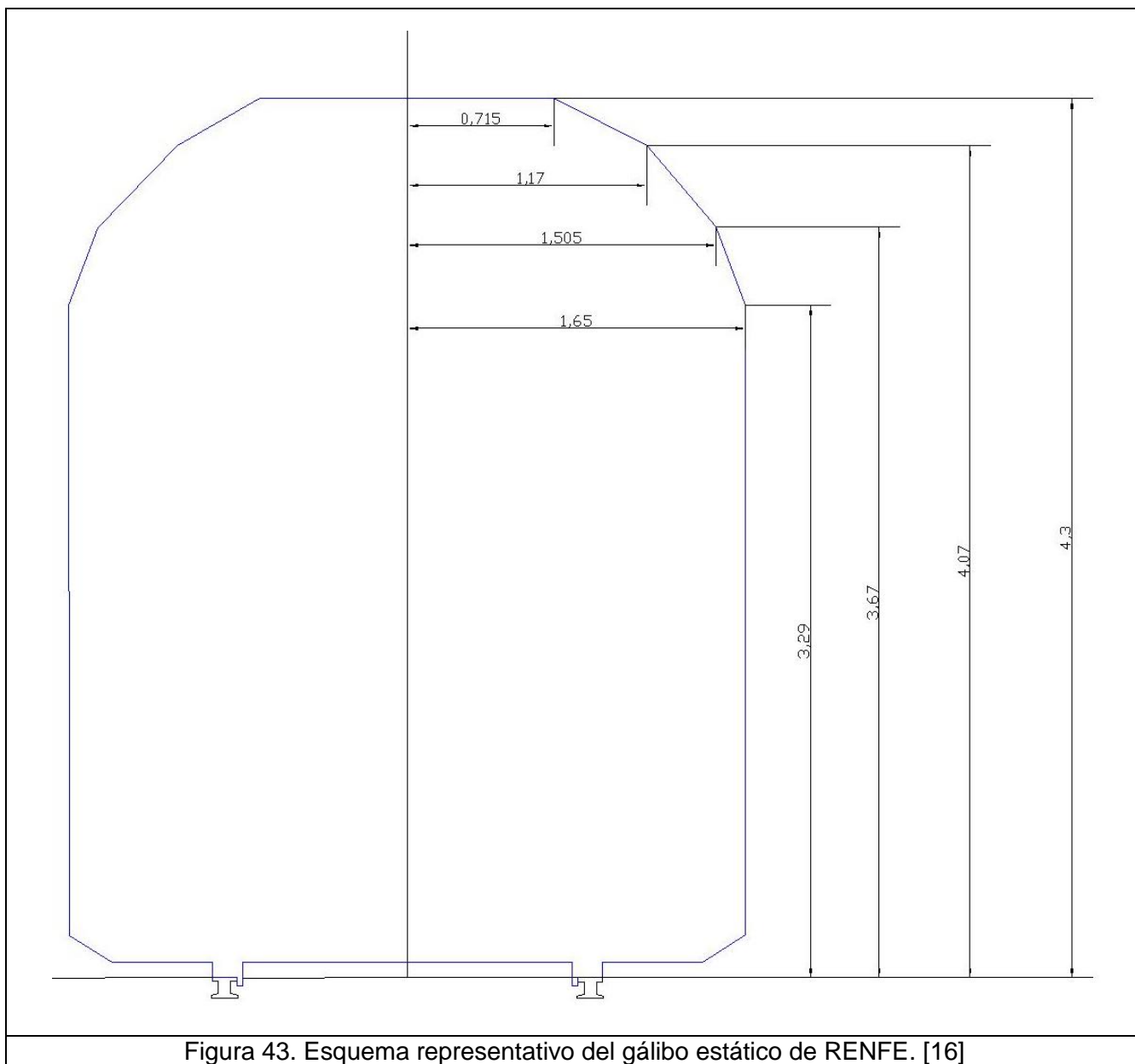
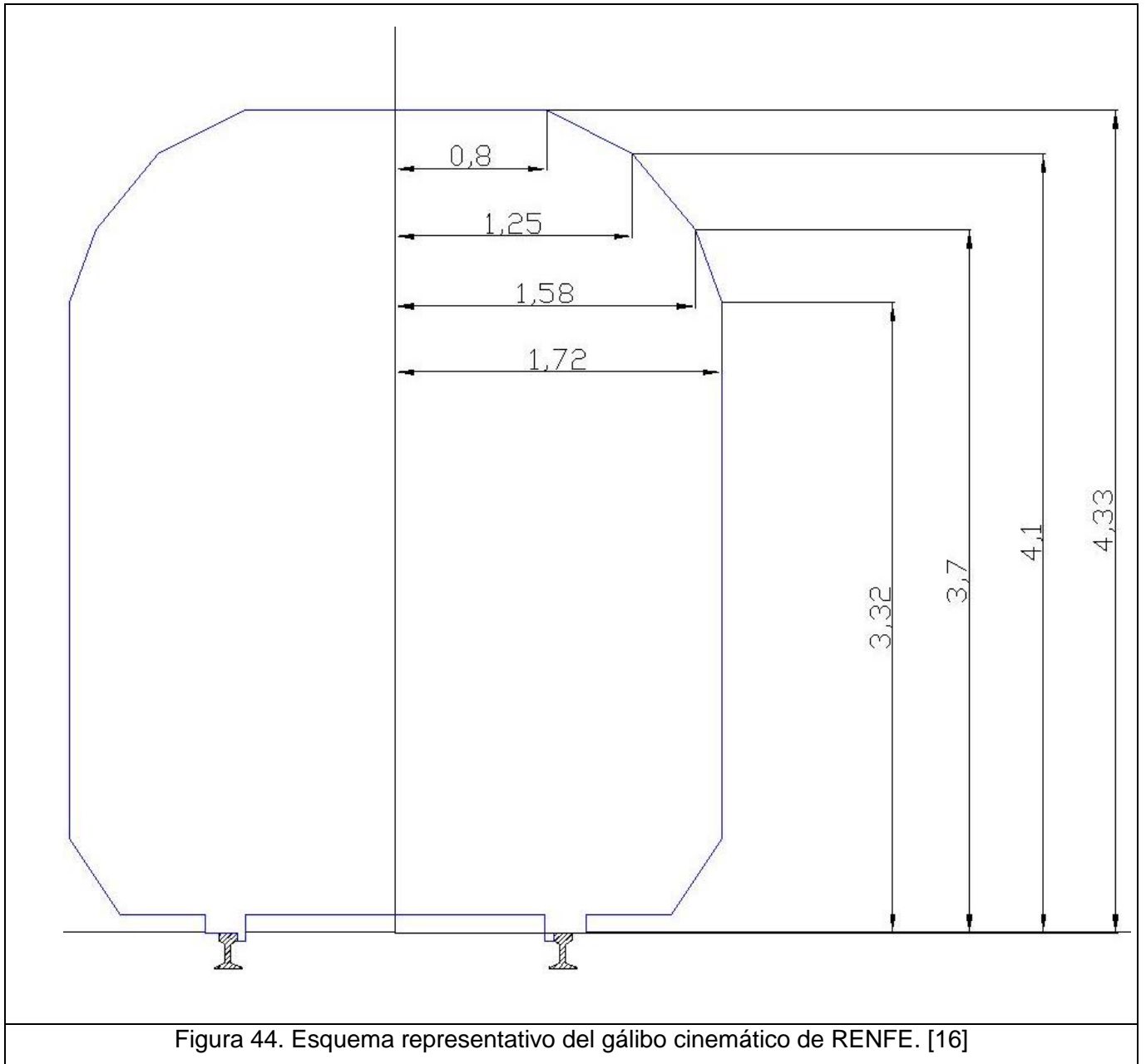


Figura 43. Esquema representativo del gálibo estático de RENFE. [16]



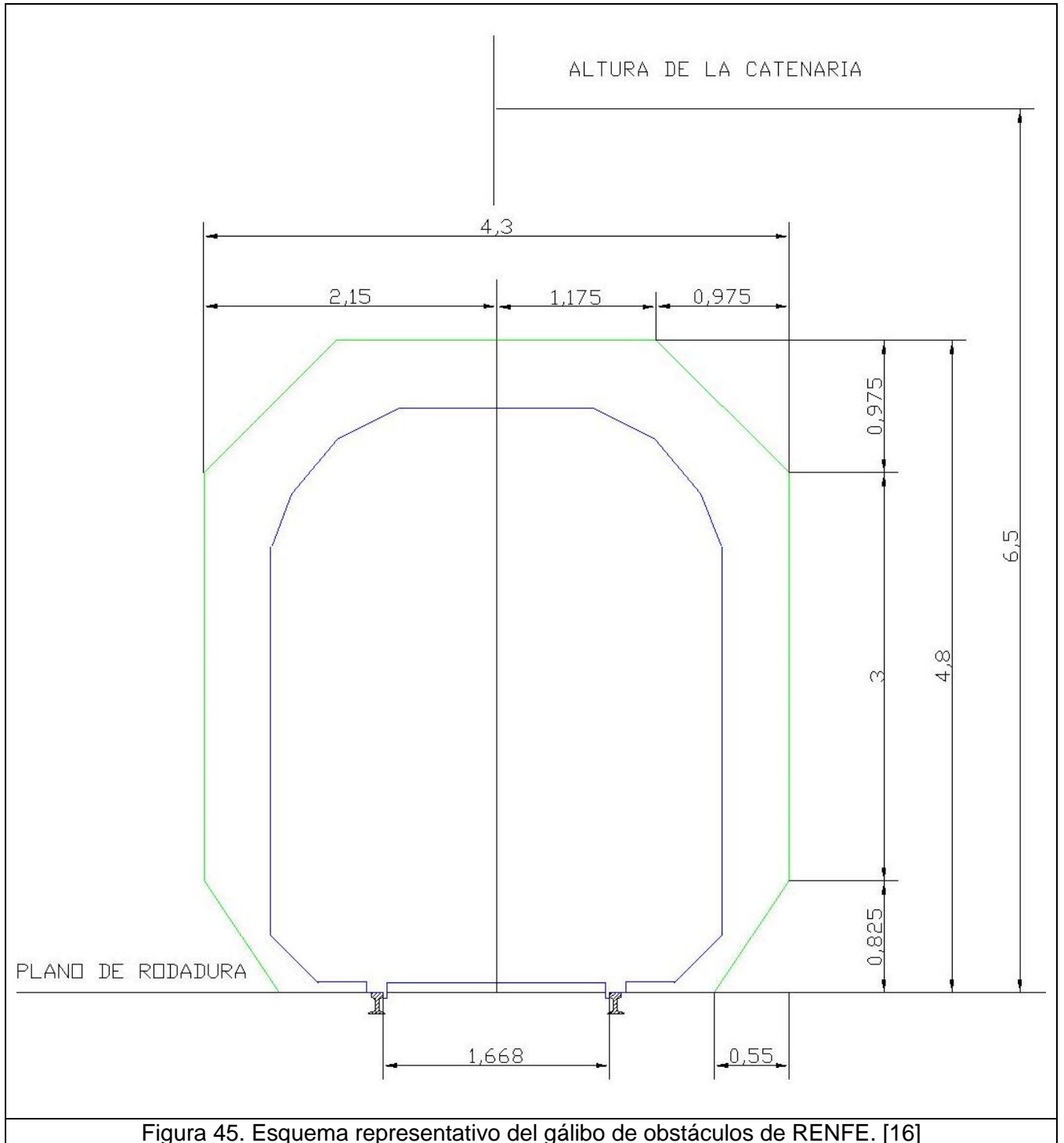


Figura 45. Esquema representativo del gálibo de obstáculos de RENFE. [16]



## **Capítulo VII: Modelo Matemático de un TRD.**

- **Introducción.**
  
- **Modelo del TRD.**

## **Capítulo VII: Modelo matemático de un TRD.**

### 7.1- Introducción.

Durante este capítulo se presentan las características técnicas del vehículo ferroviario escogido para realizar los cálculos en los siguientes capítulos. Se estudiará un Tren Regional Diesel (a partir de ahora TRD) que circula sobre vías convencionales de ancho nacional (figura 46). Dada la dificultad para obtener datos técnicos de más vehículos ferroviarios, el proyecto se centrará en este modelo.



Los cálculos que se realizarán en los siguientes capítulos necesitan de datos lo más cercanos a la realidad posible. Para ello se utiliza un modelo de vehículo ferroviario que considera el mayor número de grados de libertad posibles. Por otro lado, es necesario que el vehículo esté formado por ejes calados, cajas de vehículo y estructuras intermedias flexibles, estando conectadas entre sí por componentes tales como muelles y amortiguadores. De manera similar, debe considerarse que circula por una vía, la cual tiene una estructura compleja que presenta propiedades elásticas y disipativas. La vía puede ser modelada como una estructura continua con una interfase móvil en los puntos de contacto donde la interacción entre rueda y carril es dependiente del movimiento relativo. En el presente proyecto se tratará a la vía como un elemento estático y se considerará que las ruedas no se desplazan verticalmente respecto a la vía, es decir, el contacto entre rueda y carril es constante. No obstante, se pone en conocimiento, para futuros trabajos, que la relación entre los movimientos de la rueda contenidos en el plano de contacto rueda-carril y las fuerzas que originan, es uno de los problemas más importantes y menos conocidos en la dinámica ferroviaria. El contacto rueda-carril es un fenómeno físico complejo y no lineal. El comportamiento dinámico de un vehículo ferroviario está significativamente afectado

por estas fuerzas de interacción entre la rueda y el carril, las cuales dependen de la adhesión, el deslizamiento y el desgaste característico.

## 7.2- Modelo del TRD.

En los próximos capítulos se detallan las características del material rodante que servirá como modelo. El TRD es un vehículo ferroviario que consta de una estructura y un chasis equipado con los siguientes equipos: órganos de rodadura, caja de grasa, suspensión órganos de tracción y choque, caja, frenos y accesorios. Estos equipos hacen del TRD un modelo óptimo para los cálculos siguientes. A continuación se describen brevemente cada equipo.

### 7.2.1- Caja.

Se denomina caja al conjunto cerrado de los equipos necesarios para el funcionamiento del vehículo. La caja porta tanto la carga como a los pasajeros y se apoya sobre los ejes o bogies por medio de la suspensión.

### 7.2.2- Bogies.

En la siguiente figura (figura 47) se puede observar el esquema de un bogie. Normalmente está formado por dos ejes montados sobre un bastidor que se une a la caja del vehículo mediante el pivote. El bogie consta de suspensión propia (suspensión secundaria) y también existe una suspensión colocada entre el bogie y el bastidor llamada suspensión primaria. En el modelo TRD dos bogies soportan el peso de cada vagón y cada uno de ellos consta de un par de ejes calados.

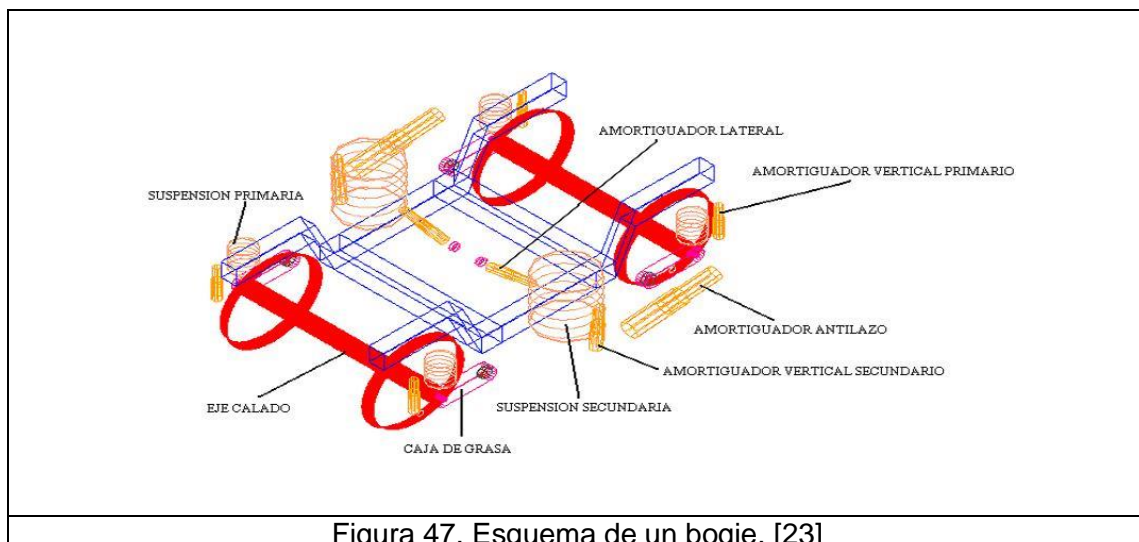


Figura 47. Esquema de un bogie. [23]

### 7.2.3- Caja de grasa.

La caja de grasas se encuentra entre el eje de las ruedas y el bastidor. Su principal objetivo es lubricar las partes metálicas disminuyendo el rozamiento y el calentamiento del eje. Además permite transmitir los esfuerzos de frenado desde los ejes a la masa del vehículo haciendo de elemento conexión entre los ejes y el bogie, facilitando así la rodadura de los ejes.

### 7.2.4- Eje calado.

El eje calado es el elemento que determinará el contorno exterior máximo de un vehículo ferroviario. Su estudio y configuración afectan al gálibo de material y por ello requiere un exhaustivo análisis. La siguiente imagen (figura 48) representa un eje calado que consiste en dos ruedas fijas unidas por un eje común. Esto implica que ambas ruedas giren a la misma velocidad y que mantengan una distancia entre ellas constante en todos sus puntos. Las bandas de rodadura son puramente cónicas y su desgaste se produce rápidamente durante el servicio. El perfil de la rueda determina el guiado de los vehículos y por tanto su situación espacial en cada punto del trazado de la línea ferroviaria, detalle que influye notablemente en el cálculo del gálibo ferroviario.

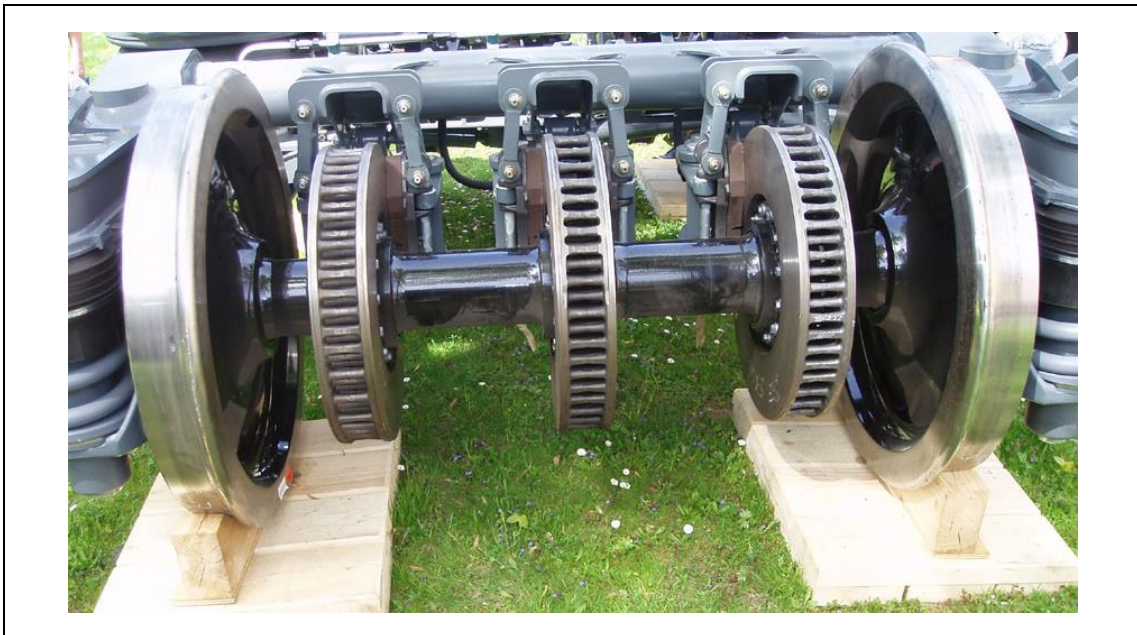
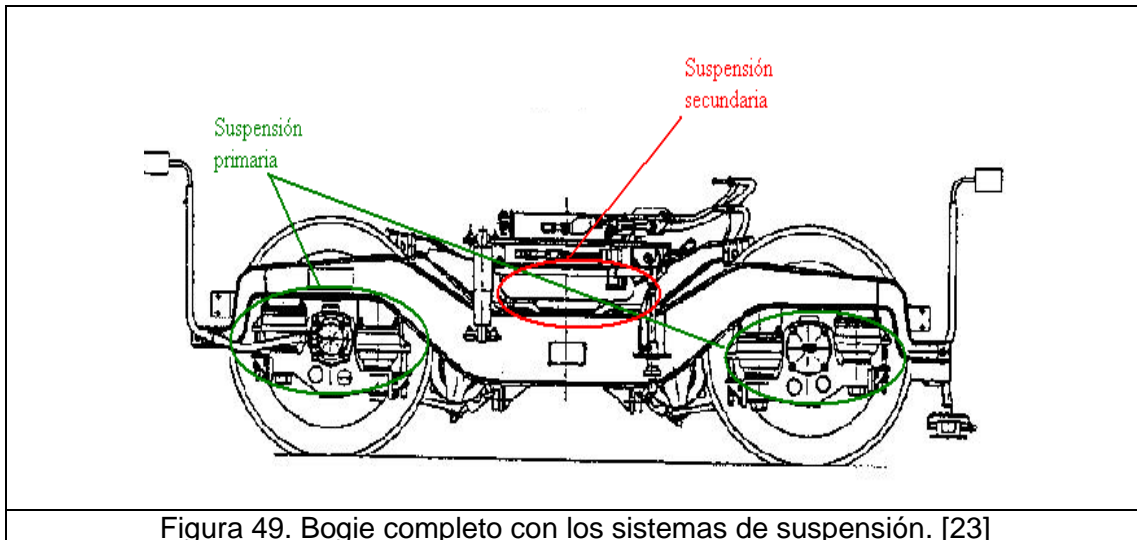


Figura 48. Eje de ruedas caladas. [38]

### 7.2.5- Suspensión primaria.

Se puede localizar la suspensión primaria entre los ejes y el bastidor del bogie. En la siguiente figura (figura 49) se pueden localizar tanto la suspensión primaria como la secundaria en el conjunto del bogie. La suspensión primaria tiene como objetivo mitigar las pequeñas vibraciones producidas por los defectos de la vía y que afectan a las ruedas. De esta forma, los demás sistemas están libres de estas vibraciones.



Por otro lado, la suspensión primaria garantiza el correcto reparto de pesos entre las ruedas.

La suspensión primaria en vehículos convencionales consta de un muelle helicoidal y un amortiguador por cada extremo de eje. El muelle proporciona libertad de movimiento con cierta rigidez entre sus extremos, mientras que el amortiguador aplaca los movimientos producidos, oponiéndose al cambio de estado, lo cual se traduce en una liberación de la energía generada en el movimiento, convirtiéndola en calor. El conjunto muelle amortiguador esta guiado longitudinalmente y transversalmente por dos bielias.

En la siguiente tabla (tabla 22) se muestran los valores de los elementos de la suspensión primaria de un TRD.

Elemento	Valor
<b>Rigidez longitudinal por caja de grasa, <math>c_{x1}</math></b>	$35 \cdot 10^6 [N/m]$
<b>Rigidez transversal por caja de grasa, <math>c_{y1}</math></b>	$7.5 \cdot 10^6 [N/m]$
<b>Rigidez vertical por caja de grasa, <math>c_{z1}</math></b>	$4.75 \cdot 10^6 [N/m]$
<b>Amortiguamiento longitudinal, <math>K_{x1}</math></b>	$10315.37 [N/(m/s)]$
<b>Amortiguamiento transversal, <math>K_{y1}</math></b>	$159169.72 [N/(m/s)]$
<b>Amortiguamiento vertical, <math>K_{z1}</math></b>	$14878.32 [N/(m/s)]$
<b>Tabla 22. Valores de la suspensión primaria de un TRD.</b>	

### 7.2.6- Suspensión secundaria.

La suspensión secundaria es el sistema encargado de filtrar los movimientos del bogie respecto a la caja del vagón. Como se observa en la figura 49, la suspensión secundaria se encuentra entre el bogie y la caja del vagón.

Se pueden distinguir dos tipos de suspensión secundaria dependiendo del elemento de rigidez. Por un lado están las suspensiones compuestas por un muelle helicoidal común y por otro las suspensiones con un neumático en forma de toroide. El modelo TRD consta de la configuración de resortes helicoidales y los valores de los elementos que la componen se muestran en la siguiente tabla (tabla 23). Por razones de seguridad RENFE no permite la publicación de todos los datos del vehículo, no obstante los siguientes datos cuentan con el permiso de RENFE para su publicación y utilización en investigaciones ajenas a RENFE.

Elemento	Valor
<b>Rigidez longitudinal por grupo, <math>c_{x2}</math></b>	73904.78 [N/m]
<b>Rigidez transversal por grupo, <math>c_{y2}</math></b>	$2.53 \cdot 10^5$ [N/m]
<b>Rigidez vertical por grupo, <math>c_{z2}</math></b>	$5.34 \cdot 10^5$ [N/m]
Datos de los resortes de emergencia de la secundaria neumática	
<b>Rigidez resorte de emergencia</b>	$3020.403 + 22.34 \cdot Q_{z2}$ [N/m]
Datos de la barra de torsión (1 por bogie)	
<b>Rigidez, <math>K_{BT}</math></b>	$5 \cdot 10^6$ [N · m/rad]
Datos del arrastre ( 1 resorte a cada lado del bogie)	
<b>Rigidez arrastre, <math>K_{AR}</math></b>	$21 \cdot 10^5$ [N/m]
Datos de los amortiguadores transversales (2 por bogie)	
<b>Amortiguador transversal, <math>K_{t2}</math></b>	$30 \cdot 10^3$ [N/(m/s)]
Datos amortiguadores verticales (2 por bogie)	
<b>Amortiguamiento vertical, <math>K_{V2}</math></b>	$20 \cdot 10^3$ [N/(m/s)]
<b>Tabla 23. Valores de la suspensión secundaria de un TRD.</b>	

7.2.7- Parámetros del TRD.

A continuación se exponen mediante la siguiente tabla (tabla 24) los parámetros necesarios para realizar los cálculos del gálibo.

Parámetro.	Valor.
<b>Empate del vehículo.</b>	17.33[m]
<b>Distancia al pivote más próximo, sección interior.</b>	8.665[m]
<b>Distancia al pivote más próximo, sección exterior.</b>	2.835[m]
<b>Empate del bogie.</b>	2.7[m]
<b>Peso de la etapa primaria.</b>	539511[N]
<b>Peso de la etapa secundaria.</b>	490461[N]
<b>Altura del C.D.G. de la masa del bastidor del bogie y la caja respecto a los ejes de las ruedas.</b>	1.18[m]
<b>Altura del C.D.G. de la caja respecto a los ejes de las ruedas.</b>	1.35[m]
<b>Distancia de la base de los resortes de la suspensión primaria al eje de la caja.</b>	1[m]
<b>Distancia de la base de los resortes de la suspensión secundaria al eje de las traviesas móviles.</b>	1[m]

**Tabla 24. Parámetros del TRD.**

## **Capítulo VIII: Cálculo del Gálibo según la NEM.**

- **Introducción.**
- **Gálibo según la Normativa NEM a escala H0 (1:87).**
- **Gálibo según la Normativa NEM a escala I (1:32).**
- **Gálibo según la Normativa NEM a escala X (1:5,5).**



# **Capítulo VIII: Cálculo del Gálibo según la NEM.**

## 8.1- Introducción.

En este capítulo se muestran las directrices necesarias para obtener los gálibos según la normativa NEM descrita en el capítulo cinco del presente proyecto. La NEM sólo precisa aspectos geométricos del vehículo para obtener los distintos contornos, por ello los datos iniciales se resumen en tres:

- 1- Escala.
- 2- Longitud de la caja o distancia entre pivotes de bogie.
- 3- Radio de curvatura de la vía.

La normativa NEM contempla tres tipos de contornos:

- 1- Gálibo de libre circulación en vía recta.
- 2- Gálibo de libre circulación en vía curva.
- 3- Gálibo del material móvil.

En los siguientes capítulos se calculará cada gálibo para tres escalas diferentes, H0 (1:87), I (1:32) y X (1:5,5) con el fin de compararlos con los gálibos según la UIC.

A partir del modelo matemático TRD, descrito en el capítulo anterior se van utilizar los siguientes datos:

- Radio de curvatura del tramo de vía  $R = 250 [m]$ .
- Ancho de Vía Nacional (1668 [mm]).
- Empate del TRD 17,33 [m].

## 8.2- Gálibos según la Normativa NEM a escala H0 (1:87).

Según la figura 5 del presente proyecto, la normativa NEM contempla en el rango de anchos de vía prototipos de 1250 [mm] a 1700 [mm] una escala de reducción H0 1:87. Por tanto se obtiene una cota del ancho de vía para un ancho de vía Nacional de:

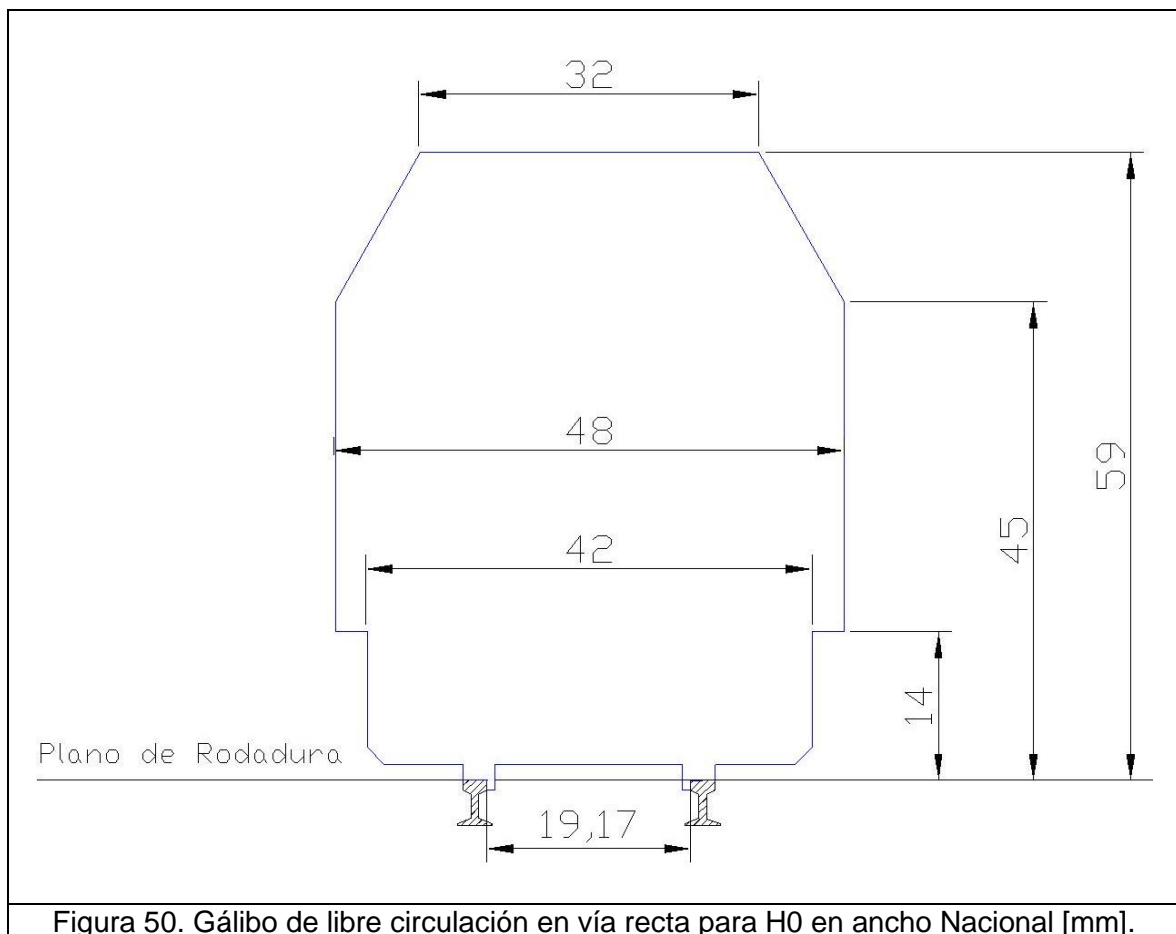
$$G_{H0} = \frac{1668}{87} = \boxed{19.172 [mm]}$$

A partir del ancho de vía escalado se obtiene la siguiente tabla (tabla 25) de cotas para el gálibo de libre circulación en vía recta.

Cotas Horizontales	Cotas Verticales	Catenaria
$G_{H0} = 19.17$	$H_1 = 11$	$B_4 = 38$
$B_1 = 48$	$H_2 = 14$	$B_5 = 30$
$B_2 = 32$	$H_3 = 45$	$H_5 = 65$
$B_3 = 42$	$H_4 = 59$	

**Tabla 25. Cotas para el gálibo de vía recta. Escala H0. Ancho Nacional [mm].**

Confeccionada la tabla se obtiene el gálibo de libre circulación en vía recta en escala H0 para un ancho de vía Nacional.



Para calcular el Gálibo de libre circulación en curva, según la normativa NEM se debe clasificar el vehículo ferroviario dentro de un grupo. El TRD pertenece al grupo c para cajas menores de 27,2 [m] y distancias entre pivotes de bogie menores a 19,5 [m]. Por otro lado, se escala el radio de la curva y se obtiene:

$$R_{H0} = \frac{250000}{87} = \boxed{2873.56 [mm]}$$

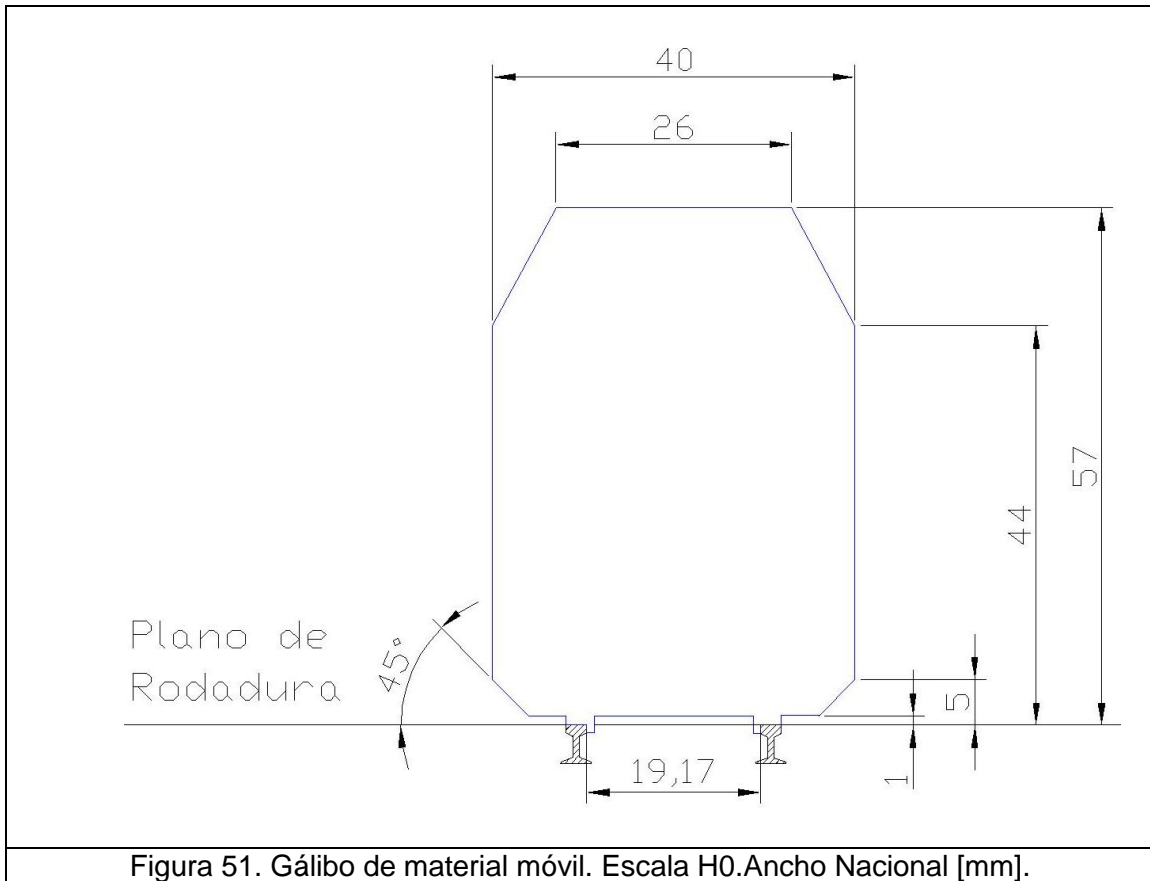
Para un radio  $R_{H0} = 2872.56 [mm]$  la normativa NEM en la tabla 3 del presente proyecto contempla un sobredimensionado:

$$E_{H0} = 0 [mm]$$

Por tanto el gálibo de libre circulación en curva coincide con el gálibo de libre circulación en vía recta calculado anteriormente.

El gálibo de material móvil es el que permite a la normativa NEM reproducir vehículos a escala cumpliendo con las exigencias del resto de gálibos. Al igual que el gálibo de vía recta, el de material móvil depende de la escala. La tabla que otorga las cotas de gálibo es la tabla 17 del presente proyecto. Teniendo esto en cuenta se obtiene la siguiente tabla y su correspondiente figura.

Cotas horizontales	Cotas verticales
<b><math>G_{H0} = 19,17</math></b>	$H_1 = 2$
<b><math>B_1 = 40</math></b>	$H_2 = 5$
<b><math>B_2 = 26</math></b>	$H_3 = 44$
	$H_4 = 57$
<b>Tabla 26. Cotas del gálibo de material móvil. Escala H0. Ancho Nacional [mm].</b>	



8.3- Gálidos según la Normativa NEM a escala I (1:32).

La línea de cálculos para los gálidos según la NEM para la escala I (1:32) es la misma que en el caso anterior.

Se calcula el ancho de vía escalado a 1:32:

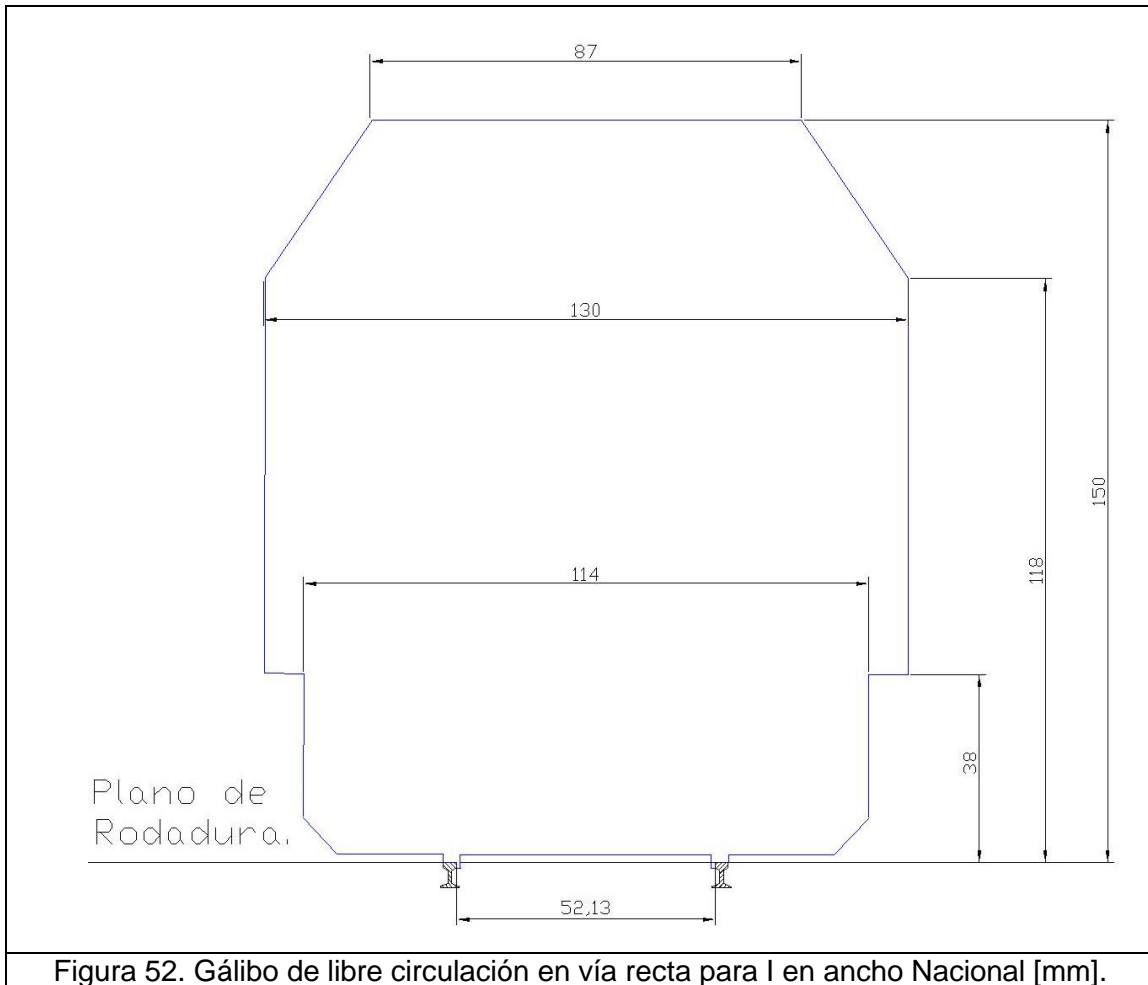
$$G_I = \frac{1668}{32} = \boxed{52.125 \text{ [mm]}}$$

Se obtiene la siguiente tabla (tabla 27).

Cotas Horizontales	Cotas Verticales	Catenaria
<b>G<sub>H0</sub> = 52.125</b>	H <sub>1</sub> = 30	B <sub>4</sub> = 93
<b>B<sub>1</sub> = 130</b>	H <sub>2</sub> = 38	B <sub>5</sub> = 71
<b>B<sub>2</sub> = 87</b>	H <sub>3</sub> = 118	H <sub>5</sub> = 165
<b>B<sub>3</sub> = 114</b>	H <sub>4</sub> = 150	

**Tabla 27. Cotas para el gálibo de vía recta. Escala I. Ancho Nacional [mm].**

Según la tabla anterior se obtiene la siguiente figura (figura 52):



A continuación se calcula el gálibo de libre circulación en curva.

El modelo de vehículo ferroviario TRD pertenece al grupo c y se obtiene el siguiente radio escalado a 1:32:

$$R_l = \frac{250000}{32} = \boxed{7812.50 \text{ [mm]}}$$

Para este radio de curvatura, la normativa NEM. recomienda un sobredimensionado de:

$$E_l = \boxed{0 \text{ [mm]}}$$

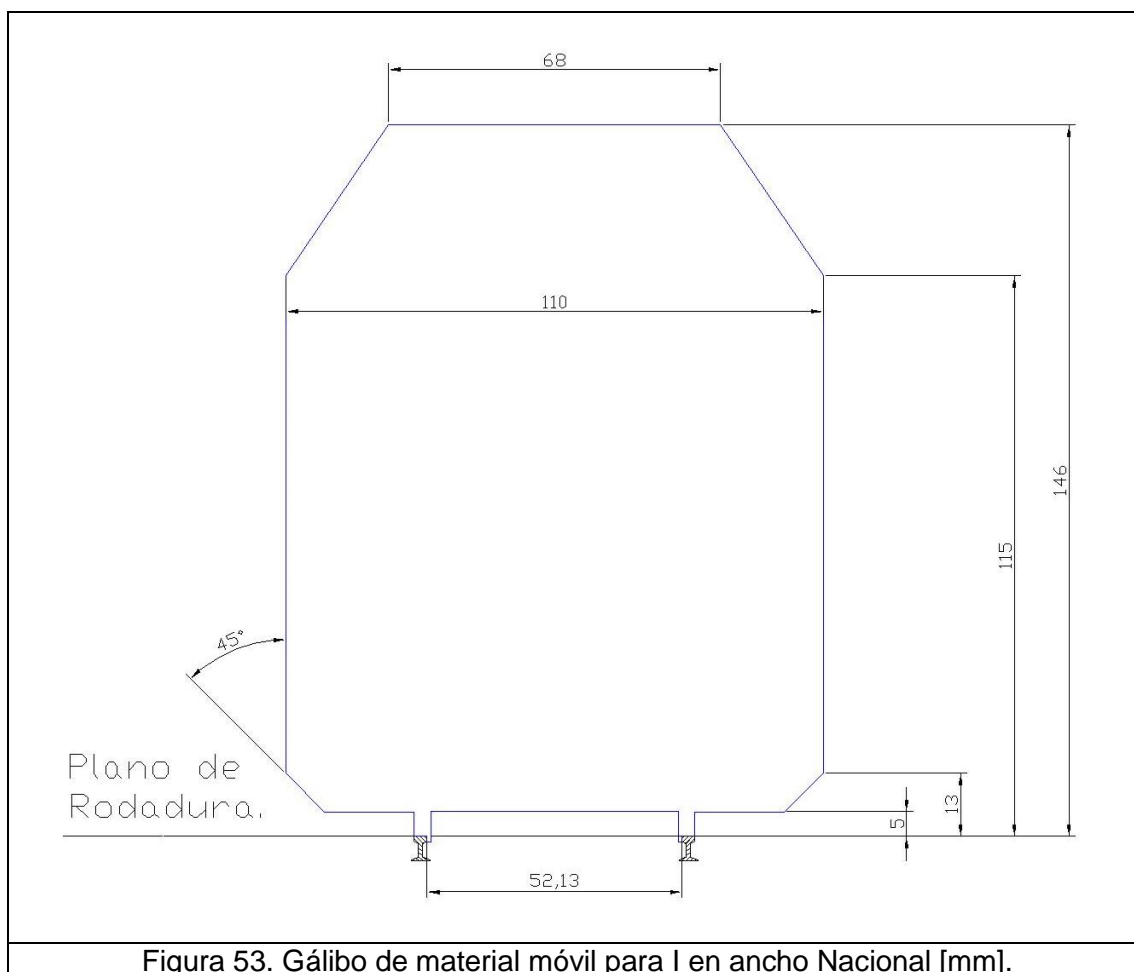
Por tanto en este caso también coincide el gálibo de libre circulación en curva con el gálibo de libre circulación en vía recta.

Por último se calcula el gálibo de material móvil para la escala I en ancho nacional. Para ello se construye la siguiente tabla (tabla 28) de valores:

Cotas horizontales	Cotas verticales
$G_1 = 52.125$	$H_1 = 5$
$B_1 = 110$	$H_2 = 13$
$B_2 = 68$	$H_3 = 115$
	$H_4 = 146$

**Tabla 28. Cotas del gálibo de material móvil. Escala I. Ancho Nacional [mm].**

Con esta tabla se obtiene la siguiente figura (figura 53) que representa el gálibo de material móvil para la escala I en un ancho de vía Nacional.



#### 8.4- Gálidos según la Normativa NEM a escala X (1:5,5).

Por último se obtendrán los gálidos según la normativa NEM. en escala X (1:5,5) para el modelo matemático escogido, el TRD.

La normativa NEM. no presenta las tablas necesarias para calcular los gálidos a escala X. Por ello se completará la norma siguiendo sus principios con la siguiente tabla (tabla 29).

Escala	G	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	H <sub>5</sub>
X (1:5,5)	260.9	756.4	506.9	663.3	174.5	221.1	686.5	872.7	541.1	413.1	960
<b>Tabla 29. Cotas para el gálibo para vía recta en escala X (1:5,5) [mm].</b>											

A partir de la anterior tabla se obtiene los siguientes resultados:

$$G_x = \frac{1668}{5.5} = \boxed{303.27 [mm]}$$

Cotas Horizontales	Cotas Verticales	Catenaria
<b>G<sub>x</sub> = 303.27</b>	H <sub>1</sub> = 174.5	B <sub>4</sub> = 541.1
<b>B<sub>1</sub> = 756.4</b>	H <sub>2</sub> = 221.1	B <sub>5</sub> = 413.1
<b>B<sub>2</sub> = 506.9</b>	H <sub>3</sub> = 686.5	H <sub>5</sub> = 960
<b>B<sub>3</sub> = 663.3</b>	H <sub>4</sub> = 872.7	
<b>Tabla 30. Cotas para el gálibo de vía recta. Escala X. Ancho Nacional [mm].</b>		

En la siguiente figura (figura 54) se observa el gálibo en vía recta para una escala 5:5,5 en ancho de vía Nacional.

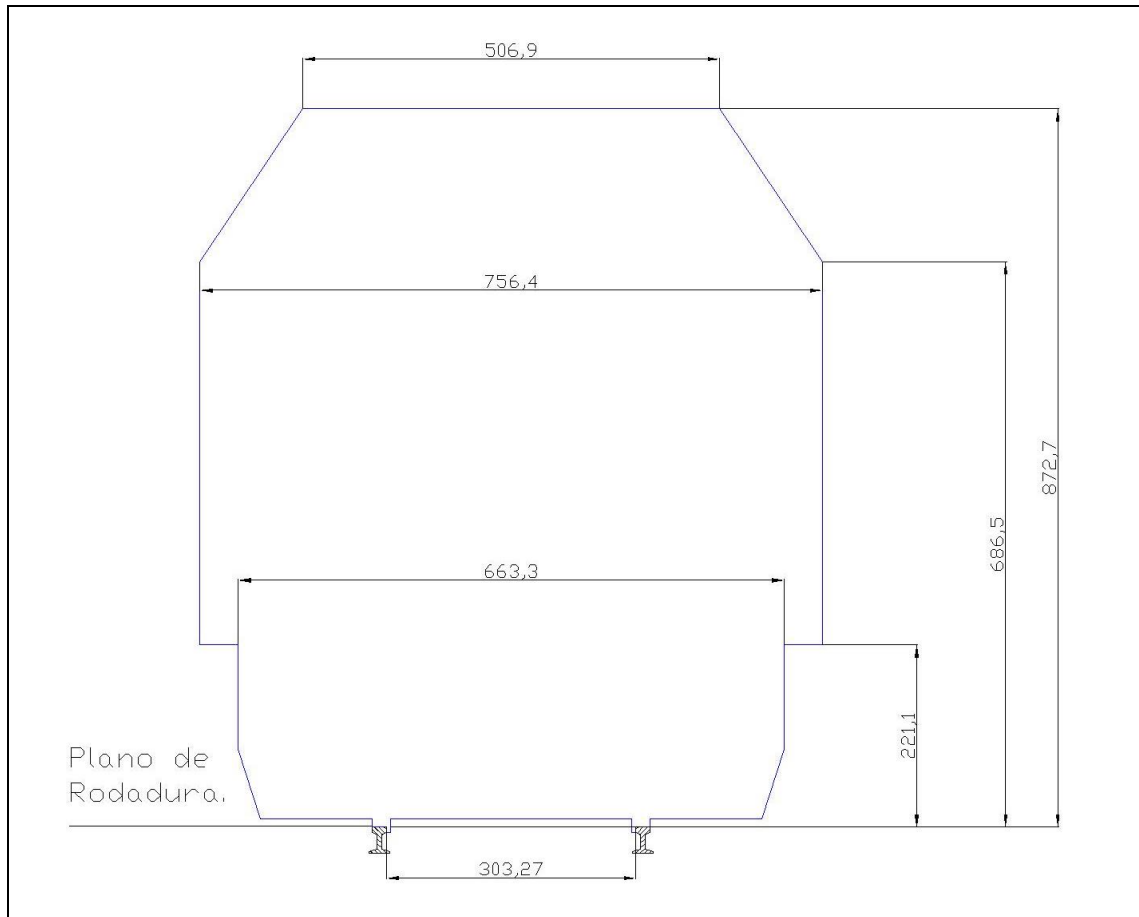


Figura 54. Gálibo de libre circulación en vía recta para X en ancho Nacional [mm].

A continuación se obtiene el radio de la curva a escala X (1:5,5) para obtener el sobredimensionado según la normativa NEM.

$$R_x = \frac{250000}{5.5} = \boxed{45454.5[mm]}$$

Para este radio y considerando que el modelo matemático TRD pertenece al grupo "c", la normativa NEM. considera el siguiente sobredimensionado:

$$E_x = \boxed{0[mm]}$$

Por tanto, el gálibo de libre circulación en vía recta coincide con el de vía curva.

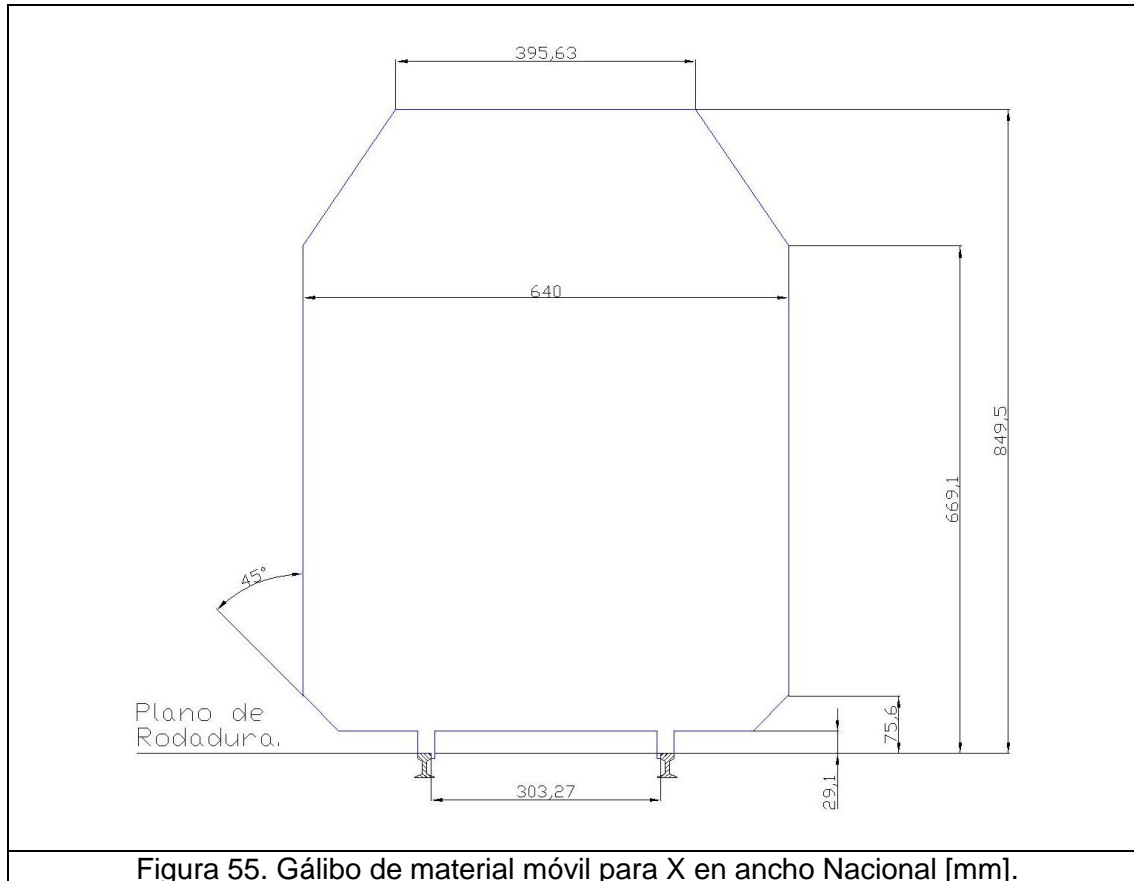
Por último se completará la normativa NEM. con la tabla de valores para el gálibo de material móvil para la escala X (1:5,5). A partir de ella se obtiene la siguiente figura (figura 55).



Cotas horizontales	Cotas verticales
$G_1 = 303.27$	$H_1 = 29.1$
$B_1 = 640$	$H_2 = 75.6$
$B_2 = 395.63$	$H_3 = 669.1$
	$H_4 = 849.5$

**Tabla 31. Cotas del gálibo de material móvil. Escala X. Ancho Nacional [mm].**

En la siguiente figura (figura 55) se observa el gálibo de material móvil en escala X (1:5,5) para ancho de vía Nacional.



Una vez hallados los gálibos según la normativa NEM. para un TRD, en el próximo capítulo se calculará el gálibo estático de este vehículo ferroviario según las normas de la UIC. De este modo se podrá comprobar si el gálibo estático, según la UIC, se puede albergar dentro de los gálibos de referencia de la normativa NEM. y obtener las reducciones que aplica la normativa NEM para un mismo vehículo ferroviario.

## **Capítulo IX: Cálculo del gálibo estático según la UIC.**

- **Introducción.**
- **Normas de la UIC.**
- **Desplazamientos.**
- **Salientes.**
- **Reducciones.**
- **Gálibo estático.**
- **Cálculo del gálibo estático según la UIC.**

## **Capítulo IX: Cálculo del Gálibo según UIC.**

### 9.1- Introducción.

Según la UIC, el gálibo es un contorno más unas normas de aplicación. La normativa UIC para el cálculo del gálibo estático solo tiene en cuenta el comportamiento cuasi-estático del vehículo ferroviario, el comportamiento dinámico del vehículo se propondrá como trabajos futuros a partir de este proyecto. A continuación se expondrán los cálculos necesarios para calcular el gálibo estático de un vehículo ferroviario concreto. Este vehículo está descrito en el capítulo 7 de este proyecto y se trata de un Tren Regional Diesel (TRD).

Los parámetros necesarios para confeccionar el gálibo estático son los siguientes:

- a) Desplazamientos (D).
- b) Salientes (S).
- c) Reducciones internas ( $E_i$ ).
- d) Reducciones externas ( $E_a$ ).

Todos estos parámetros están definidos en el capítulo seis del presente proyecto, se pasará directamente a los cálculos pertinentes sin definir los parámetros.

### 9.2- Normas de la UIC.

La UIC dictamina en las fichas 505.1, 505.2, 505.3, 505.4 y 505.5 que es de la incumbencia del Departamento de Material calcular los vehículos de tal forma que puedan inscribirse dentro del contorno de referencia, tanto en recta como en tramo de vía curvo de radio 250 metros, teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- a) Holguras y desgastes máximos entre:
  - Caja del vehículo y bogie.
  - Bogie y eje montado.
  - Eje montado y vía.
- b) Desplazamientos verticales del vehículo por causa de la suspensión.
- c) Disimetrías de construcción o cargas repartidas desigualmente superiores a  $1^\circ$ .
- d) Desplazamientos cuasi-estáticos debidos a insuficiencia o exceso de peralte de 0,05 [m] con un coeficiente de souplesse de 0,4.

Para el cálculo del gálibo estático el Departamento de Material no tendrá en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Un exceso de desplazamiento lateral respecto a la posición media en vía, debido a la insuficiencia o exceso de peralte comprendido entre 0,05 [m] y el máximo posible en cada caso. No obstante, si se tendrá en cuenta que el máximo coeficiente de souplesse permitido por Obra e Instalación es de 0,4 y que el centro de balanceo se encuentra a 0,5 metros de altura.
- b) Disimetrías menores de 1° a casusa de las tolerancias de construcción y reglaje o por el reparto desigual de la carga.
- c) Elementos que perturben el estado de conservación de la vía y que genere oscilaciones laterales aleatorias debidas a la interacción dinámica entre el material rodante y la vía.
- d) Defectos de nivelación o del peralte de la vía que generen desplazamientos de la vía.
- e) Desplazamientos verticales debidos a la inscripción de un tramo de vía en cambios de rasante.
- f) Márgenes de seguridad impuestos por la vía.

Todos estos aspectos son tratados por el Departamento de Obras e Instalación, no obstante, el Departamento de Material para calcular la inscripción en curva de 250 metros de radio, incrementa con los salientes el contorno de referencia.

### 9.3- Desplazamientos (D).

La expresión que determina el Desplazamiento “D” se divide en dos términos. Un primer término que considera los desplazamientos debidos holguras laterales y a los desplazamientos geométricos. Y un segundo término que considera los desplazamientos cuasi-estáticos generados a causa del peralte, disimetría y coeficiente de souplesse.

#### 9.3.1- Desplazamientos geométricos y holguras laterales.

La siguiente expresión determina los desplazamientos geométricos “dg” y holguras laterales (j,q,w) para un vehículo ferroviario que circula por un tramo de vía curvo de radio “R” y está montado sobre bogies.

$$D_1 = dg + A \cdot j + B \cdot q + C \cdot w = dg + A \cdot \frac{l - d}{2} + B \cdot q + C \cdot w$$

Ecuación 37. Desplazamientos geométricos y holguras laterales

Los coeficientes “A”, “B” y “C” dependen de si el desplazamiento se produce en la zona interna o externa de la curva en las secciones más desfavorables, como se

describió en el capítulo seis. Teniendo en cuenta esto, los desplazamientos quedaran de la siguiente forma:

Para la zona interna:

$$D_{i1} = \frac{n \cdot a - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} + \frac{l - d}{2} + q + w$$

Ecuación 38. Desplazamientos internos.

Para la zona externa:

$$D_{a1} = \frac{n \cdot a + n^2 - \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} + \left(\frac{2 \cdot n + a}{a}\right) \cdot \frac{l - d}{2} + \left(\frac{2 \cdot n + a}{a}\right) \cdot q + \left(\frac{n + a}{a}\right) \cdot w$$

Ecuación 39. Desplazamientos externos.

### 9.3.2- Desplazamientos cuasi-estáticos.

Los efectos de la suspensión del vehículo y de la disimetría de más de 1º crean los desplazamientos cuasi-estáticos. Obteniendo la siguiente ecuación:

$$z = \left(s \cdot \frac{(IóE)}{l} + \tan[\eta_0 - 1]_{>0}\right) \cdot (h - h_0)$$

Ecuación 40. Desplazamientos cuasi-estáticos.

Este proyecto tomará el valor de  $l = 1735 [mm]$  como dato aportado desde la bibliografía [27] y no se calculará. Pero sí que cabe destacar que corresponde a la distancia entre los centros de la elipse de contacto de la interrelación rueda-carril del eje montado en el plano de rodadura según las teorías de "Jonson & Vermeulen" y de "Kalker" sobre el modelo rueda-carril.

### 9.3.3- Desplazamientos totales.

Si se suman los desplazamientos anteriores se obtiene el desplazamiento total que sufre un vehículo cuando entra en un tramo de vía curvo. Este desplazamiento se calcula para las dos secciones más desfavorables que son la zona interior y exterior de la curva o lo que es lo mismo, el centro y extremo del vehículo.

Para la zona interior se obtiene:

$$D_i = \frac{n \cdot a - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} + \frac{l-d}{2} + q + w + \left( \left( s \cdot \frac{(I\delta E)}{l} + \tan[\eta_0 - 1]_{>0} \right) \cdot (h - h_0) \right)$$

Ecuación 41. Desplazamiento interior total.

Para la zona exterior se obtiene:

$$D_a = \frac{n \cdot a + n^2 - \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} + \left( \frac{2 \cdot n + a}{a} \right) \cdot \frac{l-d}{2} + \left( \frac{2 \cdot n + a}{a} \right) \cdot q + \left( \frac{n+a}{a} \right) \cdot w + \left( \left( s \cdot \frac{(I\delta E)}{l} + \tan[\eta_0 - 1]_{>0} \right) \cdot (h - h_0) \right)$$

Ecuación 42. Desplazamiento exterior total.

#### 9.4- Salientes.

Los salientes tanto para secciones internas como externas para un vehículo que circula por un ancho de vía Nacional son:

$$S = S_i = S_a = \frac{3,75}{R} + \frac{l - 1,668}{2}$$

Ecuación 43. Salientes

#### 9.5- Reducciones.

Al restar el valor de los salientes a los desplazamientos se obtienen las reducciones.

$$E = D - S$$

Ecuación 44. Reducciones.

De esta forma se tendrá:

- Reducciones internas “E<sub>i</sub>” que corresponden a las secciones de los vehículos comprendidas entre los ejes extremos o entre pivotes de los vehículos montados sobre bogies:

$$E_i = D_i - S$$

Ecuación 45. Reducciones internas.

- Reducciones externas “E<sub>a</sub>” que corresponden a las secciones más allá de los ejes extremos o de los pivotes en vehículos montados sobre bogies:

$E_a = D_a - S$
Ecuación 46. Reducciones externas.

#### 9.6- Gálibo estático.

El gálibo cinemático se considera el gálibo de referencia a la hora de construir un nuevo vehículo ferroviario. Este contorno de referencia lo proporciona la Administración de la Infraestructura Ferroviaria y en función de las características de fabricación del vehículo ferroviario, se obtiene el gálibo estático o de construcción de material. Se obtiene así los límites que puede alcanzar el nuevo diseño del vehículo.

<i>Gálibo Estático = Contorno de Referencia – Reducciones</i>
Ecuación 47. Gálibo estático

#### 9.7- Cálculo del Gálibo estático según la UIC.

En los siguientes apartados se expresarán los resultados obtenidos en el cálculo de los Desplazamientos, Salientes y Reducciones para un vehículo TRD circulando por una vía de ancho Nacional (1.668 [mm]), en curva de radio 250 [m] y con un exceso o insuficiencia de peralte de 50 [mm].

##### 9.7.1- Desplazamientos.

Se comenzará calculando los desplazamientos geométricos tanto para la sección interna (dgi) como para la externa (dga). Para ello el vehículo proporciona la siguiente tabla de datos (tabla 32) necesarios para el cálculo.

	Sección interna.	Sección exterior.
<b>Empate del vehículo, a</b>	17330	17330
<b>Distancia al pivote más próximo, n</b>	8665	2835
<b>Empate del bogie, p</b>	2700	2700
<b>Radio de curvatura de la vía, R</b>	250000	250000
<b>Tabla 32. Datos del vehículo ferroviario [mm].</b>		

Con esto se obtienen:

$$dgi = \frac{n \cdot a - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} = \boxed{153,8 [mm]}$$

$$dga = \frac{n \cdot a + n^2 - \frac{p^2}{4}}{2 \cdot R} = \boxed{110,7 [mm]}$$

Los próximos cálculos corresponden a los desplazamientos debidos a las holguras laterales (j, q, w).

Según RENFE, el valor máximo de holgura entre la vía y la rueda es 9 [mm] que es el que da lugar al caso más desfavorable.

$$j = \boxed{9 [mm]}$$

El valor de la holgura lateral “q” tendrá en cuenta los desplazamientos que se producen en la suspensión primaria, es decir entre ejes y bastidor del bogie. Para obtener este desplazamiento se debe calcular la aceleración no compensada del vehículo. Dado que el radio de la curva es de 250 metros y se considera una insuficiencia de peralte de 50 milímetros se obtiene una aceleración no compensada de:

$$\gamma' = \frac{g \cdot l}{l} = \frac{9,81[m/s^2] \cdot 50[mm]}{1668[mm]} = \boxed{0,29[m/s^2]}$$

La suspensión primaria está compuesta por 8 elementos que soportan un peso de 54996 [kg]. Por tanto la fuerza a la que están sometidos es:

$$F_q = m \cdot \gamma' = 54996[kg] \cdot 0,29[m/s^2] = \boxed{15948,8 [N]}$$

Para el caso más desfavorable se tomara como hipótesis que todo el esfuerzo se emplea para crear el desplazamiento lateral de los elementos de la suspensión. Por otro lado, se tomará el valor de “ $K_y = 7,5 \cdot 10^6 [N/m]$ ” como la rigidez lateral del muelle. Por tanto se obtiene un valor de “q”:

$$q = \frac{F_q}{K_y \cdot 8} = \frac{15948,8[N]}{7,5 \cdot 10^6[N/m] \cdot 8} = 2,66 \cdot 10^{-4}m = \boxed{0,27[mm]}$$



El valor de la holgura lateral “w” representa los desplazamientos de la suspensión secundaria, es decir, entre el bastidor del bogie y la caja. Esta suspensión, formada por 4 elementos, soporta un peso de 49996 [kg] y la rigidez lateral del muelle es “ $K_y = 2,53 \cdot 10^5 [N/m]$ ”. Se opera de la misma forma que para la holgura lateral “q”:

$$F_w = m \cdot \gamma' = 49996[kg] \cdot 0,29[m/s^2] = \boxed{14498,8 [N]}$$

$$w = \frac{F_w}{K_y \cdot 4} = \frac{14498,8[N]}{2,53 \cdot 10^5[N/m] \cdot 4} = 0,01432 m = \boxed{14,32 [mm]}$$

Resumiendo se obtiene la siguiente tabla (tabla 33) con los resultados de las holguras laterales:

j	q	W
9,00	0,27	14,32

**Tabla 33. Holguras laterales [mm].**

A continuación se aplicaran los coeficientes de inscripción a las holguras laterales ya que el vehículo circula por un tramo de vía curvo. En la siguiente tabla (tabla34) aparecen resumidos los coeficientes calculados:

Cd	Cq	Cw
Sección interior		
1	1	1
Sección exterior		
$\frac{2 \cdot a + a}{a}$	$\frac{2 \cdot a + a}{a}$	$\frac{n + a}{a}$
1,327	1,327	1,164

**Tabla 34. Coeficientes de inscripción.**

Una vez calculados los coeficientes de inscripción estos se aplican a las holguras laterales que sumadas a los desplazamientos geométricos, se obtienen los desplazamientos totales de la siguiente forma:

- Para las secciones externas:

$$D_a = dga + C_d \cdot d + C_q \cdot q + C_w \cdot$$

$$D_a = 153,8 + (1,327 \cdot 9) + (1,327 \cdot 0,27) + (1,164 \cdot 14,32) = \boxed{139,67 [mm]}$$

- Para las secciones intermedias:

$$D_i = dgi + C_d \cdot d + C_q \cdot q + C_w \cdot w$$

$$D_i = 153,80 + (1 \cdot 9) + (1 \cdot 0,27) + (1 \cdot 14,32) = \boxed{177,39 \text{ [mm]}}$$

A continuación se van calcular los desplazamientos cuasi-estáticos. Los desplazamientos cuasi-estáticos dependen la disimetría, el coeficiente de souplesse y de la altura del centro de balaceo.

Para el vehículo elegido el término de la disimetría es cero, ya que se trata de un vehículo simétricamente diseñado con todas sus masas centradas.

$$\boxed{\text{disimetría} = 0}$$

El coeficiente de souplesse “s” se calcula de la siguiente forma:

$$s = \frac{1}{\frac{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2}{G_2 \cdot Z} - 1}$$

Donde la variable auxiliar “Z” es:

$$Z = \frac{c_1}{c_2} \cdot \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \cdot (h_2 - h_3) \cdot \left[1 - \frac{G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_3}{2 \cdot c_1 \cdot b_1^2}\right] + h_2 + \frac{G_1}{G_2} \cdot h_1$$

Los valores de los parámetros para calcular el coeficiente de souplesse del vehículo son:

- Peso de la etapa primaria:  $G_1 = 539511 \text{ [N]}$ .
- Peso de la caja del vehículo (etapa secundaria):  $G_2 = 490461 \text{ [N]}$ .
- Altura del centro de gravedad de la masa del bastidor del bogie y la caja respecto de los ejes de las ruedas:  $h_1 = 1180 \text{ [mm]}$ .
- Altura del centro de gravedad de la caja respecto de los ejes de las ruedas:  $h_2 = 1350 \text{ [mm]}$ .

- Altura del punto superior de la suspensión secundaria respecto a la parte baja de la suspensión primaria:  $h_3 = 295 [mm]$ .
- Distancia de la base de los resortes de la suspensión al eje de la caja (suspensión primaria)  $b_1 = 1000 [mm]$ .
- Distancia de la base de los resortes de la suspensión al ejes de las traviesas móviles (suspensión secundaria):  $b_2 = 1000 [mm]$ .
- Rigidez de los resortes primarios:  $c_1 = 4,75 \cdot 10^6 [N/m]$ .
- Rigidez de los resortes secundarios:  $c_2 = 5,34 \cdot 10^5 [N/m]$ .

Al sustituir los datos del vehículo en las ecuaciones anteriores se obtiene el siguiente coeficiente de souplesse:

$$s = \boxed{0,21}$$

El cálculo del centro de balanceo no es necesario ya que el vehículo de estudio TRD posee una traviesa basculante que proporciona el movimiento de balanceo, es decir, el TRD tiene características pendulares durante la marcha. Por este motivo los datos del fabricante aportan como dato la altura del centro de balanceo desde dos puntos de referencia, desde los carriles y desde los ejes de las ruedas.

- Desde los carriles:  $h_c = \boxed{1600 [mm]}$
- Desde las ruedas:  $h_c = \boxed{1165 [mm]}$

Calculados la disimetría, el coeficiente de souplesse y la altura del centro de balanceo, se continua con el cálculo de los desplazamientos cuasi-estáticos. De la misma forma que en los desplazamientos anteriores, el desplazamiento cuasi-estático se calcula en las dos secciones más desfavorables, en la interior y en la exterior. Se ha tomado como hipótesis inicial que para la sección exterior se tome una insuficiencia de peralte máxima de 50 [mm] y para la sección interior un exceso de peralte de 50 [mm] siendo estos los dos caso más desfavorables. Se obtienen de este modo las siguientes expresiones de desplazamientos cuasi-estáticos:

$$z_i = s \cdot \frac{E}{l} \cdot (h - h_c) = 0,21 \cdot \frac{50}{1735} \cdot (h[mm] - 1600) = \boxed{0,006 \cdot (h[mm] - 1600)}$$

$$z_a = s \cdot \frac{I}{l} \cdot (h - h_c) = 0,21 \cdot \frac{50}{1735} \cdot (h[mm] - 1600) = \boxed{0,006 \cdot (h[mm] - 1600)}$$

Si se suman todos los desplazamientos de cada sección más desfavorable se obtienen las siguientes expresiones que se utilizarán para calcular el desplazamiento total dependiendo de la altura “h”:

$$\boxed{D_{Ta} = 139,67 + 0,006 \cdot (h - 1600)[mm]}$$

$$\boxed{D_{Ti} = 177,39 + 0,006 \cdot (h - 1600)[mm]}$$

Con esto se concluye el cálculo de los desplazamientos.

#### 9.7.2- Salientes.

Para el cálculo de los salientes se tomarán las como radio “R= 250 [m]” y “l = 1,668 [m]”. Siendo la siguiente expresión con la que se obtengan los salientes en las secciones más desfavorables:

$$S = S_i = S_a = \frac{3,75}{R} + \frac{l - 1,668}{2} = 15 \cdot 10^{-3} m. = \boxed{15 [mm]}$$

La siguiente tabla (tabla 35) resume los valores de los salientes calculados:

$S_i$	$S_a$
15	15
<b>Tabla 35. Salientes [mm].</b>	

#### 9.7.3- Reducciones.

Una vez calculados los desplazamientos y los salientes, las reducciones “E” se calculan restando a los desplazamientos el valor de los salientes de forma que se obtiene:

$$E = D - S$$

Incorporando las expresiones de los salientes y de los desplazamientos se obtienen las siguientes expresiones para las secciones más desfavorables:

$$E_a = 139,67 + 0,006 \cdot (h - 1600) - S_a = 124,67 + 0,006 \cdot (h - 1600)[mm]$$

$$E_i = 177,39 - 0,006 \cdot (h - 1600) - S_i = 162,39 - 0,006 \cdot (h - 1600) [mm]$$

Con estas dos expresiones se obtiene la tabla siguiente (tabla 36) donde se reflejan los resultados obtenidos de las reducciones para el intervalo de alturas entre un metro y cuatro metros.

Altura, $h$ .	Reducciones de la sección externa, $E_a$ .	Reducciones de la sección interna, $E_i$ .
4000	139,07	147,99
3900	138,47	148,59
3800	137,87	149,19
3700	137,27	149,79
3600	136,67	150,39
3500	136,07	150,99
3400	135,47	151,59
3300	134,87	152,19
3200	134,27	152,79
3100	133,67	153,39
3000	133,07	153,99
2900	132,47	154,59
2800	131,87	155,19
2700	131,27	155,79
2600	130,67	156,39
2500	130,07	156,99
2400	129,47	157,59
2300	128,87	158,19
2200	128,27	158,79
2100	127,67	159,39
2000	127,07	159,99
1900	126,47	160,59
1800	125,87	161,19
1700	125,27	161,79
1600	124,67	162,39
1500	124,07	162,99
1400	123,47	163,59
1300	122,87	164,19
1200	122,27	164,79
1100	121,67	165,39

Tabla 36. Reducciones para distintas alturas en las secciones más desfavorables [mm].

Con la ayuda de esta tabla se obtiene el gálibo estático como se describe en el siguiente apartado.

9.7.4- Gálibo estático.

Para obtener el gálibo estático es necesario la obtención de los desplazamientos, los salientes y las reducciones a partir de los datos del vehículo ferroviario como se ha visto en los apartados anteriores. Por otro lado, se debe tener un contorno de referencia para completar los cálculos. El contorno de referencia lo proporciona la UIC y es el gálibo cinemático para el ancho de vía nacional que se puede observar en la siguiente figura (figura 56). Por lo tanto, el gálibo estático en las dos secciones más desfavorables, externa e interna, viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$\boxed{\text{Gálibo estático}_a = \text{Gálibo cinemático}_a - E_a}$$

$$\boxed{\text{Gálibo estático}_i = \text{Gálibo cinemático}_i - E_i}$$

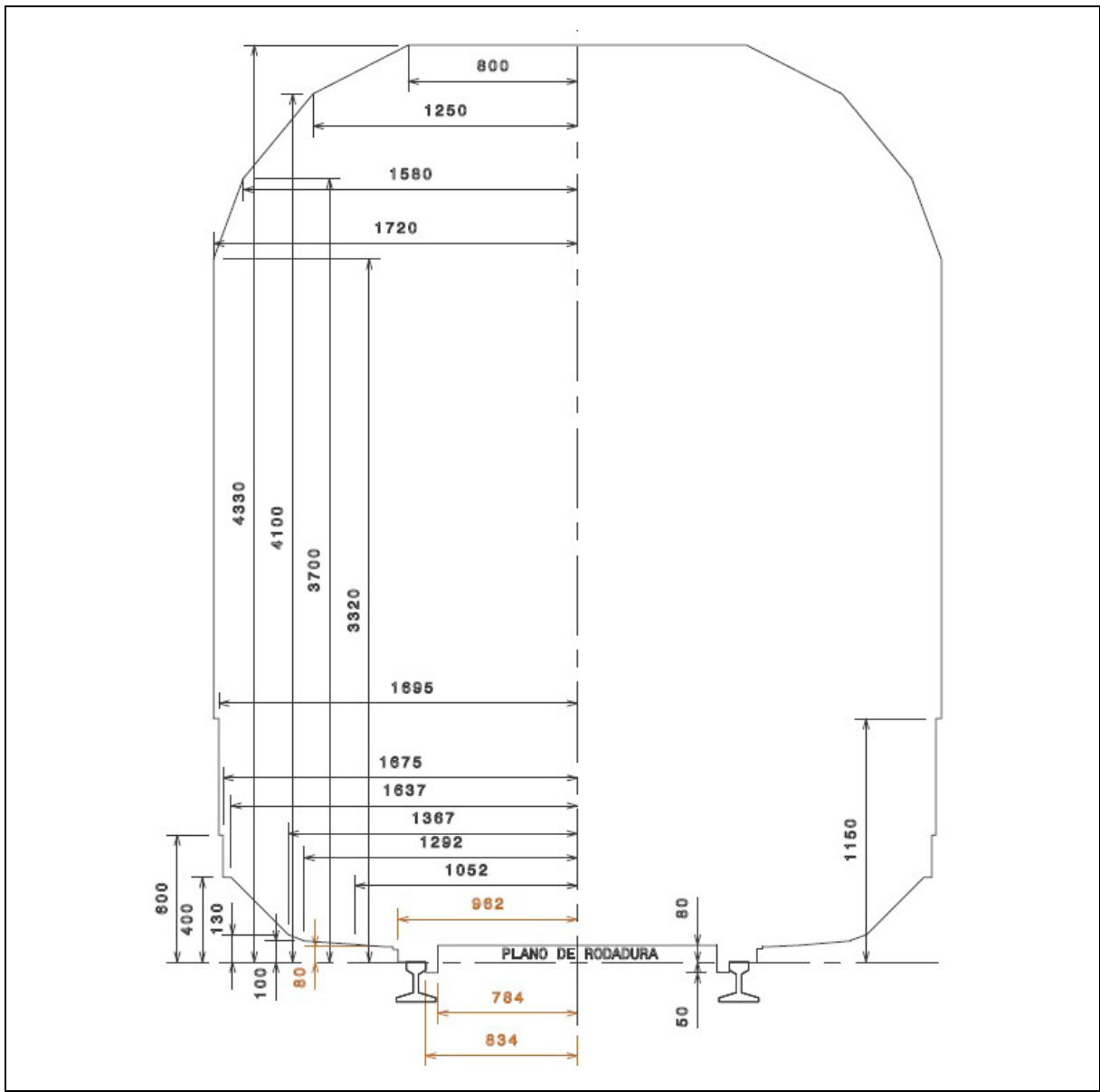


Figura 56. Gálibo cinemático de RENFE [mm]. [16]

La siguiente tabla (tabla 37) muestra los resultados del valor del gálibo estático o de construcción de material para un intervalo de alturas entre 1000 [mm] y 4000 [mm] de las secciones más desfavorables, sección externa e interna del vehículo ferroviario.

Altura <i>h.</i>	Gálibo cinemático.	Sección externa.		Sección interna.	
		Reducciones, $E_a$ .	Gálibo estático.	Reducciones, $E_i$ .	Gálibo estático.
4000	1333	139,07	1193,93	147,99	1185,01
3900	1415	138,47	1276,53	148,59	1266,41
3800	1498	137,87	1360,13	149,19	1348,81
3700	1580	137,27	1442,73	149,79	1430,21
3600	1615	136,67	1478,33	150,39	1464,61
3500	1650	136,07	1513,93	150,99	1499,01
3400	1685	135,47	1549,53	151,59	1533,41
3300	1720	134,87	1585,13	152,19	1567,81
3200	1720	134,27	1585,73	152,79	1567,21
3100	1720	133,67	1586,33	153,39	1566,61
3000	1720	133,07	1586,93	153,99	1566,01
2900	1720	132,47	1587,53	154,59	1565,41
2800	1720	131,87	1588,13	155,19	1564,81
2700	1720	131,27	1588,73	155,79	1564,21
2600	1720	130,67	1589,33	156,39	1563,61
2500	1720	130,07	1589,93	156,99	1563,01
2400	1720	129,47	1590,53	157,59	1562,41
2300	1720	128,87	1591,13	158,19	1561,81
2200	1720	128,27	1591,73	158,79	1561,21
2100	1720	127,67	1592,33	159,39	1560,61
2000	1720	127,07	1592,93	159,99	1560,01
1900	1720	126,47	1593,53	160,59	1559,41
1800	1720	125,87	1594,13	161,19	1558,81
1700	1720	125,27	1594,73	161,79	1558,21
1600	1720	124,67	1595,33	162,39	1557,61
1500	1720	124,07	1595,93	162,99	1557,01
1400	1720	123,47	1596,53	163,59	1556,41
1300	1597,13	1597,13	1597,13	164,19	1555,81
1200	1597,73	1597,73	1597,73	164,79	1555,21
1100	1573,33	1573,33	1573,33	165,39	1529,61

Tabla 37. Gálibo Estático para diferentes alturas en las secciones más desfavorables [mm].

A partir de esta tabla se puede dibujar la sección del gálibo estático tanto de la sección externa como de la interna. Las siguientes figuras muestran los resultados.

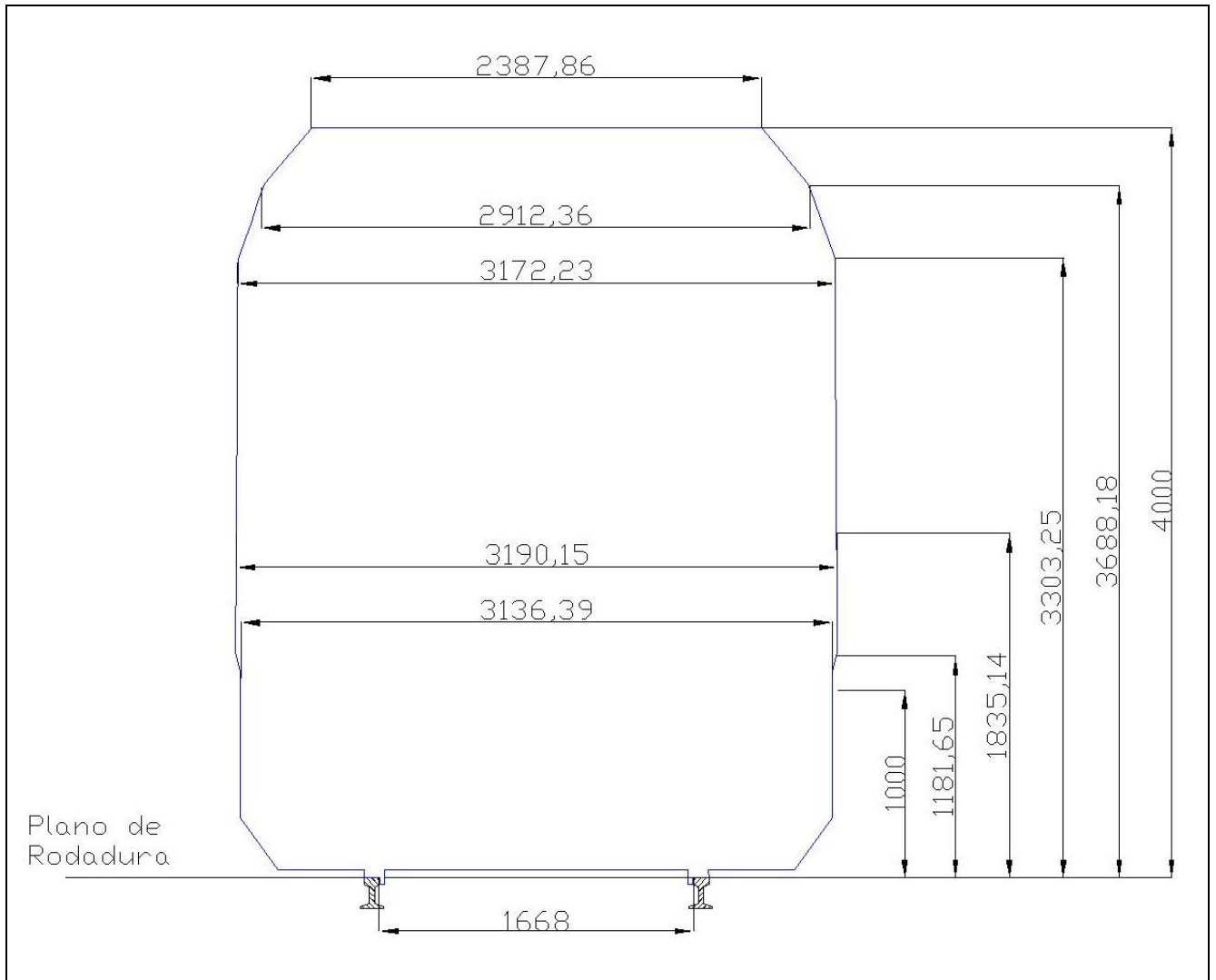
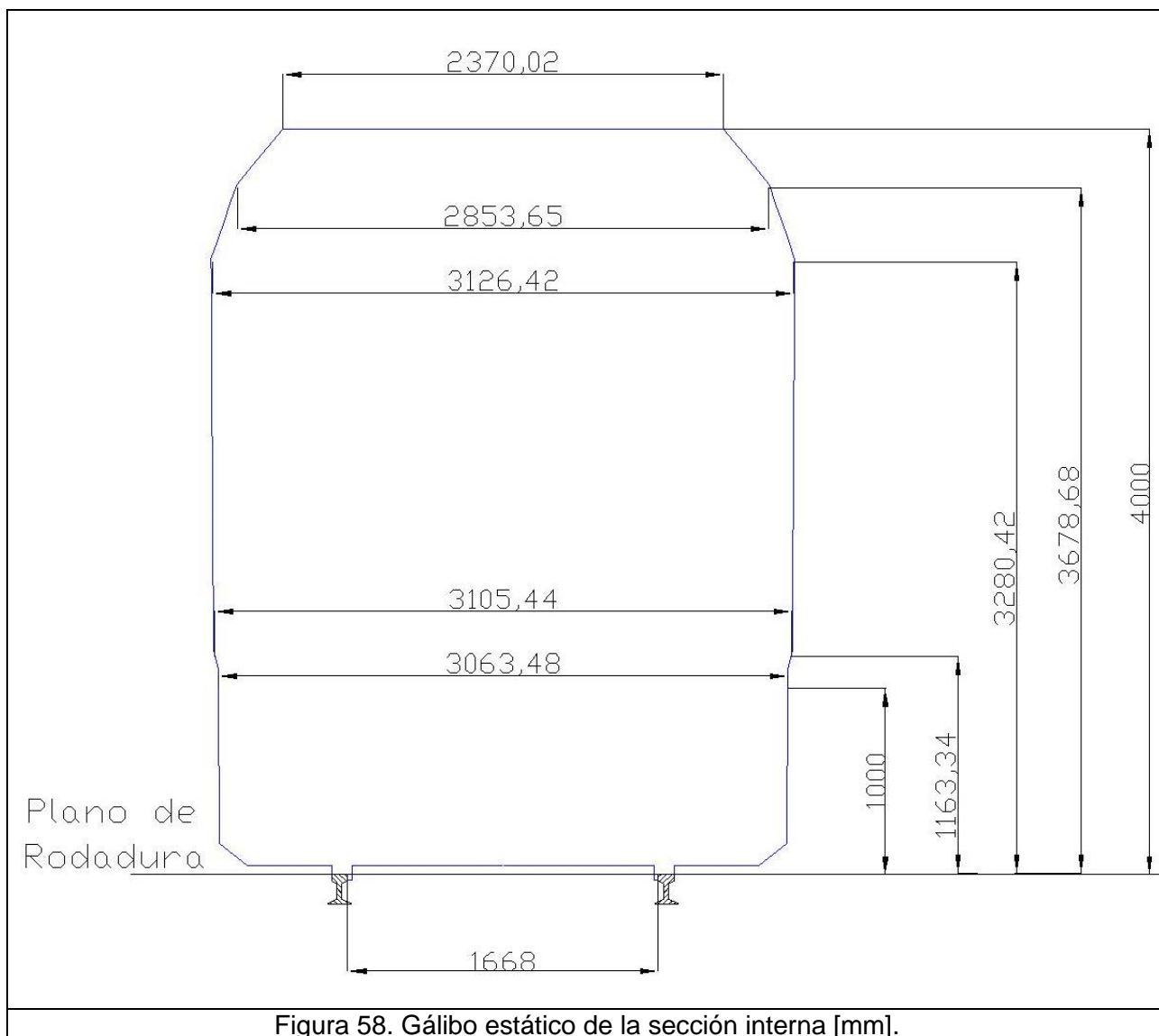


Figura 57. Gálibo estático de la sección externa [mm].





Una vez obtenido los gálibos estáticos se van a escalar para realizar un estudio comparativo de dichos gálibos con los que se obtendrían al realizar los gálibos según la normativa NEM. De esta forma se trata de obtener qué principios utiliza la normativa NEM o qué parámetros tiene en cuenta desde el punto de vista del gálibo ferroviario real. Para dicho estudio se escalarán los gálibos según las escalas H0 (1:87), I (1:32) y X (1:5,5) siendo esta última la mayor escala que contempla la NEM de la cual se han obtenido en el capítulo cinco las tablas según la NEM para la obtención de los diferentes gálibos.

Las siguientes figuras (figura 59 y 60) representan los gálibos estáticos escalados en H0.

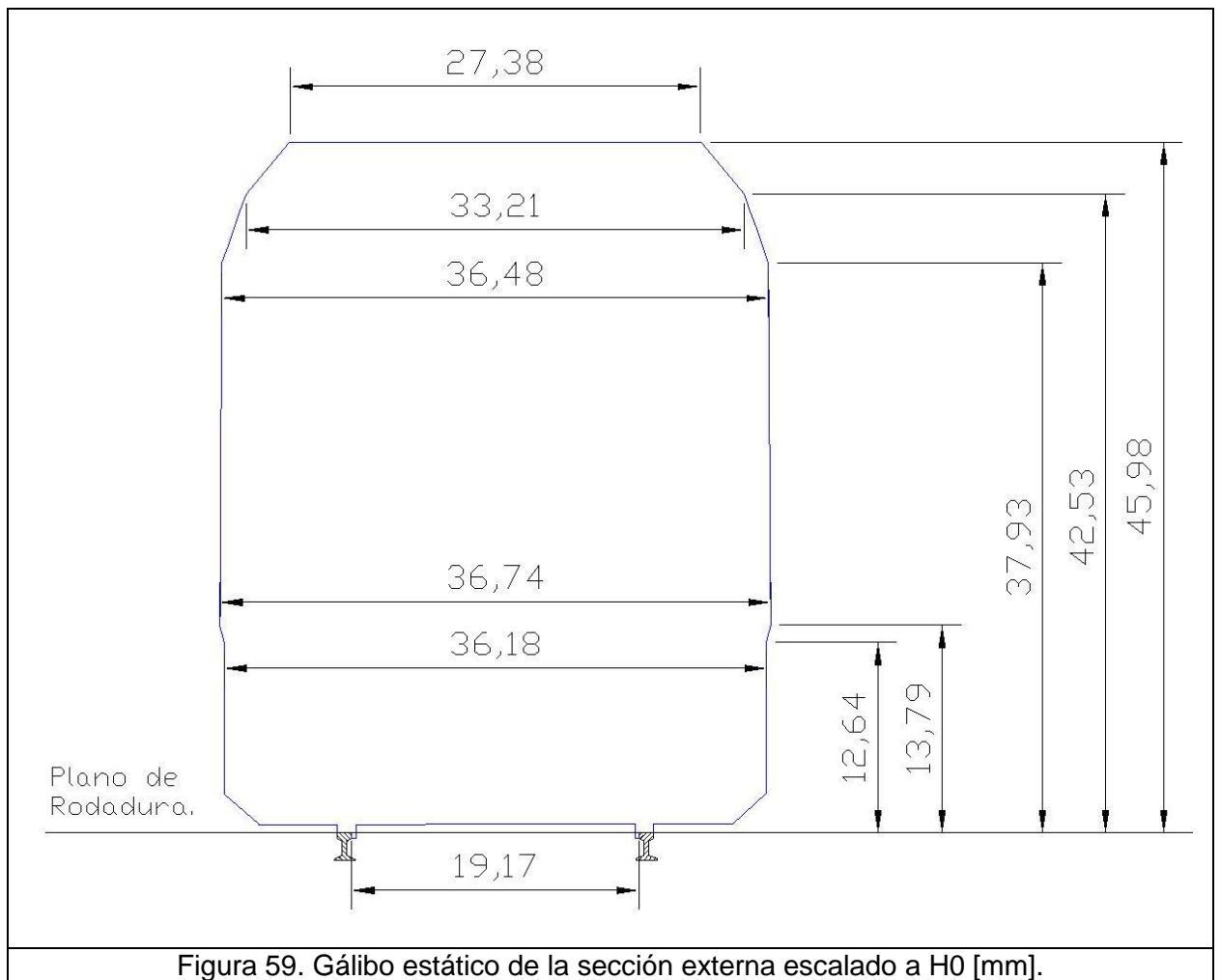
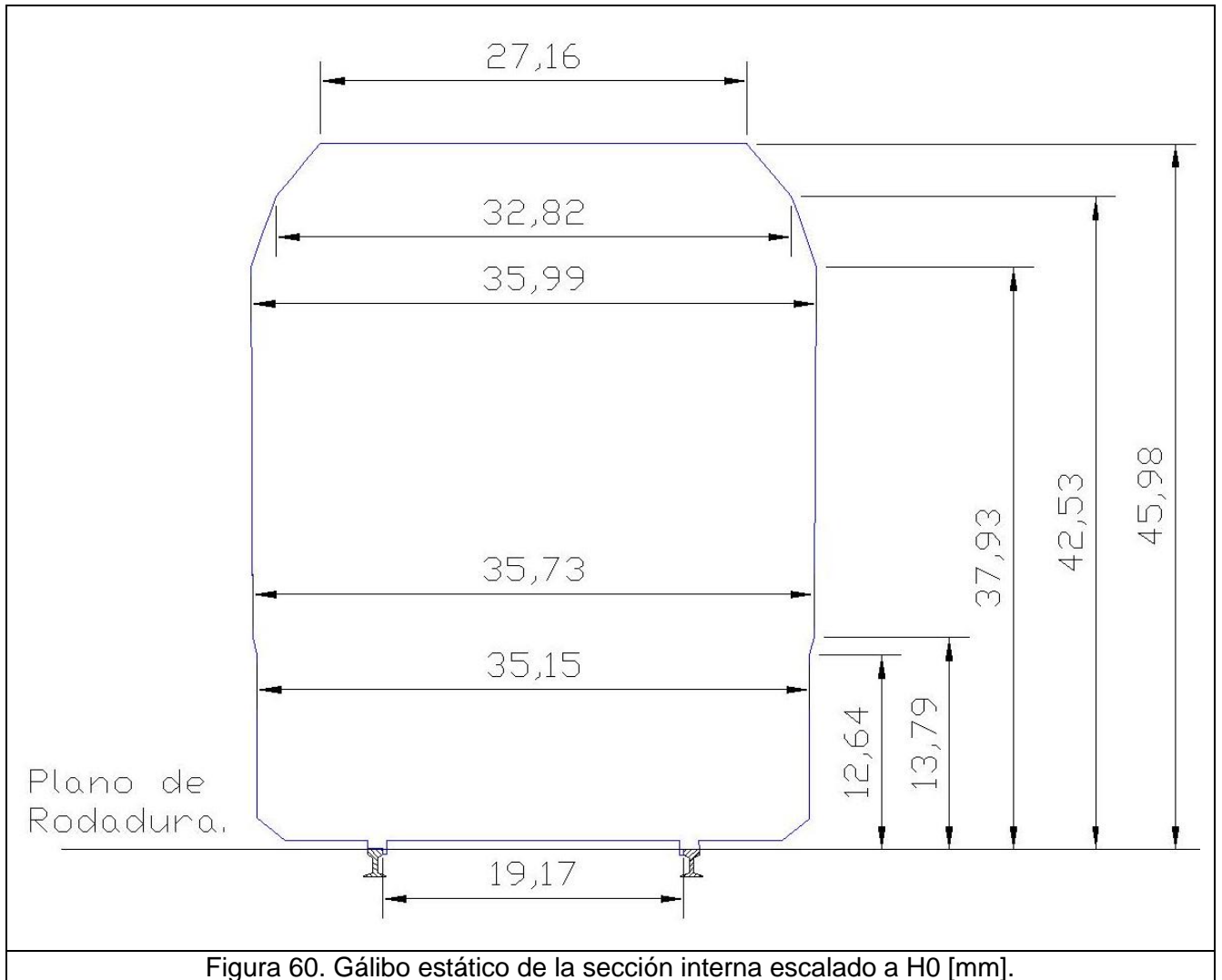
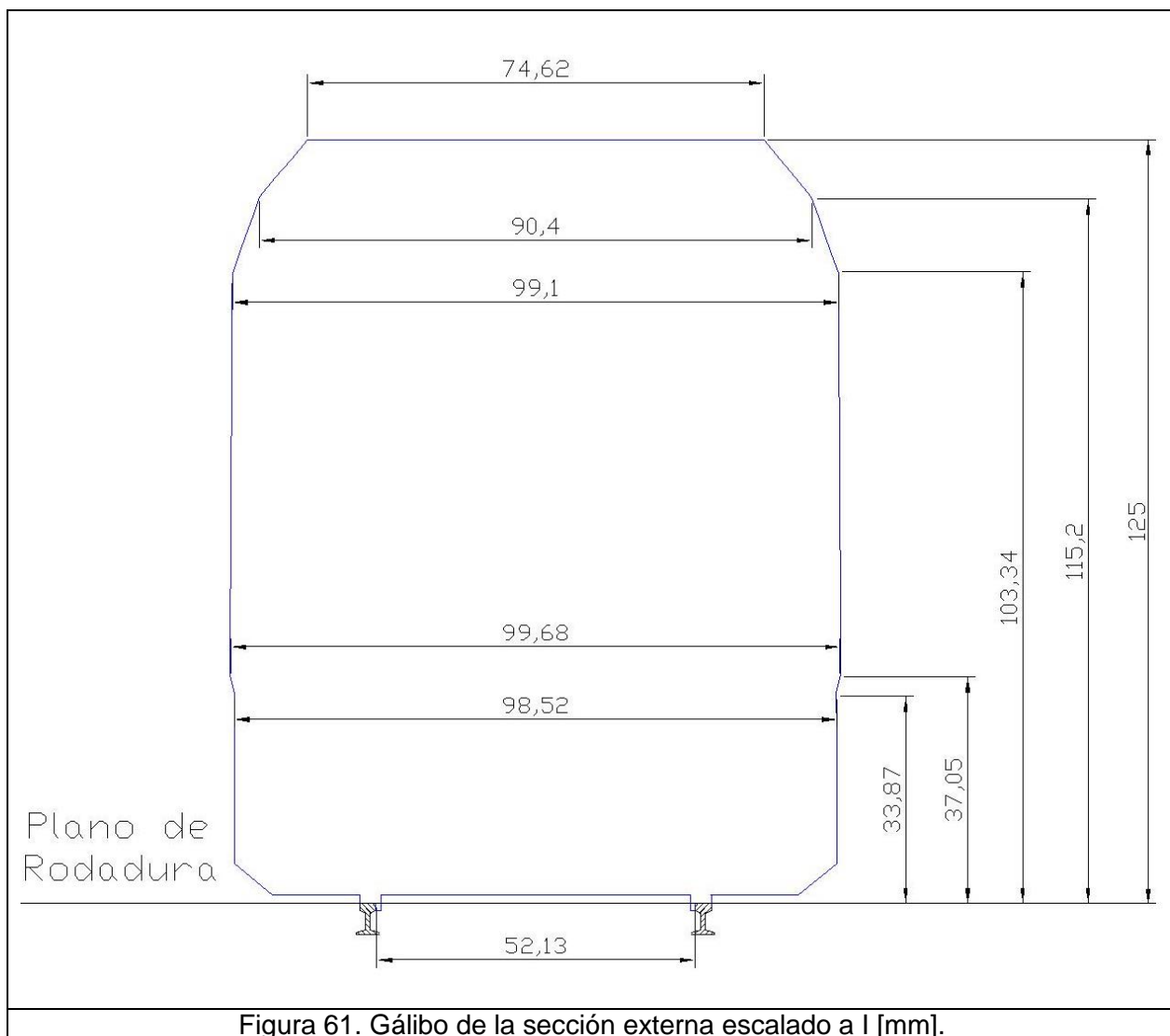
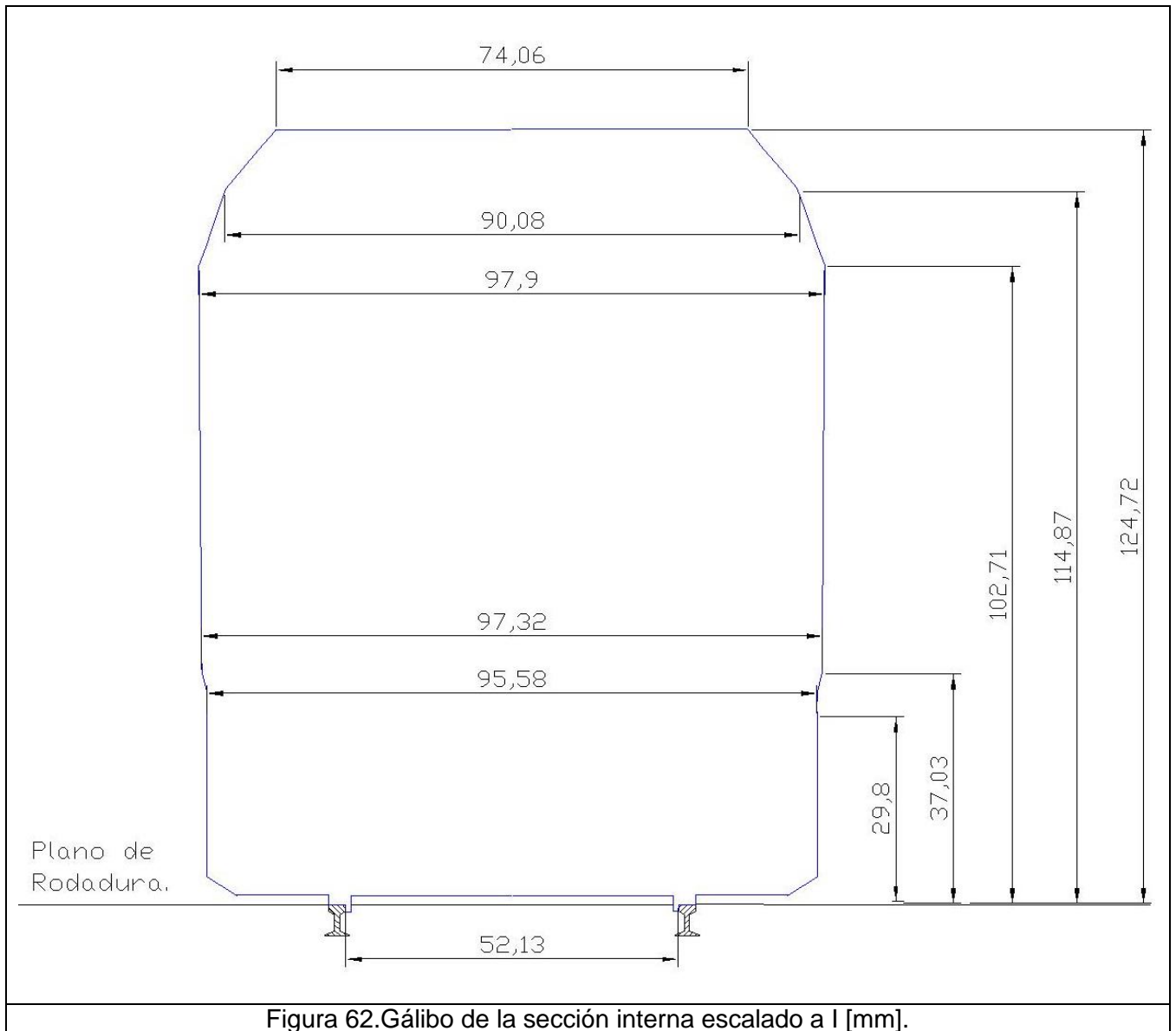


Figura 59. Gálibo estático de la sección externa escalado a H0 [mm].

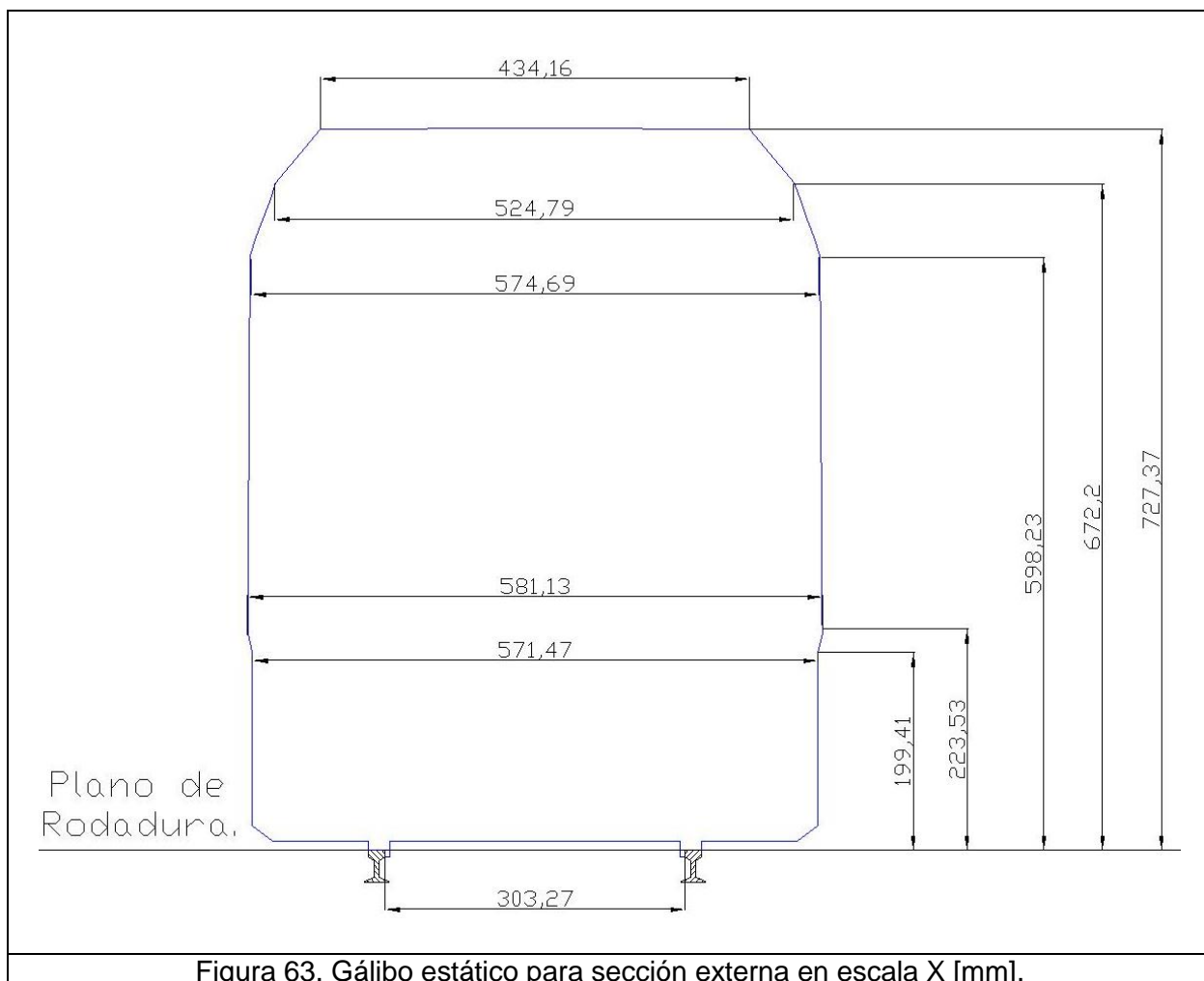


Seguidamente se muestra el gálibo estático a escala I, o lo que es lo mismo a escala 1:32 (figuras 61 y 62), de las sección externa e interna.





Por último se representarán el gálibo estático tanto externo como interno para la escala X (1:5,5) la mayor escala que contempla la normativa NEM.



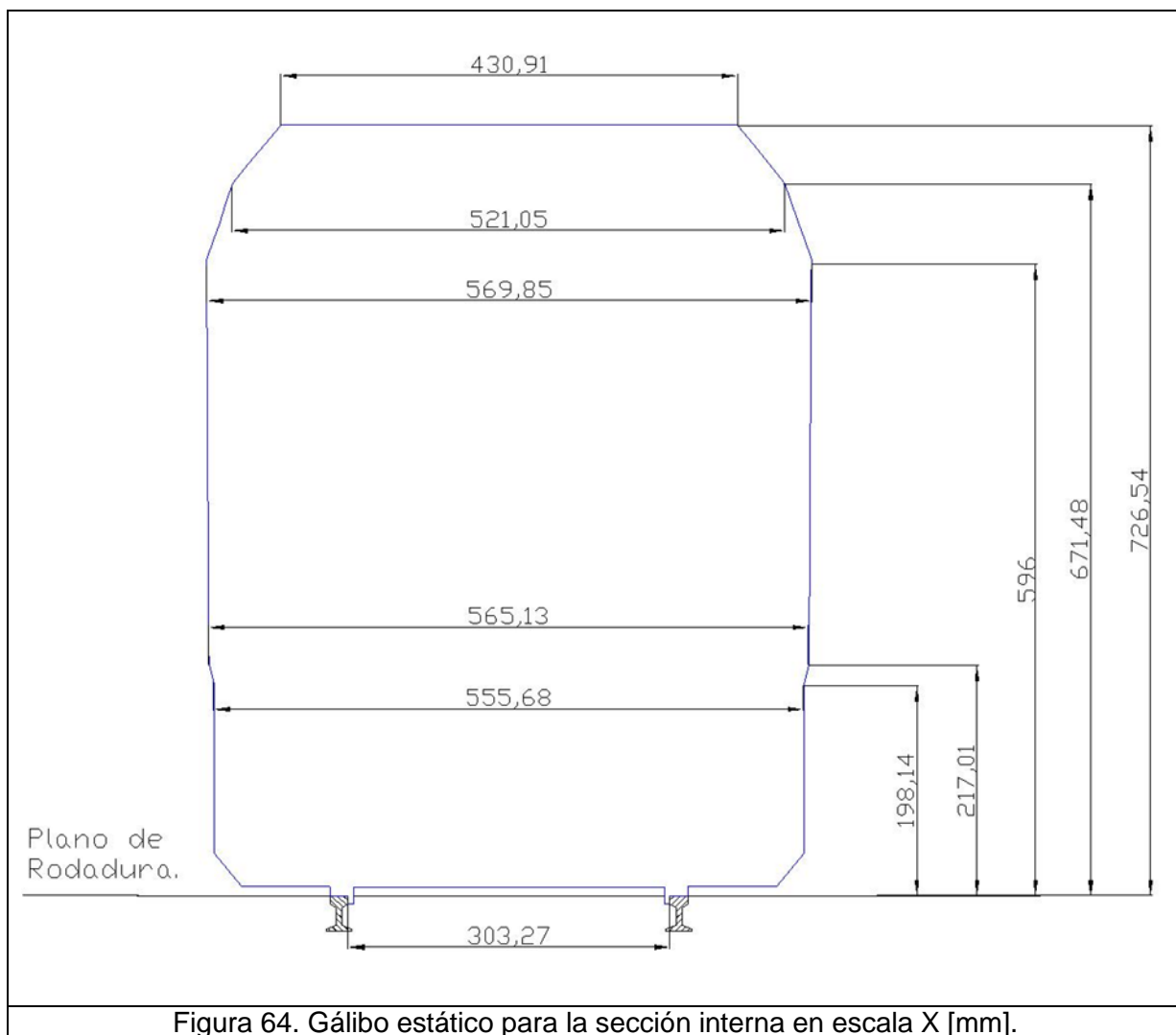


Figura 64. Gálibo estático para la sección interna en escala X [mm].

## **Capítulo X: Análisis de los parámetros característicos del gálibo ferroviario.**

- **Introducción.**
  
- **Parámetros característicos para las escalas H0 (1:87), I (1:32) y X (1:5,5).**



## **Capítulo X: Análisis de los parámetros característicos del gálibo ferroviario.**

### 10.1- Introducción.

Durante los capítulos anteriores se fueron calculando los diferentes gálibos según la normativa NEM. y la UIC. En este capítulo se muestran las reducciones, desplazamientos y salientes que se obtienen al comparar el gálibo estático de un vehículo ferroviario real, el TRD, con los gálibos de referencia que proporcionan la normativa NEM. De este modo se creará un cuadro comparativo entre los parámetros característicos que aplica la normativa NEM. y los que aplica la UIC. en el cálculo real del gálibo ferroviario.

Se entenderán por parámetros característicos del gálibo los siguientes aspectos:

- Reducción de las secciones más desfavorables, interna y externa, " $E_i$ ", " $E_a$ ".
- Desplazamiento de las secciones más desfavorables, interna y externa, " $D_i$ ", " $D_a$ ".
- Salientes de las secciones más desfavorables, interna y externa " $S_i$ ", " $S_a$ ".

En los siguientes apartados se calcularan los parámetros característicos según la escala. Para ello se tendrá en cuenta las siguientes hipótesis, en las que se toman como gálibos de referencia los gálibos calculados según la NEM.

- Hipótesis 1: El Gálibo cinemático (UIC.) corresponde al Gálibo de material móvil (NEM.).
- Hipótesis 2: El Gálibo de ocupación estático (UIC.) corresponde al Gálibo de libre circulación en vía recta (NEM.).
- Hipótesis 3: El gálibo de ocupación cinemático (UIC.) corresponde al Gálibo de libre circulación en curva (NEM.).

Dadas estas hipótesis se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$E_i = \text{Gálibo de material móvil} - \text{Gálibo estático}_i$$

$$E_a = \text{Gálibo de material móvil} - \text{Gálibo estático}_a$$

$$D_i = \text{Gálibo de libre circulación en vía recta} - \text{Gálibo estático}_i$$

$$D_a = \text{Gálibo de libre circulación en vía recta} - \text{Gálibo estático}_a$$

$$S = S_i = S_a = D - E$$

### 10.2- Parámetros característicos para la escala H0 (1:87), I (1:32) y X (1:5,5).

En los capítulos anteriores se calculó el gálibo estático en escala H0 para las secciones más desfavorables según la UIC. En el modelo TRD estas secciones son la interna y la externa. También se calcularon los gálivos de referencia según la normativa NEM. Aplicando las hipótesis anteriores y el conjunto de ecuaciones se obtiene las siguientes tablas en la que se calculan los parámetros característicos del gálibo para el rango de alturas entre 4000 [mm] y 1000[mm]. En la tabla aparecen estas alturas en la escala según la escala. En la siguiente tabla en las siguientes se obtiene los siguientes aspectos dependiendo de la escala.

- Altura, " $h_e$ ".
- Gálibo estático en la sección exterior, " $G_{ea}$ ".
- Gálibo estático en la sección interior, " $G_{ei}$ ".
- Gálibo del material móvil (NEM), " $G_{mv}$ ".
- Gálibo de libre circulación en vía recta (NEM), " $G_{cvr}$ ".
- Gálibo de libre circulación en curva (NEM), " $G_{cvc}$ ".
- Reducción de la sección interna, " $E_i$ ".
- Reducción de la sección externa, " $E_a$ ".
- Desplazamiento de la sección interna, " $D_i$ ".
- Desplazamiento de la sección externa, " $D_a$ ".
- Salientes, " $S$ ".

La tabla 38 refleja los resultados obtenidos para la escala H0 (1:87).

$h_e$	$G_{ea}$	$G_{mv}$	$E_a$	$G_{ei}$	$E_i$	$G_{cvr}$	$D_a$	$D_i$	$S$
45,977	13,723	18,935	5,212	13,621	5,315	23,442	9,718	9,821	4,506
44,828	14,673	19,554	4,882	14,556	4,998	24,000	9,327	9,444	4,446
43,678	15,634	20,000	4,366	15,504	4,496	24,000	8,366	8,496	4,000
42,529	16,583	20,000	3,417	16,439	3,561	24,000	7,417	7,561	4,000
41,379	16,992	20,000	3,008	16,835	3,165	24,000	7,008	7,165	4,000
40,230	17,401	20,000	2,599	17,230	2,770	24,000	6,599	6,770	4,000
39,080	17,811	20,000	2,189	17,625	2,375	24,000	6,189	6,375	4,000
37,931	18,220	20,000	1,780	18,021	1,979	24,000	5,780	5,979	4,000
36,782	18,227	20,000	1,773	18,014	1,986	24,000	5,773	5,986	4,000
35,632	18,234	20,000	1,766	18,007	1,993	24,000	5,766	5,993	4,000
34,483	18,241	20,000	1,759	18,000	2,000	24,000	5,759	6,000	4,000
33,333	18,247	20,000	1,753	17,993	2,007	24,000	5,753	6,007	4,000
32,184	18,254	20,000	1,746	17,986	2,014	24,000	5,746	6,014	4,000
31,034	18,261	20,000	1,739	17,979	2,021	24,000	5,739	6,021	4,000
29,885	18,268	20,000	1,732	17,973	2,027	24,000	5,732	6,027	4,000
28,736	18,275	20,000	1,725	17,966	2,034	24,000	5,725	6,034	4,000
27,586	18,282	20,000	1,718	17,959	2,041	24,000	5,718	6,041	4,000
26,437	18,289	20,000	1,711	17,952	2,048	24,000	5,711	6,048	4,000
25,287	18,296	20,000	1,704	17,945	2,055	24,000	5,704	6,055	4,000
24,138	18,303	20,000	1,697	17,938	2,062	24,000	5,697	6,062	4,000
22,989	18,310	20,000	1,690	17,931	2,069	24,000	5,690	6,069	4,000
21,839	18,316	20,000	1,684	17,924	2,076	24,000	5,684	6,076	4,000
20,690	18,323	20,000	1,677	17,917	2,083	24,000	5,677	6,083	4,000
19,540	18,330	20,000	1,670	17,910	2,090	24,000	5,670	6,090	4,000
18,391	18,337	20,000	1,663	17,904	2,096	24,000	5,663	6,096	4,000
17,241	18,344	20,000	1,656	17,897	2,103	24,000	5,656	6,103	4,000
16,092	18,351	20,000	1,649	17,890	2,110	24,000	5,649	6,110	4,000
14,943	18,358	20,000	1,642	17,883	2,117	24,000	5,642	6,117	4,000
13,793	18,365	20,000	1,635	17,876	2,124	21,000	2,635	3,124	1,000
12,644	18,084	20,000	1,916	17,582	2,418	21,000	2,916	3,418	1,000
11,494	18,091	20,000	1,909	17,575	2,425	21,000	2,909	3,425	1,000

**Tabla 38. Parámetros característicos en escala H0 [mm].**

En la siguiente figura (figura 65) se observa cómo se alberga el gálibo estático en los gálibos de referencia proporcionados por la NEM. en escala H0.

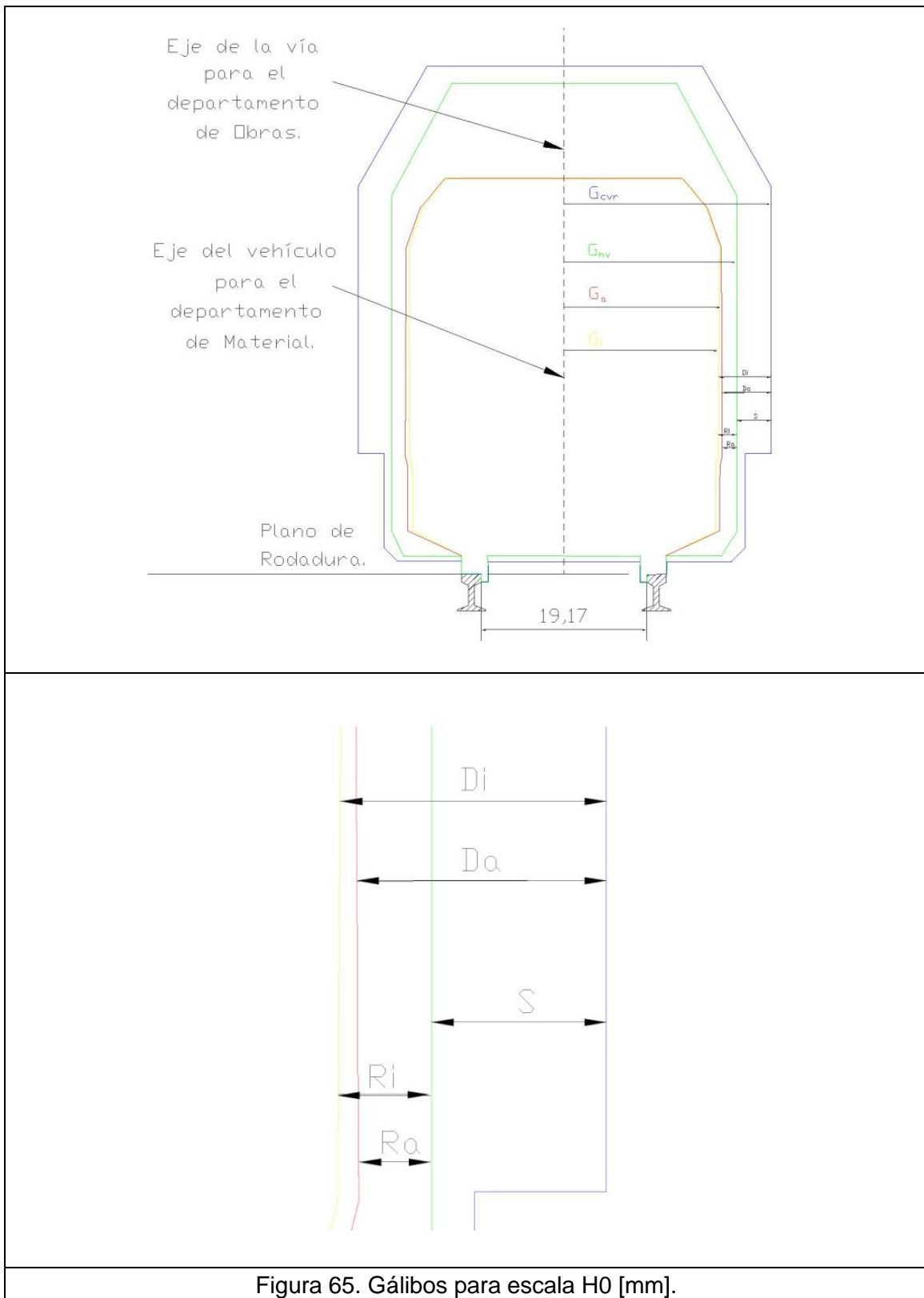


Figura 65. Gálbos para escala H0 [mm].

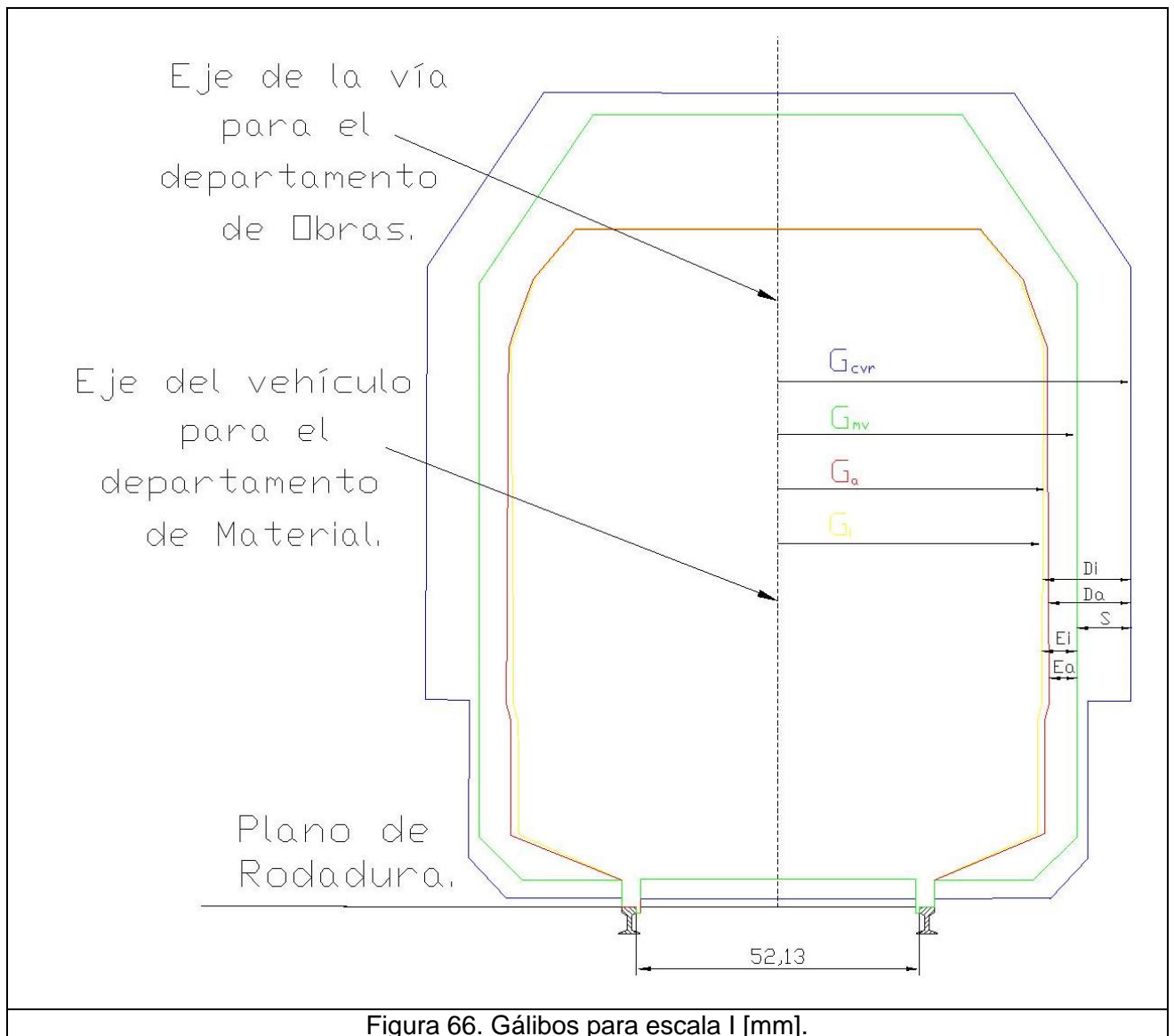
Se puede observar en el dibujo de abajo, de la figura 65, la ampliación de la zona donde se aprecian las cotas de los parámetros característicos del gálibo ferroviario.

La siguiente tabla (tabla 39) recopila los resultados para la escala I (1:32).

$h_e$	$G_{ea}$	$G_{mv}$	$E_a$	$G_{ei}$	$E_i$	$G_{cvt}$	$D_a$	$D_i$	$S$
125	37,310	48,226	10,915	37,032	11,194	60,297	22,987	23,265	12,071
121,875	39,892	50,343	10,451	39,575	10,767	62,396	22,505	22,821	12,054
118,75	42,504	52,460	9,956	42,150	10,309	64,496	21,992	22,346	12,036
115,625	45,085	54,577	9,491	44,694	9,883	65,000	19,915	20,306	10,423
112,5	46,198	55,000	8,802	45,769	9,231	65,000	18,802	19,231	10,000
109,375	47,310	55,000	7,690	46,844	8,156	65,000	17,690	18,156	10,000
106,25	48,423	55,000	6,577	47,919	7,081	65,000	16,577	17,081	10,000
103,125	49,535	55,000	5,465	48,994	6,006	65,000	15,465	16,006	10,000
100	49,554	55,000	5,446	48,975	6,025	65,000	15,446	16,025	10,000
96,875	49,573	55,000	5,427	48,957	6,043	65,000	15,427	16,043	10,000
93,75	49,592	55,000	5,408	48,938	6,062	65,000	15,408	16,062	10,000
90,625	49,610	55,000	5,390	48,919	6,081	65,000	15,390	16,081	10,000
87,5	49,629	55,000	5,371	48,900	6,100	65,000	15,371	16,100	10,000
84,375	49,648	55,000	5,352	48,882	6,118	65,000	15,352	16,118	10,000
81,25	49,667	55,000	5,333	48,863	6,137	65,000	15,333	16,137	10,000
78,125	49,685	55,000	5,315	48,844	6,156	65,000	15,315	16,156	10,000
75	49,704	55,000	5,296	48,825	6,175	65,000	15,296	16,175	10,000
71,875	49,723	55,000	5,277	48,807	6,193	65,000	15,277	16,193	10,000
68,75	49,742	55,000	5,258	48,788	6,212	65,000	15,258	16,212	10,000
65,625	49,760	55,000	5,240	48,769	6,231	65,000	15,240	16,231	10,000
62,5	49,779	55,000	5,221	48,750	6,250	65,000	15,221	16,250	10,000
59,375	49,798	55,000	5,202	48,732	6,268	65,000	15,202	16,268	10,000
56,25	49,817	55,000	5,183	48,713	6,287	65,000	15,183	16,287	10,000
53,125	49,835	55,000	5,165	48,694	6,306	65,000	15,165	16,306	10,000
50	49,854	55,000	5,146	48,675	6,325	65,000	15,146	16,325	10,000
46,875	49,873	55,000	5,127	48,657	6,343	65,000	15,127	16,343	10,000
43,75	49,892	55,000	5,108	48,638	6,362	65,000	15,108	16,362	10,000
40,625	49,910	55,000	5,090	48,619	6,381	65,000	15,090	16,381	10,000
37,5	49,929	55,000	5,071	48,600	6,400	57,000	7,071	8,400	2,000
34,375	49,167	55,000	5,833	47,800	7,200	57,000	7,833	9,200	2,000
31,25	49,185	55,000	5,815	47,782	7,218	57,000	7,815	9,218	2,000

**Tabla 39. Parámetros característicos en escala I [mm].**

En la siguiente figura (figura 66) se observa cómo se alberga el gálibo estático en los gálibos de referencia proporcionados por la NEM. en escala I.

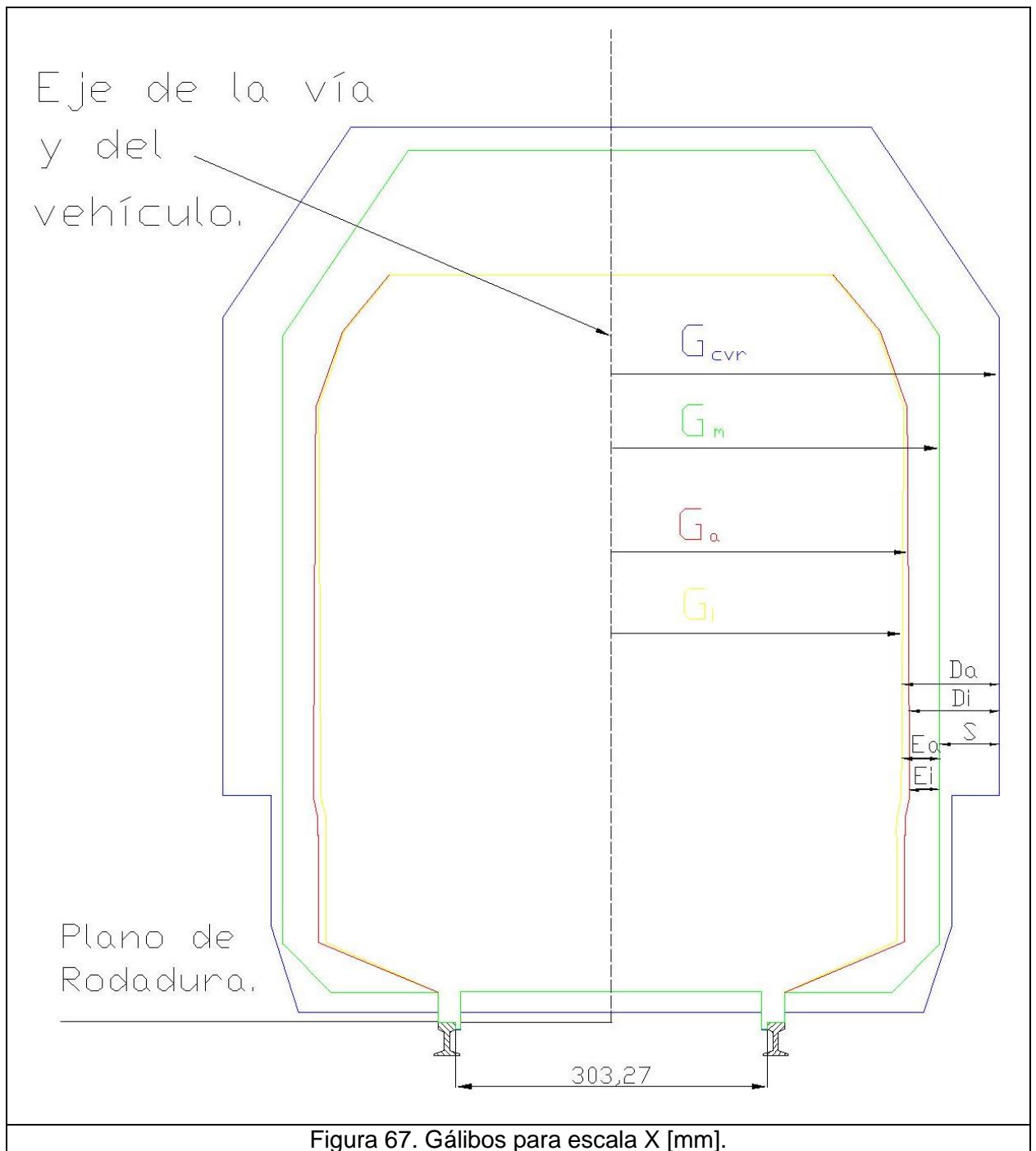


Por último, la siguiente tabla (la tabla 40) recopila los resultados para la escala X (1:5,5).

$h_e$	$G_{ea}$	$G_{mv}$	$E_a$	$G_{ei}$	$E_i$	$G_{cvr}$	$D_a$	$D_i$	$S$
727,273	217,078	280,600	63,521	215,456	65,143	350,883	133,805	135,427	70,284
709,091	232,096	292,914	60,818	230,256	62,658	363,065	130,968	132,808	70,150
690,909	247,296	305,229	57,932	245,238	59,991	375,246	127,950	130,008	70,017
672,727	262,315	320,000	57,685	260,038	59,962	378,200	115,885	118,162	58,200
654,545	268,787	320,000	51,213	266,293	53,707	378,200	109,413	111,907	58,200
636,364	275,260	320,000	44,740	272,547	47,453	378,200	102,940	105,653	58,200
618,182	281,733	320,000	38,267	278,802	41,198	378,200	96,467	99,398	58,200
600,000	288,205	320,000	31,795	285,056	34,944	378,200	89,995	93,144	58,200
581,818	288,315	320,000	31,685	284,947	35,053	378,200	89,885	93,253	58,200
563,636	288,424	320,000	31,576	284,838	35,162	378,200	89,776	93,362	58,200
545,455	288,533	320,000	31,467	284,729	35,271	378,200	89,667	93,471	58,200
527,273	288,642	320,000	31,358	284,620	35,380	378,200	89,558	93,580	58,200
509,091	288,751	320,000	31,249	284,511	35,489	378,200	89,449	93,689	58,200
490,909	288,860	320,000	31,140	284,402	35,598	378,200	89,340	93,798	58,200
472,727	288,969	320,000	31,031	284,293	35,707	378,200	89,231	93,907	58,200
454,545	289,078	320,000	30,922	284,184	35,816	378,200	89,122	94,016	58,200
436,364	289,187	320,000	30,813	284,075	35,925	378,200	89,013	94,125	58,200
418,182	289,296	320,000	30,704	283,965	36,035	378,200	88,904	94,235	58,200
400,000	289,405	320,000	30,595	283,856	36,144	378,200	88,795	94,344	58,200
381,818	289,515	320,000	30,485	283,747	36,253	378,200	88,685	94,453	58,200
363,636	289,624	320,000	30,376	283,638	36,362	378,200	88,576	94,562	58,200
345,455	289,733	320,000	30,267	283,529	36,471	378,200	88,467	94,671	58,200
327,273	289,842	320,000	30,158	283,420	36,580	378,200	88,358	94,780	58,200
309,091	289,951	320,000	30,049	283,311	36,689	378,200	88,249	94,889	58,200
290,909	290,060	320,000	29,940	283,202	36,798	378,200	88,140	94,998	58,200
272,727	290,169	320,000	29,831	283,093	36,907	378,200	88,031	95,107	58,200
254,545	290,278	320,000	29,722	282,984	37,016	378,200	87,922	95,216	58,200
236,364	290,387	320,000	29,613	282,875	37,125	378,200	87,813	95,325	58,200
218,182	290,496	320,000	29,504	282,765	37,235	331,650	41,154	48,885	11,650
200,000	286,060	320,000	33,940	278,111	41,889	331,650	45,590	53,539	11,650
181,818	286,169	320,000	33,831	278,002	41,998	331,650	45,481	53,648	11,650

**Tabla 40. Parámetros característicos en escala X [mm].**

En la siguiente figura (figura 67) se observa cómo se alberga el gálibo estático en los gálibos de referencia proporcionados por la NEM. en escala X.



Una vez obtenidos los diferentes gálibos, según la normativa NEM, se comparan los parámetros característicos de cada escala, con los mismos si fueran calculados según la UIC. Se obtiene la siguiente tabla (tabla 41) donde se comparan las reducciones en escala H0 con los obtenidos por la UIC.



$h$	$E_{UIC}$	$E_{NEM}$	$87 \cdot E_{NEM}$	$87 \cdot E_{NEM} - E_{UIC}$
4000	139,07	5,21	453,45	314,38
3900	138,47	4,88	424,70	286,23
3800	137,87	4,37	379,87	242,00
3700	137,27	3,42	297,27	160,00
3600	136,67	3,01	261,67	125,00
3500	136,07	2,60	226,07	90,00
3400	135,47	2,19	190,47	55,00
3300	134,87	1,78	154,87	20,00
3200	134,27	1,77	154,27	20,00
3100	133,67	1,77	153,67	20,00
3000	133,07	1,76	153,07	20,00

**Tabla 41. Comparación de reducción en escala H0 [mm].**

Al comparar las reducciones obtenidas en la escala H0 (1:87) se observa que la normativa NEM trabaja con gálibos de referencia más amplios que la UIC. Los valores próximos a 4000 [mm] tendrían reducciones innecesarias dadas las proporciones. Por otro lado, los valores cercanos a los 3000[mm] contemplan una diferencia entre las reducciones de 20[mm].

Se comparan también las reducciones obtenidas en la escala X (1:5,5) y se obtiene la siguiente tabla (tabla42):

$h$	$E_{UIC}$	$E_{NEM}$	$5,5 \cdot E_{NEM}$	$5,5 \cdot E_{NEM} - E_{UIC}$
4000	139,07	63,52	349,36	210,30
3900	138,47	60,82	334,49	196,03
3800	137,87	57,93	318,62	180,76
3700	137,27	57,69	317,27	180,00
3600	136,67	51,21	281,67	145,00
3500	136,07	44,74	246,07	110,00
3400	135,47	38,27	210,47	75,00
3300	134,87	31,79	174,87	40,00
3200	134,27	31,69	174,27	40,00
3100	133,67	31,58	173,67	40,00
3000	133,07	31,47	173,07	40,00

**Tabla 42. Comparación de reducción en escala X [mm].**

En la escala X (1:5,5) la normativa NEM trabaja aun con gálibos de referencia más amplios si comparamos las reducciones obtenidas. En este caso se vuelve a obtener diferencias de reducciones muy amplias en alturas cercanas a los 4000[mm], mientras que en alturas cercanas a los 3000[mm] la diferencia se estabiliza en 40 [mm].

## **Capítulo XI: La curva de transición.**

- **Introducción.**
- **Cálculo de una curva de transición AdT según la normativa NEM.**
- **Construcción de una curva de transición según la geometría de la curva clotoide.**
- **Curva de transición clotoide frente a una curva AdT según la NEM.**

# **Capítulo XI: La curva de transición.**

## 11.1- Introducción.

En este capítulo se presenta una comparativa entre las curvas de transición. Por un lado se construirá una curva de transición (AdT) según la normativa NEM. Y por otro lado, se calculará una curva de transición según los parámetros geométricos de la curva clotoide, para un mismo tramo de vía curvo de radio "R". Ambas curvas partirán desde los mismos datos con el objeto de buscar similitudes entre ambas y cómo mejorar la norma NEM. introduciendo la clotoide como opción a una AdT. Las características de las dos curvas están descritas en el capítulo cinco y seis del presente proyecto, por ello directamente se pasará al cálculo sin profundizar en sus características.

Los datos de partida para ambas curvas son los siguientes:

- Radio de curvatura del tramo de vía  $R = 450$  [mm].
- Escala 1:87, lo que pertenece a la llamada escala "HO" según la NEM.
- Ancho de Vía Internacional (1435 [mm]).
- Conjunto de vehículos con cajas menores de 24,2 [m] y distancia entre pivotes de bogie menores de 17,2 [m].

## 11.2- Cálculo de una curva de transición AdT según la normativa NEM.

Según contempla la normativa NEM, previamente al cálculo de la "AdT" se debe obtener tanto el sobredimensionado "E" como su progresión. El sobredimensionado "E" depende del "gálibo de libre circulación en vía recta" por todo ello se detallan los siguientes aspectos.

- Gálibo de libre circulación en vía recta.
- Gálibo de libre circulación en vía curva.
- Progresión del sobredimensionado "E".
- Curva de transición AdT.

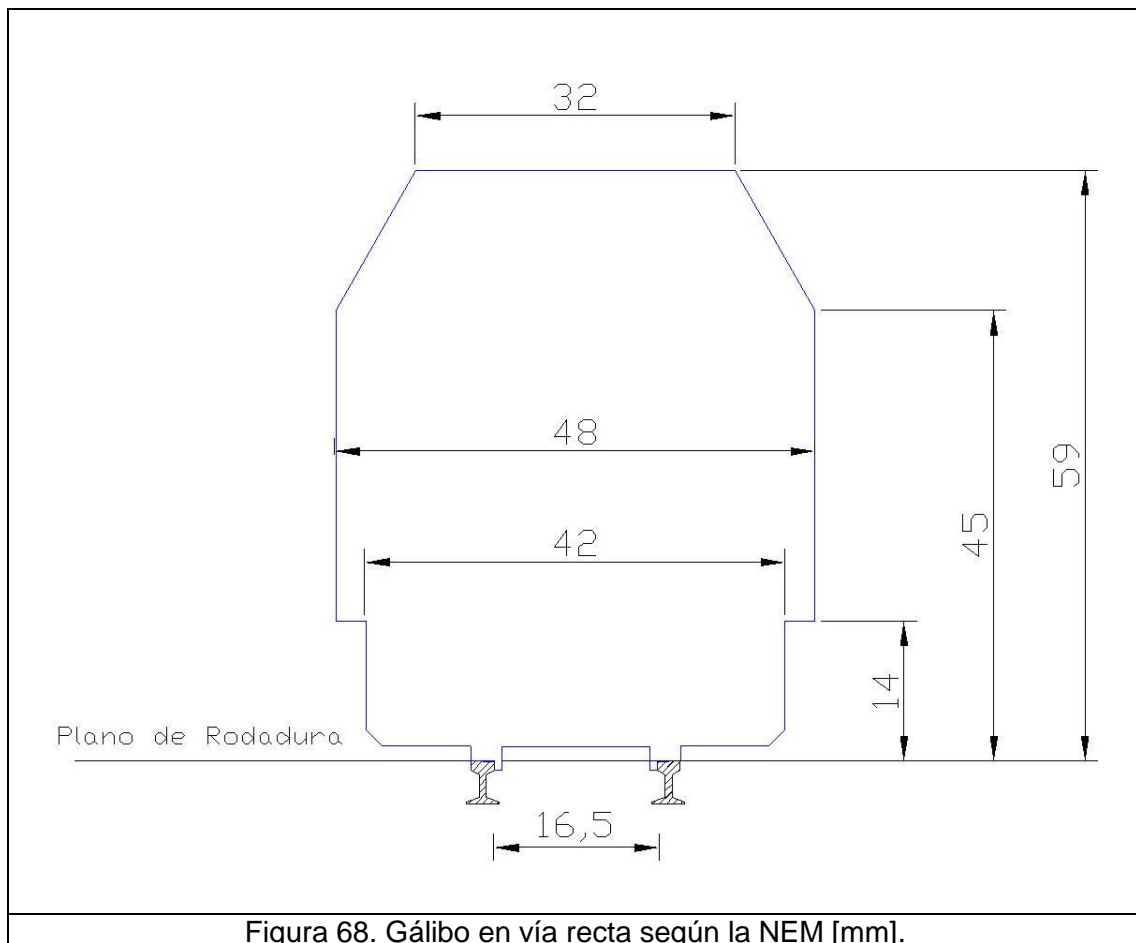
Todas las figuras muestran los datos en milímetros.

11.2.1- Gálibo en vía recta según la normativa NEM.

Según la NEM, para obtener las cotas del gálibo en vía recta se debe seguir la “tabla 1” y “figura 6” que aparecen en el quinto capítulo de este proyecto. Según esto y la escala H0 se obtienen las cotas de gálibo reflejadas en la siguiente tabla (tabla 43).

Cotas Horizontales	Cotas Verticales	Catenaria
<b>G = 16,5</b>	H <sub>1</sub> = 11	B <sub>4</sub> = 38
<b>B<sub>1</sub> = 48</b>	H <sub>2</sub> = 14	B <sub>5</sub> = 30
<b>B<sub>2</sub> = 32</b>	H <sub>3</sub> = 45	H <sub>5</sub> = 65
<b>B<sub>3</sub> = 42</b>	H <sub>4</sub> = 59	
<b>Tabla 43. Cotas para el gálibo de vía recta [mm].</b>		

A partir de estas cotas se obtiene la siguiente figura (figura 68) que representa el contorno del “Gálibo en vía recta” según la normativa NEM.



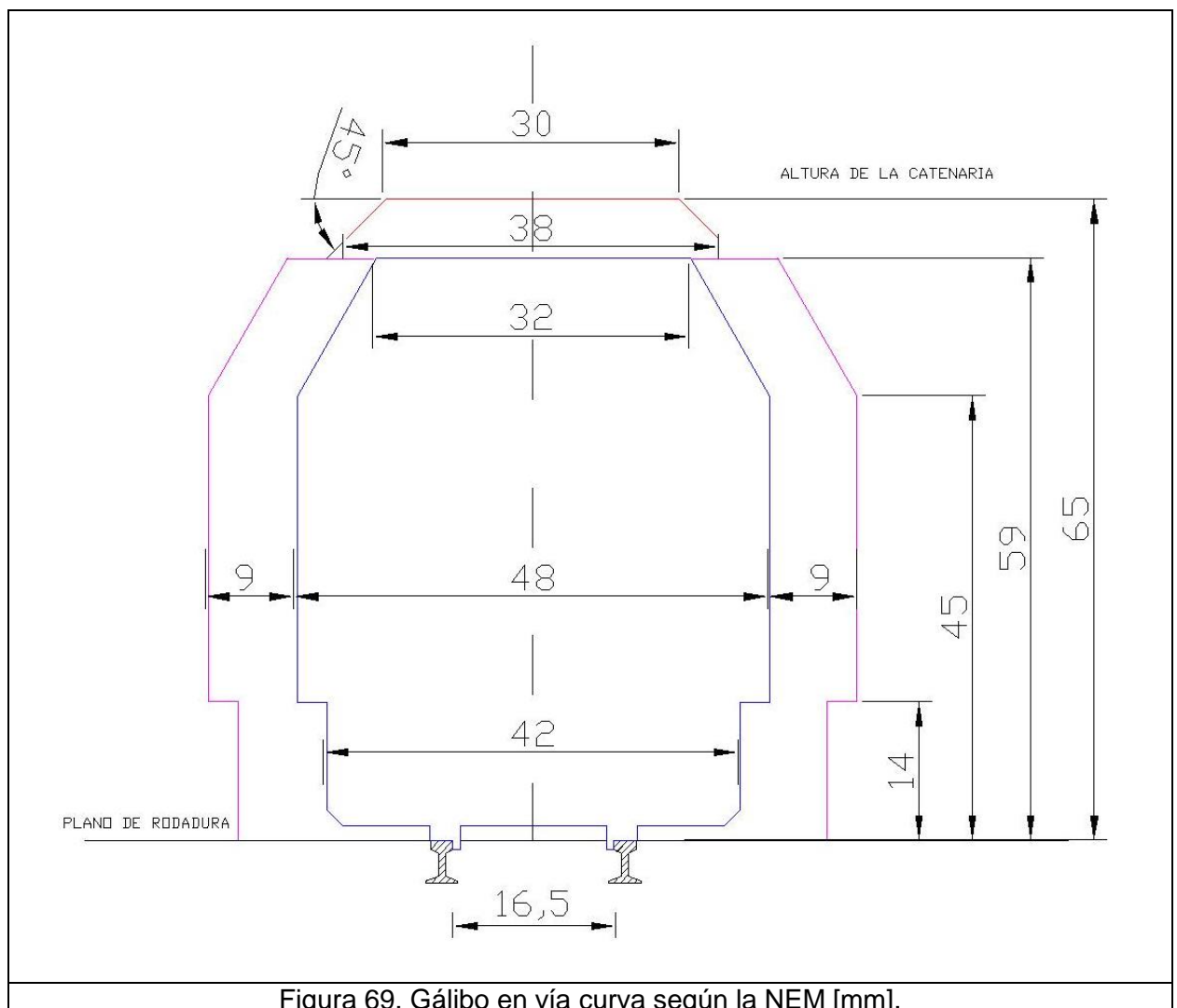
### 11.2.2- Gálibo en vía curva según la normativa NEM.

Para la obtención del “Gálibo en vía curva” la normativa NEM toma como base las cotas obtenidas en el “Gálibo en vía recta” más el sobredimensionado “E” descrito en el apartado 5.8 del presente proyecto. En este apartado se encuentran la tabla 3 y la figura 7, bases para la obtención del sobredimensionado “E”.

La cota “E” depende de tres factores, el grupo, la escala y el radio de curvatura del tramo de vía. El conjunto de vehículos con cajas menores de 24,2 [m] y distancia entre pivotes de bogie menores de 17,2 [m] pertenece al grupo “b” según la normativa NEM. Con esto, la escala H0 y el radio de 450 [mm] la tabla 3 refleja el siguiente sobredimensionado:

$$E = 9 \text{ [mm]}$$

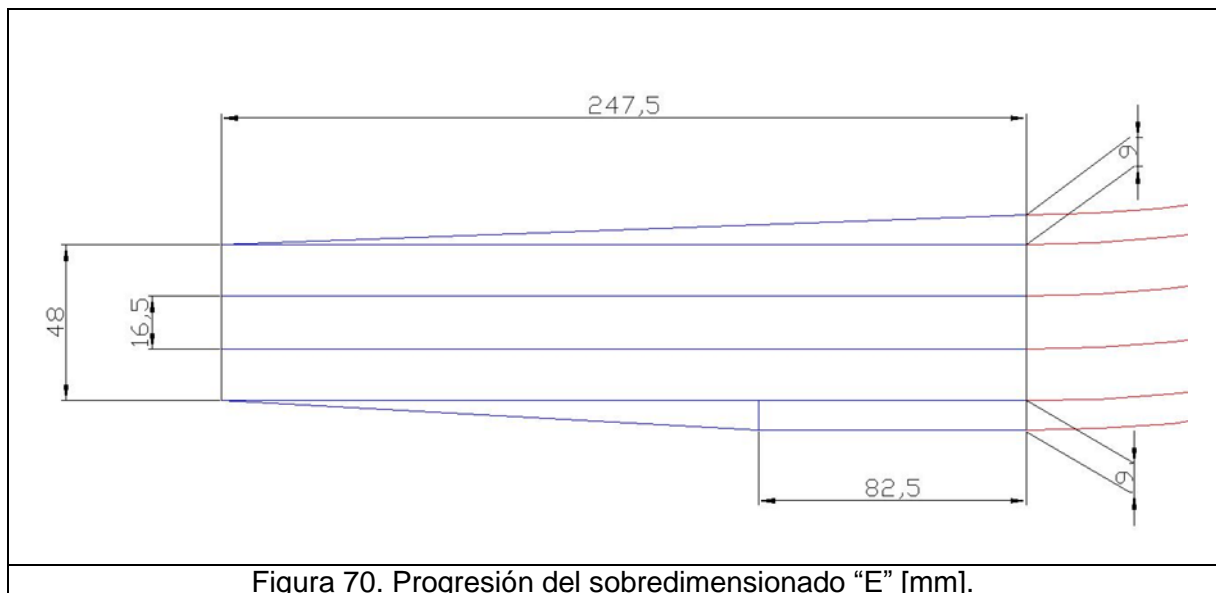
En la siguiente figura (figura 69) se detallan las cotas para el “Gálibo en vía curva” según la normativa NEM para un sobredimensionado  $E = 9 \text{ [mm]}$ .



### 11.2.3- Progresión del sobredimensionado E.

El sobredimensionado “E” según la normativa NEM debe alcanzar su valor de forma progresiva antes de llegar al tramo de vía curva. Teniendo en cuenta la cota “G = 16,5 [mm]” (ancho de vía), por el exterior de la curva, el sobredimensionado “E” debe alcanzarse a una distancia igual o superior a cinco veces el ancho de vía “G” antes de llegar al tramo de vía curva, mientras que por el lado interior la cota “E” se alcanzará después de una progresión que comienza a una distancia de al menos quince veces el ancho de vía “G” y termina al inicio del tramo de vía curva. En otras palabras, la cota “E” se alcanza antes por el exterior del tramo curva que por el interior.

En la siguiente figura (figura 70) se observa la progresión del sobredimensionado “E” para un tramo de vía curva de radio “R = 450 [mm]” La zona azul de la figura representa el tramo de progresión y la zona roja es el tramo de vía curva de radio 450 [mm].



### 11.2.4- Cálculo de la curva de transición AdT.

La curva de transición o arco de transición “AdT” se obtiene con el objetivo de construir un tramo de vía curva de radio 450 [mm]. Para ello, el primer paso es calcular el radio mínimo que puede trazar el vehículo. El vehículo pertenece al grupo “b”, como antes se comentó, por tanto, según la tabla 9 del presente proyecto, el vehículo podrá trazar curvas tales:

$$R \geq 25 \cdot 16,5 = 412,5 \text{ [mm]}.$$

El segundo paso es calcular una “AdT” apropiada para el tramo de vía curvo de radio “R = 450 [mm]”. Las dimensiones que describen una “AdT” son:

- Desviación de la alineación “f”.
- Longitud “L”.

Se utilizará el Método 1, descrito en el capítulo cinco del presente proyecto, utilizando las dimensiones que recomienda la norma NEM según el ancho de vía de  $G = 16,5$  [mm].

$$\text{Si } G = 16,5 \text{ [mm]} \Rightarrow f = 9 \text{ [mm]}.$$

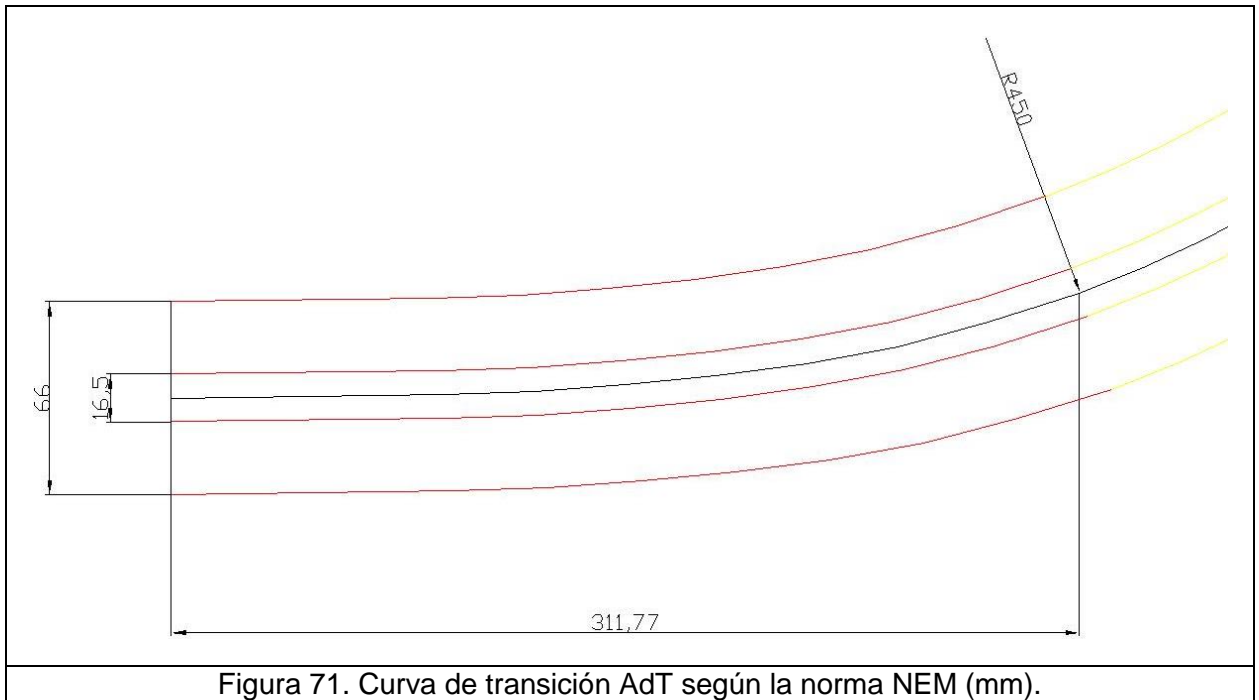
$$L = \sqrt{24 \cdot f \cdot R} = \sqrt{24 \cdot 9 \cdot 450} = 311,7 \text{ [mm]}.$$

A partir de estos valores se puede construir la gráfica cartesiana que representa la curva del “AdT”. Con la ayuda de una hoja de cálculo se obtiene la siguiente figura (figura 71) a partir de las coordenadas de la siguiente tabla (tabla 44).

$x_i$	0	93,53	124,71	155,88	187,06	218,24	249,41	280,59	311,77
$y_i$	0	1,08	2,16	4,50	7,56	11,88	17,64	25,92	36,00

**Tabla 44. Coordenadas del AdT [mm].**

En rojo se observa la curva de transición mientras que en amarillo se representa el tramo de vía curvo de radio 450 [mm]. Al inicio de la curva de transición ya se ha sumado el sobredimensionado “E” al “Gálbo de vía recta” como recomienda la normativa NEM. Para el cálculo de la curva AdT se ha realizado una hoja de cálculo con el fin de poder crear cualquier AdT y estudiarla.



### 11.3- Construcción de una curva de transición según la geometría de la curva clotoide.

La construcción de una curva clotoide no implica ningún tipo de cálculos previos, simplemente con el valor del radio y el punto donde comienza la curva de radio constante del tramo de vía al que se quiere unir es suficiente. En el capítulo seis del presente proyecto se describen las propiedades y características de la clotoide así como la forma en que se obtiene.

Para obtener una comparación óptima, se hará coincidir el punto donde comienza la curva de radio constante de ambas curvas de transición.

$$F = (311.77, 36)$$

Para este punto, se obtiene el punto del centro de la clotoide:

$$C = (155.88, 458.14)$$

La siguiente tabla (tabla 45) resume los datos de la clotoide que se obtienen:

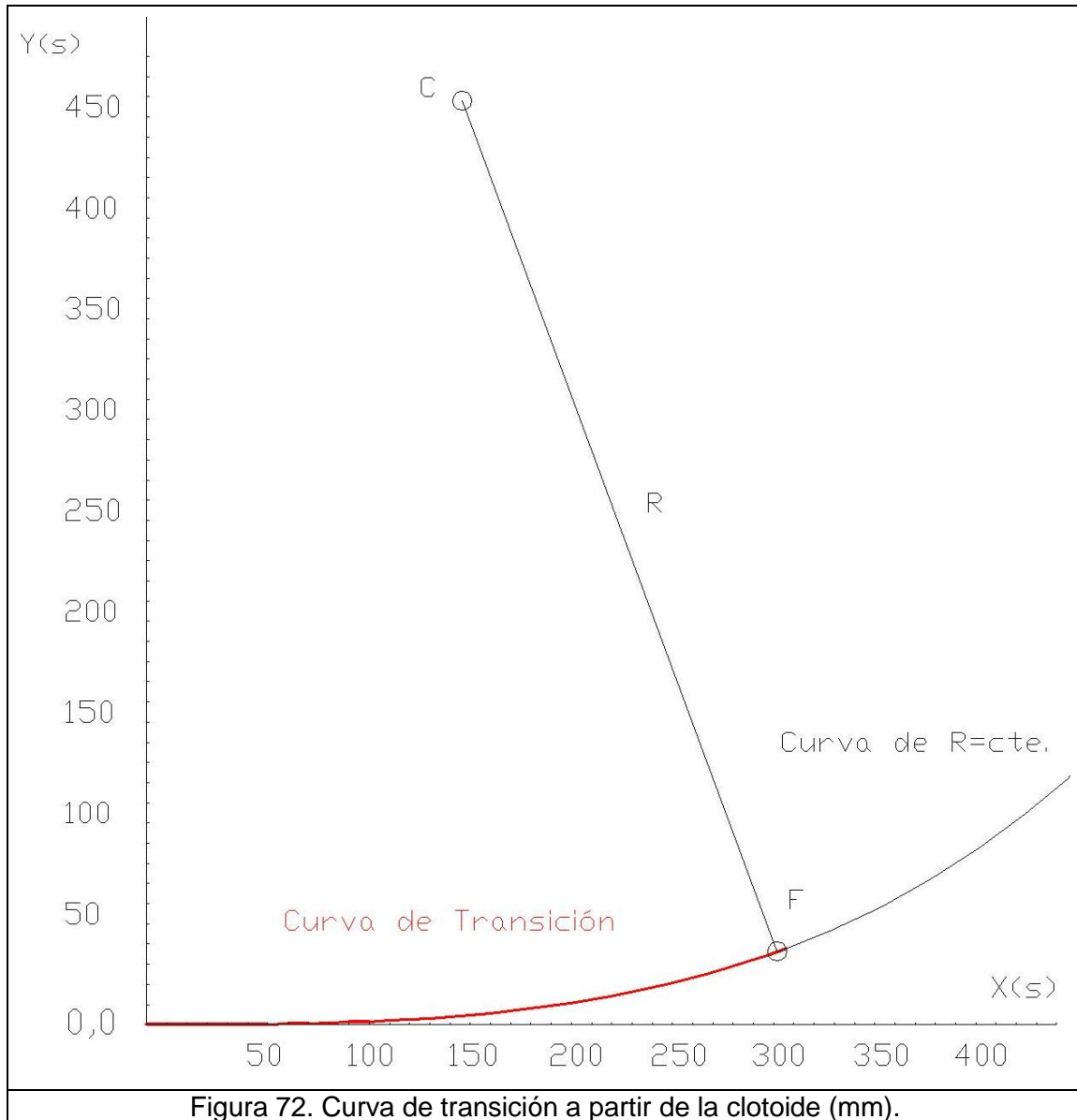
Ángulo girado $\varphi_F$	Longitud de la curva	Parámetro $A^2$
0.3691 [rad]	318.38 [mm]	143271,86
<b>Tabla 45. Valores de la clotoide.</b>		



Con estos valores se construye la siguiente tabla (tabla 46), con las coordenadas cartesianas de los puntos de la clotoide.

<b>x(s)</b>	<b>y(s)</b>
9,9999988	0,00116329
19,9999961	0,00930632
29,9999704	0,0314088
39,9998753	0,07445037
49,9996194	0,1454104
59,999053	0,25126771
69,9979531	0,39899998
79,9960092	0,59558303
89,9928086	0,84798969
99,9878215	1,16318836
109,980387	1,5481412
119,969698	2,00980177
129,954787	2,55511222
139,934512	3,19099993
149,907541	3,92437351
159,872339	4,76211817
169,827154	5,71109034
179,770002	6,77811159
189,698653	7,96996172
199,610618	9,29337097
209,503135	10,7550114
219,373158	12,3614874
229,217342	14,1193248
239,03203	16,0349597
248,813243	18,1147255
258,556669	20,3648396
268,257649	22,791388
277,91117	25,4003096
287,511852	28,197379
297,053945	31,1881885
306,531313	34,3781277
315,937435	37,7723635
<b>Tabla 46. Coordenadas de la clotoide [mm].</b>	

A partir de esta tabla se obtiene la siguiente curva de transición clotoide:



Para la construcción de la clotoide se ha utilizado una hoja de cálculo anexa al proyecto donde se puede obtener la gráfica y las coordenadas de cada punto de la clotoide que se desee.

#### 11.4- Curva de transición Clotoide frente a una AdT según NEM.

Para enfrentar ambas curvas, se comparan los aspectos fundamentales de la curva clotoide, ángulo girado " $\varphi_F$ ", longitud de la curva " $L$ " y parámetro característico " $A^2$ " de las dos curvas. A continuación se calcularán estos aspectos para la curva de transición "AdT" ya que la normativa NEM. no contempla estos parámetros y no va más allá de la construcción gráfica de la curva.

Como se observa en la figura 71, la curva "AdT" tiene una forma similar a la clotoide. Por ello, se van a calcular cuales serían sus aspectos fundamentales como se verán a continuación.

##### 11.4.1- Cálculo de los aspectos fundamentales de la curva AdT.

A partir de los diez puntos que facilita la normativa NEM para la construcción de la "AdT", se puede aproximar esta curva a una función polinómica de orden cinco. Por mínimos cuadrados se obtiene la siguiente función a partir de la construcción de la "AdT":

$$f(x) = -4 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 0,0003 \cdot x^2 - 0,0105 \cdot x + 0,026$$

A continuación se calculará la pendiente " $m$ " que forma esta curva en el punto que una la curva de transición y la curva de radio constante " $F$ ":

$$f'(x) = -20 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 20 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 21 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0,0006 \cdot x$$

$$F = (311.77, 36) \Rightarrow f'(311.77) = 0.39$$

$$m = 0.39 \Rightarrow \boxed{\varphi_F = 0.39 [rad]}$$

Por tanto la longitud de la curva " $L$ " es:

$$L = \varphi_F \cdot 2 \cdot R = 0.39 \cdot 2 \cdot 450 = \boxed{351 [mm].}$$

Y se obtiene el siguiente parámetro característico de la clotoide " $A^2$ ":

$$A^2 = R \cdot L = 450 \cdot 351 = \boxed{157590}$$

#### 11.4.2- Comparación entre curvas y conclusiones.

Si enfrentamos los aspectos característicos de ambas curvas se puede concluir que la normativa NEM. utiliza una curva clotoide para construir las curvas de transición. La siguiente tabla (tabla 47) refleja la aproximación que existe entre sus características fundamentales.

	Clotoide	AdT
$\varphi_F[\text{rad}]$	0.37	0.39
$L[\text{m}]$	0.31	0.35
$A^2$	143271	157590
<b>Tabla 47. Comparación entre Clotoide y AdT.</b>		

El siguiente gráfico (figura 73) enfrenta ambas curvas. Se puede observar que ambas curvas coinciden.

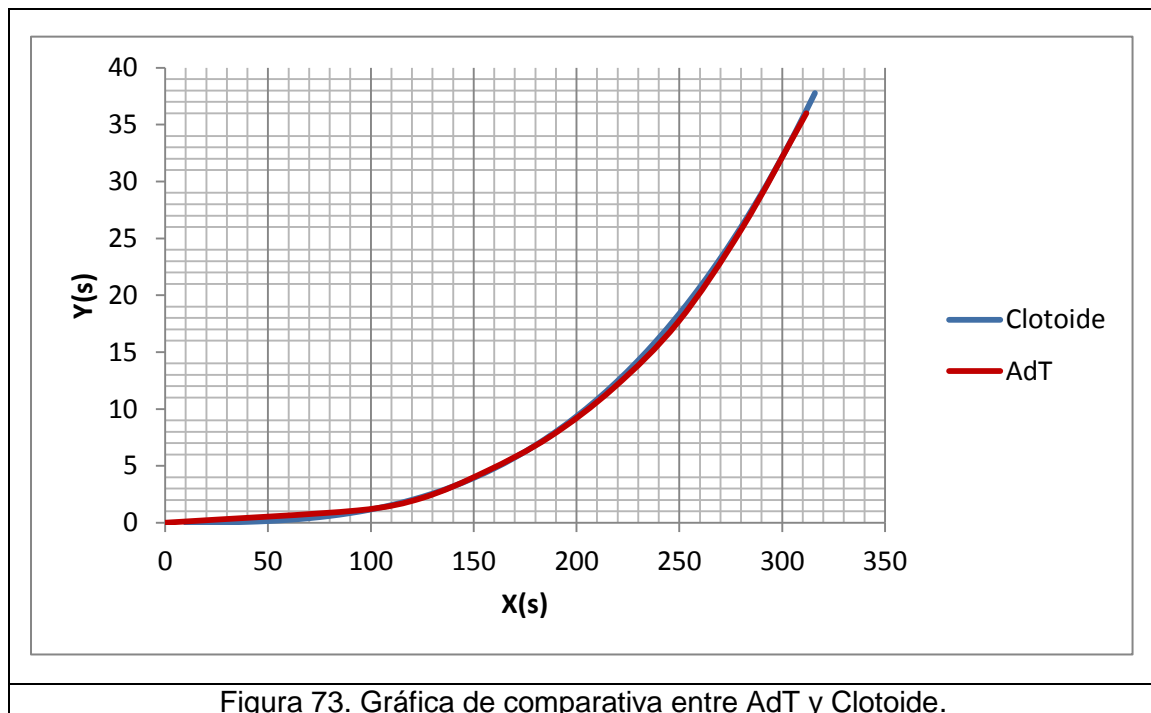


Figura 73. Gráfica de comparativa entre AdT y Clotoide.

## **Capítulo XII: Construcción del peralte.**

- **Introducción.**
- **Peralte teórico.**
- **Casos para el cálculo del peralte.**

## Capítulo XII: Construcción del peralte.

### 12.1- Introducción.

La fuerza centrífuga que sufre un vehículo ferroviario al trazar un tramo de vía curvo se compensa con la elevación del carril exterior de la propia curva, esta elevación se denomina peralte. Como ya se indicó, el peralte según la normativa NEM. sólo realiza la función estética de aproximarse a la realidad. Por ello, dada la importancia de este concepto a la hora de realizar ensayos, se realizará el cálculo del peralte según la UIC adaptándolo a la normativa NEM. Se supondrá que la suspensión del vehículo es infinitamente rígida, es decir, que no existe giro de la caja respecto al eje. En los siguientes apartados se expondrán varios casos en los cuales se modificará la velocidad del vehículo y la escala para obtener el peralte para cada radio de curvatura. Por último se compararán los resultados obtenidos con los peraltes que presenta la normativa NEM.

Escala	Z	N	TT	H0	S	0	I	II
Peralte	0,4	0,6	0,8	1	1,5	2	3	4

**Tabla 48. Peraltes según normativa NEM. [mm].**

### 12.2- Peralte teórico.

Se entiende como peralte teórico o peralte exacto de equilibrio " $D_e$ " aquel en el que la suspensión del vehículo no está sometida a ningún esfuerzo lateral.

$$D_e = \frac{v^2 \cdot l}{R \cdot g}$$

Donde:

- $v$  corresponde a la velocidad del vehículo en [m/s].
- $l$  corresponde al ancho de vía 1,435 [m].
- $R$  es el radio de curvatura del tramo de vía en [m].
- $g$  es la gravedad que equivaldrá a 9,81 [m/s<sup>2</sup>].

### 12.3- Casos para el cálculo del peralte.

En los siguientes casos que se expondrán se ha calculado el peralte teórico a partir de la formula anterior. Tanto el radio, como el ancho de vía y la velocidad se han escalado para obtener la medida del peralte en milímetros.

- Caso I:
  - Escala: Z (1:220).
  - Velocidad real del vehículo: 40 [km/h].
  - Velocidad escalada: 50,50 [mm/s].
  - Radio mínimo practicable según NEM: 163 [mm].
  - Intervalo de radios de curvatura reales [40000-200000] [mm].

Se obtiene la siguiente tabla (tabla 49) de resultados:

Radio real	Radio a escala	Peralte teórico
40000	181,818	0,009
50000	227,273	0,007
60000	272,727	0,006
70000	318,182	0,005
80000	363,636	0,005
90000	409,091	0,004
100000	454,545	0,004
110000	500,000	0,003
120000	545,455	0,003
130000	590,909	0,003
140000	636,364	0,003
150000	681,818	0,002
160000	727,273	0,002
170000	772,727	0,002
180000	818,182	0,002
190000	863,636	0,002
200000	909,091	0,002

**Tabla 49. Peraltes para caso I [mm].**

Como se observa en la tabla anterior, para una escala tan reducida como es la “z” el peralte sería inapreciable. Según la normativa NEM se pueden aplicar peraltes hasta una cota máxima de 0,4 [mm]. Se alcanzaría el peralte máximo si se escala un vehículo que circula a alta velocidad (350[km/h]) en un tramo de vía de radio muy pequeño (  $R \approx 72 [m]$  ) situación inverosímil en el mundo ferroviario. Por tanto, se

puede concluir que el peralte aplicado a la escala “z” por la NEM no es apto para ensayos a escala con peralte.

- Caso II:
  - Escala HO (1:87).
  - Velocidad real del vehículo: 80 [km/h].
  - Velocidad escalada: 255,43 [mm/s].
  - Radio mínimo practicable según NEM: 412,36 [mm]
  - Intervalo de radios de curvatura reales: [40000-200000][mm].

Se obtiene la siguiente tabla (tabla 50) de resultados:

Radio real	Radio a escala	Peralte teórico
40000	459,770	0,239
50000	574,713	0,191
60000	689,655	0,159
70000	804,598	0,136
80000	919,540	0,119
90000	1034,483	0,106
100000	1149,425	0,095
110000	1264,368	0,087
120000	1379,310	0,080
130000	1494,253	0,073
140000	1609,195	0,068
150000	1724,138	0,064
160000	1839,080	0,060
170000	1954,023	0,056
180000	2068,966	0,053
190000	2183,908	0,050
200000	2298,851	0,048

**Tabla 50. Peraltes para el caso II [mm].**

La escala HO marca un peralte máximo de 1 [mm] según la normativa NEM. Para alcanzar este peralte el vehículo ferroviario puede alcanzar los 350 [km/h] y trazar curvas de  $R \approx 190$  [m] o inferiores. En estas condiciones el peralte teórico calculado sería de 0,961[mm].



- Caso III:
  - Escala I (1:32).
  - Velocidad real del vehículo: 160[km/h].
  - Velocidad escalada: 1388,89 [mm/s].
  - Radio mínimo practicable según NEM: 1121,09 [mm]
  - Intervalo de radios de curvatura reales: [40000-200000] [mm].

Se obtiene la siguiente tabla (tabla 51) de resultados:

<b>Radio real.</b>	<b>Radio a escala.</b>	<b>Peralte teórico.</b>
<b>40000</b>	1250,000	7,054
<b>50000</b>	1562,500	5,643
<b>60000</b>	1875,000	4,703
<b>70000</b>	2187,500	4,031
<b>80000</b>	2500,000	3,527
<b>90000</b>	2812,500	3,135
<b>100000</b>	3125,000	2,822
<b>110000</b>	3437,500	2,565
<b>120000</b>	3750,000	2,351
<b>130000</b>	4062,500	2,171
<b>140000</b>	4375,000	2,016
<b>150000</b>	4687,500	1,881
<b>160000</b>	5000,000	1,764
<b>170000</b>	5312,500	1,660
<b>180000</b>	5625,000	1,568
<b>190000</b>	5937,500	1,485
<b>200000</b>	6250,000	1,411
<b>Tabla 51. Peraltes para el caso III [mm].</b>		

El caso III es el caso real que más se aproxima a la normativa NEM. La NEM contempla un peralte máximo de 3 [mm] lo que obligaría a circular por tramos de vía de radios mayores a 100 [m] en escala real.

- Caso IV:
  - Escala X (1:5,5).
  - Velocidad real del vehículo: 160[km/h].
  - Velocidad escalada: 8080,81 [mm/s].
  - Radio mínimo practicable según NEM: 6522,73 [mm].
  - Intervalo de radios de curvatura reales: [40000-200000] [mm].

Se obtiene la siguiente tabla de resultados:

<b>Radio real.</b>	<b>Radio a escala.</b>	<b>Peralte teórico.</b>
40000	7272,727	238,799
50000	9090,909	191,039
60000	10909,091	159,199
70000	12727,273	136,457
80000	14545,455	119,399
90000	16363,636	106,133
100000	18181,818	95,520
110000	20000,000	86,836
120000	21818,182	79,600
130000	23636,364	73,477
140000	25454,545	68,228
150000	27272,727	63,680
160000	29090,909	59,700
170000	30909,091	56,188
180000	32727,273	53,066
190000	34545,455	50,273
200000	36363,636	47,760

**Tabla 52. Peraltes para el caso IV [mm].**

La normativa NEM no contempla los peraltes máximos aplicables para escalas superiores a la II (1:22,5), por tanto para calcular el peralte teórico para escalas superiores a la II (1:22,5), se deberá aplicar el cálculo según la UIC, obteniendo la anterior tabla para el conjunto de radios.

## **Capítulo XIII: Conclusiones.**

La normativa NEM interpreta el gálibo ferroviario desde un punto de vista práctico para el modelismo ferroviario. La normativa abarca y resuelve de forma sencilla muchos de los problemas que se presentan en el cálculo del gálibo, pudiendo realizar un símil entre la realidad y el modelismo. Esta forma que tiene de acercarse a la realidad, se debe al interés del modelismo en conseguir reproducir a escala cualquier elemento ferroviario de la forma más exacta posible.

La normativa NEM satisface la necesidad de uniformidad en escalas, ancho de vía, sistemas de alimentación, enganches y dimensión entre vía y rueda. Problemas a los que diariamente se enfrenta un ingeniero en el mundo ferroviario real. Aunque la forma de afrontarlos, evidentemente, no es la misma. No obstante, uno de los objetivos que se marcaba este proyecto era comprender la normativa NEM y como se acerca esta a la realidad. La NEM, en lo que a gálibo se refiere, contempla un conjunto de normas fáciles de interpretar por cualquier lector. Como ya se vio en el grueso del proyecto, la NEM proporciona una serie de tablas en las cuales, simplemente conociendo la escala a la que se quiere trabajar, se puede reproducir cualquier gálibo, boca de túnel, alturas de catenarias, distancia de entre-vías e incluso curvas de transición. Estas tablas y normas, aunque fáciles de usar, su elaboración conlleva altos conocimientos del mundo ferroviario. Por este motivo, otro de los objetivos de este proyecto era acercarse a la terminología del gálibo ferroviario, conociendo las causas de los movimientos que afectan al vehículo y analizar los parámetros que influyen en la determinación del gálibo.

Una vez analizada la normativa NEM y los aspectos que influyen en el gálibo ferroviario según la UIC, se ha obtenido el gálibo estático de un caso particular real (Tren Regional Diesel) con el fin de comparar los resultados obtenidos de los parámetros característicos del gálibo con la normativa NEM. Al comparar los resultados se observa que la normativa NEM proporciona tres gálibos de referencia, el gálibo de material móvil, el gálibo de libre circulación en vía recta y el gálibo de libre circulación en curva. Cada uno de estos gálibos se equipara con el gálibo cinemático, el gálibo de ocupación estática y el gálibo de ocupación cinemática respectivamente. Siendo todos ellos gálibos de referencia. Esta conclusión se debe a que al calcular el gálibo estático del TRD, se ha comprobado que, en escala, se puede albergar en dichos gálibos de la normativa NEM. De forma que el gálibo de material móvil se puede obtener añadiendo las reducciones al contorno de referencia definido por el gálibo estático. El gálibo de libre circulación en vía recta tiene en cuenta los desplazamientos geométricos, las holguras laterales y los desplazamientos cuasi-estáticos. Y por último el gálibo de libre circulación en curva tiene en cuenta los desplazamientos anteriores del vehículo y los desplazamientos cuasi-estáticos debidos a insuficiencia o exceso de peralte reflejado en el sobredimensionado "E", contemplado en la normativa NEM. No obstante, aunque los valores obtenidos en las reducciones son similares, la normativa NEM cuanta con gálibos más amplios que los reales. No hay que olvidar que la normativa NEM está enfocada hacia el modelismo y a los fabricantes de maquetas ferroviarias.

Por otro lado, se ha estudiado la curva clotoide como curva de transición que une un tramo de vía recto (o de radio infinito) y otro de radio constante. La normativa NEM proporciona las normas necesarias para construir curvas a escala. Para ello hay que estudiar dos aspectos fundamentales, el radio mínimo de curvatura y la curva de transición. El primer aspecto depende del empuje del vehículo, pero el segundo implica una serie de cálculos y normas. Para construir una curva de transición (o AdT como la llama la NEM) se debe estudiar la longitud de la curva y la desviación de la alineación. Con estos dos factores y la tabla 13 del presente proyecto se puede construir la curva "AdT" a partir de la localización cartesiana de nueve puntos. Pues bien, otro de los objetivos que trataba este proyecto era analizar qué tipo de curva de transición contemplaba la NEM. El estudio de la curva concluye que el tipo de curva de transición que utiliza la normativa NEM es la clotoide. La cual tiene características propias para ser el tramo de conexión entre un tramo recto y uno curvo de vía. La clotoide también es la curva de transición más común en las vías ferroviarias. El estudio de la curva clotoide para su posterior construcción y comparación con una AdT requiere su construcción sobre ejes cartesianos. Para tal fin, se propuso la aproximación de la tangente por el polinomio de Taylor. De este modo se compararon las características de ambas curvas concluyendo que se trataba de la misma.

Este proyecto también perseguía la posibilidad de mejorar la normativa NEM para enfocarla hacia el uso experimental con reproducciones a escala. Según el análisis realizado, la normativa NEM podría usarse como base en la construcción de maquetas para ensayos, siempre y cuando se conozcan los errores que se comenten. No obstante se proponen una serie de mejoras en la normativa NEM:

1. Obtener los gálidos de la normativa NEM a partir del gálido cinemático de la vía como referencia.
2. Aplicar el comportamiento cuasi-estático de un vehículo circulando en curva a una velocidad determinada y con una aceleración lateral no compensada para calcular el gálido estático de un vehículo real, como se calculó en el caso del TRD.
3. Construir la curva de transición AdT a partir de la curva clotoide con el fin de obtener mayor número de puntos.
4. Calcular el peralte a escala según el radio de curvatura de la vía, la velocidad, escala y ancho de vía.

Estas cuatro mejoras se lograron como objetivos del proyecto, llegando a la conclusión que para ensayos habría que optar por escalas mayores a la H0 (1:87), ya que en las escalas más pequeñas, la precisión para obtener resultados es demasiado elevada, se tendría que trabajar con valores de  $10^{-6}[m]$ , lo que implicaría costes en la realización de la maqueta muy elevados. La escala I, sería la escala más apropiada para ensayos. Es la escala que mejor se aproxima a la realidad y con la que se podría trabajar con valores de  $10^{-3}[m]$  obteniendo resultados dignos de valorar en los estudios.

Por último, la normativa NEM no contempla ninguna norma para la construcción de gálidos para la escala X (1:5,5). Esta escala es apropiada para la construcción de trenes de jardín, comúnmente llamados "trenes a escala tripulados". No obstante los trenes tripulados más comunes a escala son los de cinco pulgadas (escala V). Dados los resultados obtenidos se puede concluir que para estas escalas la normativa NEM.

no abarca todas las dificultades que se plantean a tales escalas. Por tanto se recomienda utilizar los cálculos de la UIC tanto para la obtención de gálibos como de peraltes, es decir, como si se tratara de un vehículo ferroviario real, tal y como se realizó en el presente proyecto.

## **Capítulo XIV: Trabajos futuros.**

Los resultados y conclusiones de este proyecto pretenden ser la base de futuras líneas de trabajo dentro, tanto del modelismo ferroviario, como en el análisis de maquetas para ensayos. Con el fin de elaborar una norma en base a la normativa NEM que satisfaga las necesidades en el estudio de elementos ferroviarios a escala. Se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Realizar un análisis de los parámetros del Gálibo de Obstáculos y su interacción con el Gálibo de Material.
- Realizar un estudio de la vía y su entorno con el fin de parametrizar el gálibo ferroviario.
- Realizar una simulación mediante programas informáticos de las condiciones del Gálibo de Material. Con el objetivo de comprobar de manera gráfica la evolución de las variables del gálibo.
- Construir la maqueta de un tramo de vía curvo a lo largo de un túnel en base a la normativa NEM. de forma que se respete el gálibo ferroviario.
- Aplicar los efectos del viento en una maqueta construida a partir de la normativa NEM. Con el fin de obtener resultados al aplicar viento lateral sobre la maqueta a la salida de un túnel.
- Introducir los teoremas de rueda-carril (*Teoría de Hertz, Teoría de Johnson and Vermeulen, Teoría lineal de Kalker*) y el concepto de *pseudo-deslizamiento* en la normativa NEM. Con el objetivo de aplicarlo en maquetas.
- Estudiar el gálibo dinámico. Teniendo en cuenta un comportamiento dinámico de la vía y del vehículo ferroviario.

## **Capítulo XV: Referencias.**

- [1] Bilbao, Jon. “Leonardo da Vinci el inventor”. 2006.
- [2] Byrd, Robert. “Leonardo: hermoso soñador”. 2005.
- [3] Ron Hollander. “The Story of Joshua Lionel Cowen & His Lionel Train Company”. 2000.
- [4] Francisco Wais. “Historia de los ferrocarriles españoles. Fundación ferrocarriles Españoles”. 1987.
- [5] Pilar Lozano Carbayo. “El libro del Tren”. 2004.
- [6] Timun Mas. “Modelismo Ferroviario”. 1997.
- [7] Clive Lamming. “El Libro del Modelismo Ferroviario”. 1982.
- [8] Georg Kerber. “22 proyectos de maquetas modelismo ferroviario”. 1998.
- [9] Albert Jackson y David Day. “Manual de Modelismo”. 1995.
- [10] UIC. “Ficha UIC 505/1. Material de transporte ferroviario, Gálipo de construcción de locomotoras”. 1982.
- [11] UIC. “Ficha UIC 505/2. Material de transporte ferroviario, Gálipo cinemático de coches y furgones utilizados en servicio internacional”. 1982.
- [12] UIC. “Ficha UIC 505/3. Material de transporte ferroviario, Gálipo cinemático de vagones utilizados en servicio internacional”. 1982.
- [13] UIC. “Ficha UIC 505/4. Material de transporte ferroviario, Consecuencias de la aplicación de los gálipos cinemáticos definidos en las fichas 505 para la implantación de obstáculos en las vías”. 1988.
- [14] UIC. “Ficha UIC 505/5. Material de transporte ferroviario, Comentarios a las fichas 505”. 1993.
- [15] UIC. “Ficha UIC 505/1. Material de transporte ferroviario, Gálipo de construcción de material rodante”. 2002.
- [16] RENFE. “Instrucción técnica, Gálipo de la Red. RENFE”. 1985.
- [17] Gerard Llort. “Normas NEM de modelismo ferroviario, Railwaymania magazine, Número 13”. 2007.
- [18] MOROP. “Normas Europeas de Modelismo, edición castellana”. 2010.
- [19] NEM 010. “Escalas, factores de reducción y anchos de vía”. 2011.

- [20] NEM 102. "Gálibo de libre circulación en vía recta". 2003.
- [21] NEM 103. "Gálibo de libre circulación en curvas". 2004.
- [22] NEM 301. "Gálibo del material móvil".2003.
- [23] Julio Álvarez Rodríguez. "Ingeniería Ferroviaria, tomo 1". 2010.
- [24] Julio Álvarez Rodríguez. "Ingeniería Ferroviaria, tomo 2". 2010.
- [25] M<sup>a</sup> Ángeles Domínguez Sánchez. "Replanteos de obra: curva de transición, clotoides". 2009.
- [26] Luís Blanch, Emilio Checa, Josefa Martín. "Modelling in Science Education and Learning, Volumen 6". 2013.
- [27] Julio Álvarez Rodríguez. "Parametrización del gálibo de material ferroviario." 2006.
- [28] J. Alias. "La vía del Ferrocarril". 1984.
- [29] Alejandro Álvarez Stein. "Técnica Ferroviaria"2013.
- [30] L. Knothe. "Interaccion of railway veicles with the track and its substructure". 1994".
- [31] José Luis Arques Patón. "Ingeniería y gestión del mantenimiento en el sector ferroviario". 2008.
- [32] Kanji Wako. "Railway technology today". 2003.
- [33] Andrés López. "Líneas de Ferrocarril de alta velocidad". 2014.
- [34] Xuesong Jin y Zefeng Wen. "Effect of passenger car curving on rail corrugation at a curved track". 2006.
- [35] Julio Fuentes Losa. "Ingeniería del transporte".2012.
- [36] Página Web. [www.aecientíficos.es](http://www.aecientíficos.es). Sep/2014.
- [37] Vicent Ferrer Hermenegildo. "Del tramway al ferrocarril, la línea Carcaixent-Dénia".2010.
- [38] Página Web. [www.aar.org](http://www.aar.org). 2014.
- [39] Página Web. [www.renfe.com](http://www.renfe.com). 2014.
- [40] Página Web. [www.ffe.es](http://www.ffe.es). 2014.
- [41] Página Web. [www.museodelferrocarril.org](http://www.museodelferrocarril.org). 2014.
- [42] Página Web. [www.modalohr.com](http://www.modalohr.com). 2014.
- [43] Página Web. [www.railway-technology.com](http://www.railway-technology.com). 2014.



## ANEXO : ETIQUETA DEL MOROP.

NEM	Material rodante		Vía		Accesorios
	I	II	I	II	
NEM 010		X	X		X
NEM 102					X
NEM 103					X
NEM 110			X	X	
NEM 124			X	X	
NEM 127			X	X	X
NEM 201					X
NEM 202	X	X			
NEM 301	X	X			
NEM 303	X	X			
NEM 304	X	X			
NEM 310	X	X			
NEM 311	X	X			
NEM 352	X	X			
NEM 355	X	X			
NEM 356	X	X			
NEM 360	X	X			
NEM 362	X	X			
NEM 380	X	X			
NEM 621	X	X			
NEM 624	X	X			
NEM 630	X	X			
NEM 631	X	X			
NEM 650 – 654	X	X			
NEM 658	X	X			
NEM 659	X	X			
NEM660	X	X			
NEM 670					X
NEM 671					X