

---

# *Estado del Arte y Análisis de la tecnología de sistemas de “Carril Embebido” en el año 2008*

---

AUTORES: *D. Ricardo Insa Franco*  
*Profesor Titular de Ferrocarriles, Universidad Politécnica de Madrid*  
*ricardo.insa@upm.es*

*D<sup>a</sup>. Julia I.Real Herraiz*  
*Profesor colaborador, Universidad Politécnica de Valencia*  
*jureaher@tra.upv.es*

## **1 INTRODUCCIÓN**

---

Desde el siglo XIX, el transporte público ferroviario ha sido parte integrante de los entornos urbanos de las principales ciudades del mundo, habiendo evolucionado constantemente desde los primeros tranvías, tirados por caballos, hasta los más avanzados sistemas de transporte metropolitano, con vehículos traccionados eléctricamente.

Tras la II Guerra Mundial se produce una extensión masiva del uso del automóvil. Bajo la filosofía de que “mi coche es mi libertad”, los años sesenta del siglo pasado se convierten en la época dorada de la expansión del transporte privado. La demanda de transporte público ferroviario disminuye, mientras la cuota de uso del vehículo privado en el transporte se incrementa enormemente. Como resultado de este proceso, en la mayoría de las principales ciudades se produce una decadencia acelerada de



**Figura 1. Ejemplo de actuaciones asociadas al desarrollo de un transporte tranviario**

las infraestructuras, sobre todo de las tranviarias. Sin embargo, conviene señalar que en algunas de ellas, a pesar de esta caída en la demanda, se mantuvo la red tranviaria, si bien a costa de una reducción significativa de prestaciones y mantenimiento.

Prácticamente desde sus comienzos, una de las señas de identidad del transporte tranviario ha sido la posibilidad de compartir la superficie de rodadura (el viario público normalmente) con otros medios de transporte urbanos, como son el tráfico rodado (automóviles, autobuses, bicicletas, etc). Ello es posible dado que los carriles de guiado de los tranvías se encuentran, en mayor o menor medida, integrados en la plataforma viaria. Esta disposición, relativamente rudimentaria en aquellos tiempos, se conoce como “Carril Embebido” tradicional<sup>1</sup>.

A partir de los condicionantes históricos apuntados anteriormente, el desarrollo de la tecnología del Carril Embebido sufrió una paralización drástica desde finales de los años sesenta, en sintonía con la decadencia del transporte público en general. Pero, a finales de la década de los ochenta, a raíz del gran desarrollo urbano, comienza a producirse, en paralelo, una especial sensibilización ante los elevados costes medioambientales que se producen como consecuencia del desbordado volumen del tráfico rodado. Esta sensibilización supone, en definitiva, una internalización por parte de la sociedad de determinados costes, por lo que en numerosos foros de decisión política se comienza a suscitar la necesidad de contar con sistemas de transporte públicos sostenibles.

Así, entre los sistemas de transporte público, el de tipo ferroviario, traccionado con energía eléctrica (es decir, el “viejo y buen tranvía”), se presenta como la alternativa con mejores ratios de eficiencia energética y sostenibilidad, a la vez que capaz de combinar grandes niveles de calidad en cuanto a accesibilidad, regularidad, seguridad y velocidad, siempre que se realice un diseño funcional adecuado.

Derivada del relanzamiento de la política de transporte tranviario, surge la necesidad de actualizar la tecnología de las infraestructuras para poder satisfacer los requerimientos de la sociedad moderna en términos de servicio respecto de la movilidad, pero también teniendo en cuenta la integración medioambiental y exigiéndole un altísimo nivel en cuanto a:

- Sostenibilidad.
- Máxima disponibilidad de las infraestructuras.
- Reducción del coste del ciclo de vida (eficiencia de costes, durabilidad, bajo nivel de las necesidades de mantenimiento)
- Minimización en la afección sonora durante la construcción y la explotación.
- Contribución a un entorno limpio y agradable con respecto al urbanismo.

---

<sup>1</sup> Los posteriores avances incorporados a esta tipología de vía darán lugar a lo que hoy conocemos como sistema de Carril Embebido

En este sentido, las actuaciones emprendidas han sido desarrolladas dentro de un marco de estructuración de la ciudad, buscando crear espacios más habitables, incorporando espacios verdes, abriendo nuevos espacios al peatón, eliminando barreras arquitectónicas, al tiempo que se respetaba el entorno histórico de las ciudades.

Bajo este nuevo punto de vista, hay que reconocer que la infraestructura tranviaria no había conocido más que una mínima evolución desde la primera aparición del material móvil eléctrico. El “renacimiento” del sistema tranviario, con el impulso de las administraciones públicas, constituyó el hito a partir del cual las tecnologías de la infraestructura comenzaron un nuevo desarrollo.

Las nuevas políticas de transporte se iniciaron con el convencimiento de que para lograr el éxito y consolidarlo, debería poder garantizarse unos altos niveles de servicio en cuanto a seguridad, velocidad y frecuencia. Como resultado, parte de las vías públicas se destinan exclusivamente al transporte público (tranviario o combinado tranviario-autobús). La modernidad de estos nuevos sistemas se han manifestado a nivel de la construcción de la infraestructura del camino de rodadura, de la aparición de nuevos vehículos, equipados con todo tipo de servicios y que en nada se parecen a los antiguos tranvías, modelos complejos de explotación y estructuras de financiación tendentes a promover la iniciativa público-privada.

En la actualidad son numerosas las ciudades que han emprendido la aventura de potenciar un transporte ferroviario urbano sostenible, dando lugar a una amplia tipología. En el presente artículo se pretende dar un repaso a un solo aspecto de los citados, en concreto al que se refiere a la construcción del camino de rodadura, con la idea de que pueda servir de referencia para los numerosos proyectos que se están desarrollando y los que en un futuro se iniciarán, quedando los autores, como no podía ser de otra manera, abiertos a las sugerencias de todo aquel que quiera ampliar o corregir la información, con el único objetivo de servir a la sociedad colaborando en la estructuración de la información de este tipo de sistemas de transporte.

El nuevo reto del tranvía moderno ha obligado a definir requerimientos técnicos específicos con objeto de integrar estas “nuevas infraestructuras” para mayores velocidades en un tejido urbano con características, fundamentalmente en cuanto a los materiales de los pavimentos, las cargas y los tipos de tráfico, sustancialmente distintas a las del S.XIX. Una solución de transporte integrado en una ciudad sin barreras lleva a un denominador técnico común a todos los sistemas de vía, que va a resultar ser el de Carril Embebido, es decir, el carril dispuesto dentro de la plataforma viaria, quedando su parte superior enrasada total o parcialmente con la superficie circundante de dicha plataforma.

Así, el “Estado del Arte” actual en cuanto al sistema de Carril Embebido presenta las siguientes variantes:

- **Vía multimodal:** con diversos acabados superficiales para la plataforma viaria, bien elásticos (pavimento de hormigón cepillado, impreso, desactivado, adoquinado), o bien, plásticos (tarmac/asfalto). Se trata de una solución característica para líneas de transporte combinado tranvía-autobús, cruces de ambos, plataformas multimodales de carga, vías con posible uso multimodal (aquellas que siendo tranviarias, han de posibilitar la circulación de determinados vehículos en situaciones de emergencia).
- **Vía especializada/segregada:** únicamente para uso de tranvía o metro ligero. Puede presentar distintos acabados superficiales, como césped (definida comúnmente por los urbanistas como “vía verde”), adoquín tradicional o algunos tipos de hormigón.

En el presente documento sobre el estado de la tecnología se detalla la evolución experimentada tanto en el diseño como en los procesos constructivos de las distintas innovaciones técnicas producidas en la tecnología del Carril Embebido, desde su nacimiento (finales de S. XIX) hasta el momento actual (año 2008). Para esta primera referencia se ha tomado como base técnica la documentación existente sobre los sistemas de Carril Embebido presentes en el mercado (ver referencias en el epígrafe 5.1).

## **2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CARRIL EMBEBIDO**

---

Con objeto de ilustrar sobre la evolución técnica de los diversas familias del sistema de Carril Embebido (ver epígrafe 3) es necesario señalar los elementos esenciales y su funcionalidad en la superestructura de vía en este tipo de tecnología del camino de rodadura:

- a) Tipo de carril
- b) Sujeción del carril
- c) Tipo de elemento soporte del carril
- d) Naturaleza de la base de la superestructura de vía
- e) Confinamiento del carril en el sistema de Carril Embebido
- f) Rigidez de la suela bajo carril
- g) Proceso constructivo (fases y velocidad)
- h) Protección del carril frente a corrientes vagabundas

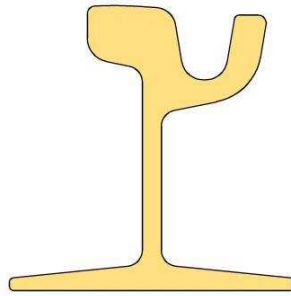
Todos estos elementos o circunstancias juegan un papel destacado en la funcionalidad global del sistema de Carril Embebido.

## 2.1 Tipo de carril

---

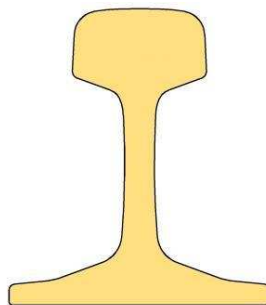
La función esencial del carril es la de resistir los esfuerzos en el contacto con la rueda y transmitir las cargas de la misma hacia el elemento de apoyo del que disponga. Éste está constituido por acero (calidad 700 o superior). En general, se emplean dos tipos de carril para constituir el Carril Embebido:

- Carril de garganta: con alturas comprendidas entre 130mm y 180mm, y con anchura de patín entre 130mm y 180mm; normalmente en este carril la altura y la anchura coinciden en magnitud; el ancho de garganta varía entre 35mm y 71mm. Generalmente, resulta la alternativa más adecuada para el sistema de Carril Embebido y, por lo tanto, es el más difundido; dispone de una garganta que permite, por una parte, el guiado de la pestaña de la rueda por la cabeza del carril y, por otra, la protección de la cara interna de la rueda por la otra cara vertical de la garganta, a modo de contracarril, desempeñando de este modo una función activa en la estabilidad global del sistema, así como en su durabilidad.



**Figura 2. Ejemplo de perfil del carril de garganta**

- Carril Vignole: con alturas comprendidas entre 140mm y 170mm y con anchura de patín entre 125mm y 150mm; este carril es normalmente más alto que ancho. Se puede emplear en el sistema de Carril Embebido, aunque su principal desventaja es que al no disponer de garganta, ésta tiene que materializarse en los elementos adyacentes al carril que normalmente forman parte del confinamiento de éste, o bien mediante un contracarril adicional. Es más ligero que el de garganta.

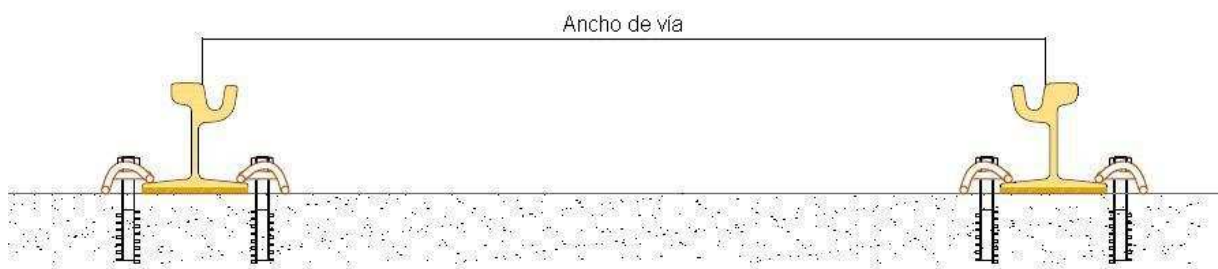


**Figura 3. Ejemplo de perfil de carril Vignole**

## 2.2 Sujeción del carril

El carril ha de estar fijado a los elementos de apoyo en la superestructura de vía, básicamente con los fines siguientes:

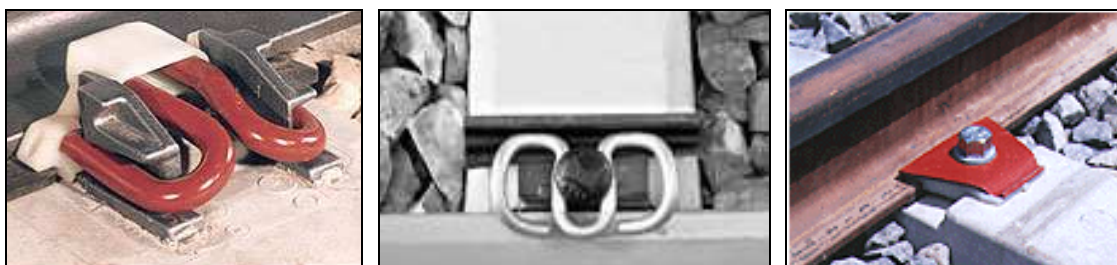
- Mantener su ubicación bajo la acción de las cargas (material móvil, efectos térmicos,...)
- Evitar el vuelco lateral bajo la acción de fuerzas laterales
- Evitar la elevación del carril
- Conservar el ancho de vía



**Figura 4. Ejemplo de sujeción directa de carril**

Para desarrollar las funciones anteriores, las tecnologías clásicas se han basado en sujeciones de tipo mecánico, dotadas de una capacidad elástica en su acción de fijación. De este modo, bajo la acción de las cargas, los pequeños movimientos del carril son absorbidos por los distintos elementos elásticos de la sujeción, que en todo momento debe mantener la fuerza de apriete necesaria sobre el patín del carril, gracias a esa elasticidad. A su vez, la sujeción se encuentra fijada a los elementos soporte de la superestructura de vía mediante los anclajes correspondientes.

Existe una amplia variedad de sistemas de sujeción. Aquí se citan algunos de los más comúnmente empleados, como son los diseñados por Pandrol (Fastclip), Vossloh (W-Tram) y Nabla. En general, este tipo de sujeciones está formada por una serie de elementos muy diversos con funciones específicas en cuanto a la elasticidad y el aislamiento.



**Figura 5. Sujeciones de Pandrol (Fastclip), Vossloh (W-Tram) y Nabla**

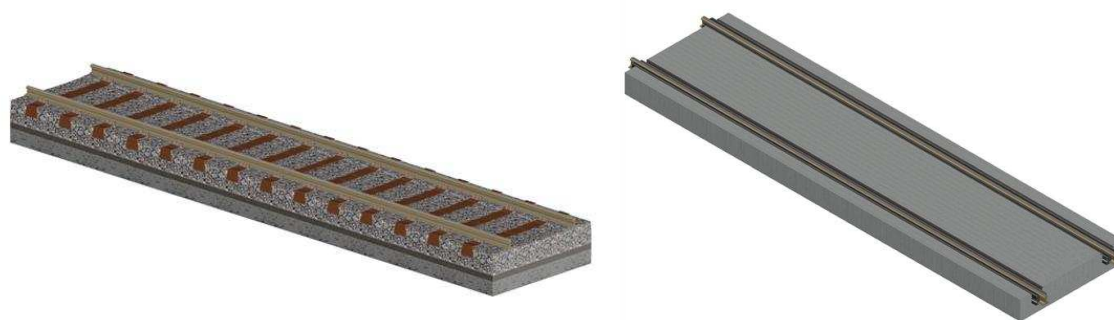
Como alternativa a esta configuración, hace algunos años se concibió una nueva solución para fijar el carril a la superestructura de vía, evitando las sujeciones mecánicas, aprovechando directamente la

forma y rigidez de la propia superestructura de vía, en su zona adyacente al carril, para ejercer esa función (normalmente se trata de una acanaladura donde se aloja el carril en la losa de hormigón). Surge de este modo el concepto de sistema de Carril Embebido, como una superestructura de vía integrada en la que el elemento soporte del carril rodea a éste, embebiéndolo y sujetándolo simultáneamente, constituyendo así una tecnología sin sistema de sujeción o de "sujeción propia" de la superestructura de vía donde un solo elemento (el producto de embebido) se encarga de desarrollar todas las funciones de una sujeción (ver imágenes en epígrafe 3.4).

### 2.3 Tipo de elemento soporte del carril

---

El elemento soporte del carril tiene la misión de distribuir las cargas que le transmite el carril, provenientes del material móvil o de los efectos térmicos. Las dos grandes familias de elementos soporte se diferencian por estar constituidas bien por apoyos discretos o bien por un apoyo continuo del carril.



**Figura 6. Elemento soporte discreto (izquierda) y continuo (derecha)**

En el caso de los elementos soporte discretos siempre se aplican sujeciones mecánicas; así, los apoyos discretos son los puntos en los que se manifiesta la elasticidad cuando se producen los pequeños movimientos del carril. Normalmente son del tipo denominado de traviesa o bloque y se disponen a una distancia entre sí que varía entre 600 y 1000 mm.

En el caso de los elementos soporte continuos, el carril puede fijarse, tanto mediante sujeciones mecánicas, como con tecnología sin sistema de sujeción.

### 2.4 Naturaleza de la base de la superestructura de vía

---

La superestructura de vía está constituida, además del carril y su elemento soporte, por una base de apoyo del conjunto. La función primordial de la superestructura es distribuir las cargas desde el carril hacia el terreno o sustrato sobre el que se encuentra la vía.

En el sistema de Carril Embebido la naturaleza de la base de la superestructura puede ser de dos tipos:

- Vía sobre balasto. El lecho del emparrillado (conjunto carril-traviesa) está constituido por una capa de piedra, denominada balasto, con unas características determinadas en cuanto a la homogeneidad de los elementos que la constituyen. El balasto proporciona la elasticidad necesaria bajo las traviesas de forma que se mantenga la geometría de la vía y se distribuyan las cargas hacia la plataforma o sustrato. Con objeto de garantizar estas propiedades son necesarias operaciones periódicas de mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida.



**Figura 7. Vía sobre balasto**

- Vía en placa o sin balasto. En este caso la superestructura de vía está constituida por el carril, apoyado sobre una losa de hormigón armado con un espesor entre 250 y 300 mm, disponiéndose entre ambos una serie de elementos de apoyo de tipo elastómero para conseguir la elasticidad adecuada y compensar la rigidez del hormigón. El mantenimiento es mucho menor en este caso.



**Figura 8. Vía en placa o sin balasto**



## 2.5 Confinamiento del carril en el sistema de Carril Embebido

---

Un aspecto esencial en el sistema de Carril Embebido, al encontrarse éste total o parcialmente a ras de la superficie circundante de la superestructura, es la forma de garantizar el confinamiento del carril de manera “hermética” respecto a los distintos tipos de acabado superficial:

- Baja rigidez (módulo de Young muy bajo) como césped o piedra de balasto.
- Baja adherencia con comportamiento plástico y rigidez media (módulo de Young entre 4.000 y 6.000 MPa), como tarmac/asfalto o pavimento de adoquines sobre capa de arena.
- Alta rigidez y adherencia con módulo de Young análogo al hormigón (impreso, desactivado, cepillado) o adoquinado de hormigón (módulo de Young mayor de 25.000 MPa).

La geometría del perfil del carril, con grandes curvaturas y formas salientes/entrantes respecto del eje vertical del alma, dificulta el correcto acoplamiento y adherencia para lograr un confinamiento “hermético” del carril en la superestructura de vía. Esto se resuelve mediante el vertido de materiales viscosos, o eventualmente rígidos, como hormigón o asfalto, que rellenan los espacios entre las curvaturas del carril, garantizando de este modo la fijación del carril en su confinamiento en la base de la superestructura (normalmente una losa de hormigón).

Otro modo de confinar el carril de una manera “hermética” es acoplar en la zona del alma una serie de elementos longitudinales elásticos, cubriendo los espacios ya citados y materializando así un contacto continuo con la base de la superestructura, como en el caso anterior.



**Figura 9. Elementos elásticos**

Una situación sustancialmente distinta se presenta cuando el carril no se halla totalmente enrasado con la superficie. En este caso se disponen capuchones de plástico sobre la sujeción con objeto de protegerlas frente al acabado superficial.



**Figura 10. Capuchones de protección sobre las sujeciones de carril**

## 2.6 Rigidez de la suela bajo carril

---

Dado que el elemento soporte del carril es normalmente muy rígido (traviesas o losa de hormigón), se dispone entre ambos un elemento intermedio de naturaleza elástica, a modo de suela de material elastómero. La rigidez de este elemento es una característica fundamental en el sistema de Carril Embebido. Dicha rigidez se define como el ratio entre carga y deflexión resultante (MN/m o kN/mm), o bien, como un módulo de carril en MN/m/m de carril, es decir una rigidez por metro de carril. Esta rigidez influye fundamentalmente en los dos siguientes aspectos:

- Asegurar la correcta transmisión y distribución de cargas hacia la base de la superestructura de vía, garantizando así la funcionalidad y vida útil del sistema.
- Reducir la transmisión de vibraciones generadas por la interacción rueda-carril.

En general, cuanto menor es la rigidez de la suela bajo carril, el sistema de Carril Embebido absorbe mayores deflexiones, con lo que las vibraciones transmitidas al entorno resultan menores.

Normalmente, para definir la rigidez de la suela bajo carril, se tienen en cuenta factores como la estabilidad de la vía, el mantenimiento, la posibilidad de interacción con otros modos de transporte sobre la misma base de la superestructura, el acabado superficial y la emisión de ruido y vibraciones.

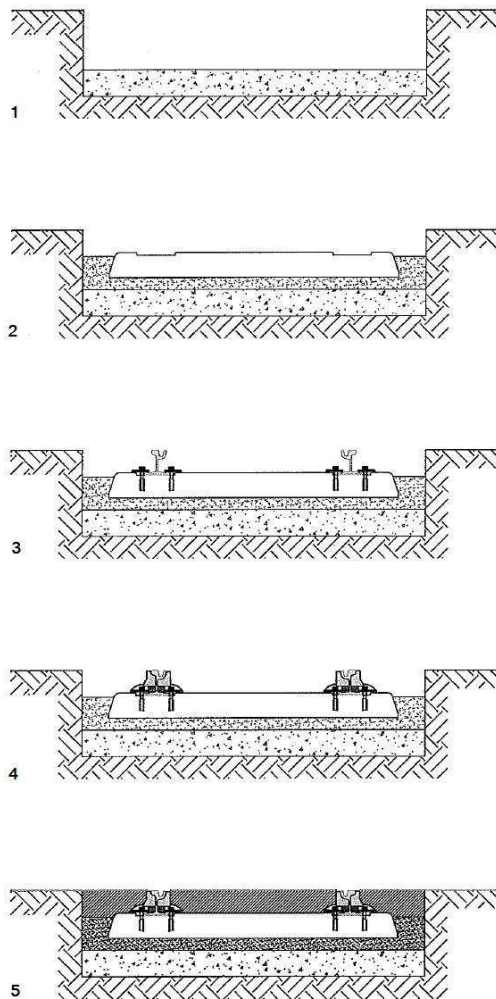
## 2.7 El proceso constructivo (fases y velocidad)

---

Por ultimo, como cuestión fundamental del sistema de Carril Embebido actual es importante señalar algunos aspectos del proceso constructivo, tanto para la implantación de nuevas infraestructuras como para la renovación y el mantenimiento de las existentes.

Aquellas técnicas que permiten reducir los tiempos de intervención en el viario público, suponen menores niveles de afección al entorno, en forma principalmente de ruido y de todas aquellas molestias que las obras generan en las ciudades. Ello coadyuva a potenciar el concepto de un transporte público sostenible.

A continuación se indican las operaciones básicas que comporta la construcción de un sistema de Carril Embebido:



- Operación nº1: ejecución de la cimentación, que comprende las excavaciones necesarias y la preparación de una explanación o presolera de hormigón con la capacidad portante requerida.
- Operación nº2: configuración de la base de la superestructura de vía (losa de hormigón armado) así como del eventual elemento soporte del carril (traviesas, bloques o la propia losa de hormigón armado).
- Operación nº3: montaje del carril, suela elástica y sujeciones.
- Operación nº4: instalación de los elementos elásticos adosados al alma, de confinamiento del carril y protección frente al acabado superficial.
- Operación nº5: ejecución del acabado superficial.

**Figura 11. Operaciones en la construcción de un sistema Carril Embebido**

## 2.8 Protección contra corrientes vagabundas

---

Las corrientes vagabundas han sido un tema recurrente de discusión desde el renacimiento de las modernas infraestructuras tranviarias urbanas, allá por los años 90. Es importante asegurar un aislamiento eléctrico de los carriles por las siguientes razones:

- Señalización de sistemas para trabajar de forma apropiada. La señalización es la forma de intercambiar información sobre la posición de los trenes y garantizar una operatividad segura de la vía.
- Realización de una correcta operación en buenas condiciones de seguridad y sin quejas por fugas de corrientes vagabundas.
- Protección del medioambiente, previniendo la corrosión causada por las corrientes vagabundas.
- Protección del carril contra la electrocorrosión.

## 3 EVOLUCIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA DE CARRIL EMBEBIDO

---

En el estado actual de la tecnología del sistema de Carril Embebido pueden distinguirse una serie de soluciones, cada una de las cuales responde de forma específica a los requerimientos funcionales de un sistema de vía de este tipo, siendo el resultado de una evolución de ingeniería, o bien, de una innovación técnica. En cualquier caso, todas estas soluciones comparten un origen común, el Carril Embebido tradicional.

### 3.1 Carril Embebido tradicional

---

El concepto de Carril Embebido actual, es decir, el de un sistema integral de superestructura de vía en placa, específicamente diseñado con el objeto de compartir plataforma de rodadura con otros medios de transporte, tiene su origen básico a partir de la tipología de vía balastada empleada en el S. XIX.

Así, la primera innovación incorporada a la vía sobre balasto conocida hasta entonces fue la sustitución del carril con perfil Vignole por un perfil de garganta (epígrafe.2.1). El resto de elementos no se modificaron: el carril se seguía montando con sujeciones mecánicas sobre traviesa de madera, las cuales se disponían en un lecho de balasto sobre el terreno; sobre este lecho se disponía posteriormente una capa de asfalto u hormigón confinando el carril, la cual constituía el acabado superficial de la superestructura.

De este modo, podían coexistir distintos tipos de tráfico rodado en las calles. Pero, con el incremento de las cargas del tráfico al extenderse el uso del automóvil y el autobús en las ciudades, a mediados del S.XX empiezan a manifestarse una serie de patologías características de este tipo de superestructuras; la capacidad portante de este acabado superficial no resiste las nuevas cargas, lo cual tiene como consecuencia una rápida degradación en la zona contigua a los carriles. A partir de ahí, el deterioro se extiende a toda la superestructura, con filtración de agua (en algunos casos con congelación) y pérdida de la calidad geométrica de la vía, lo que termina afectando, tanto al material rodante como al medioambiente, en forma de ruido y vibraciones.

### 3.2 Primera Generación de Carril Embebido: vía en placa con bloques embebidos

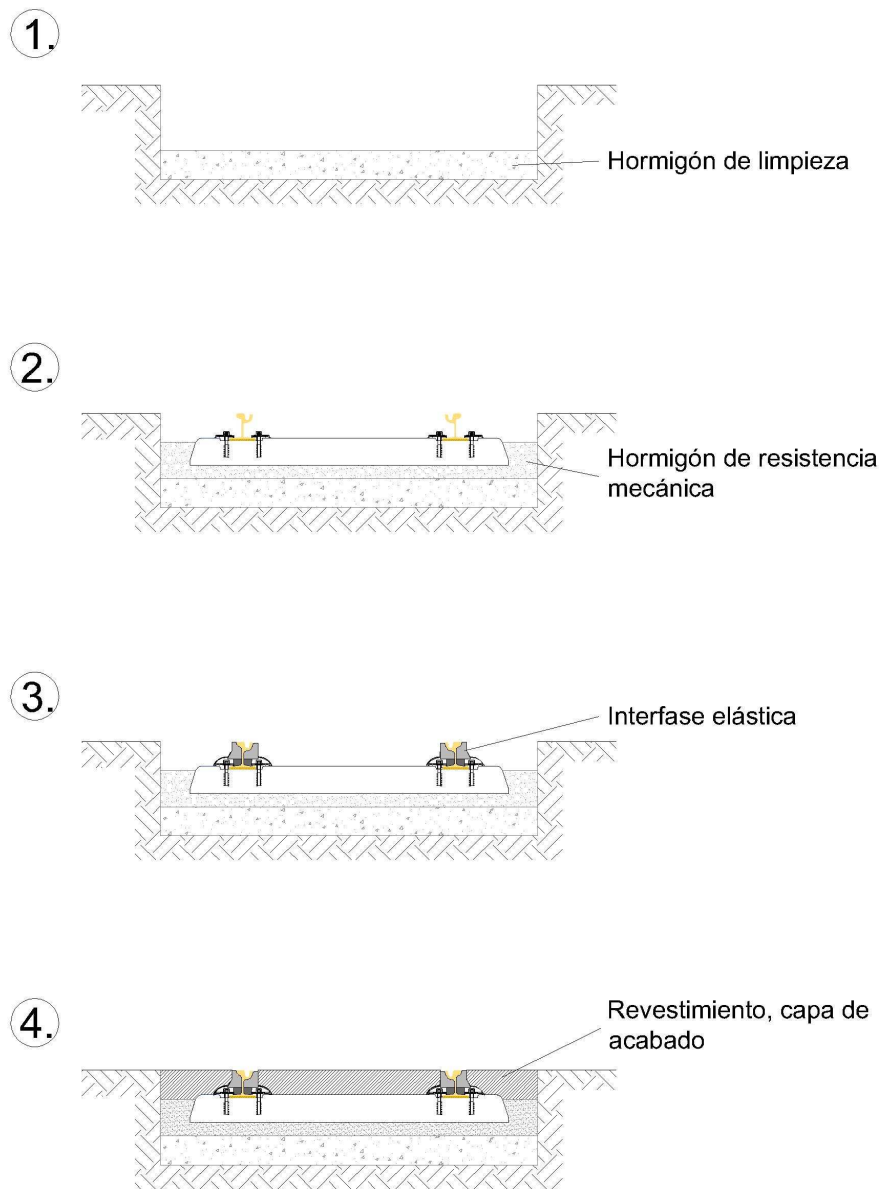
La solución a los problemas inherentes al Carril Embebido tradicional se desarrolla a finales de los ochenta y principios de los noventa. Se manejan soluciones conceptuales a tres niveles:

- Desde el punto de vista del diseño, la sustitución del lecho de balasto por una losa de hormigón (intervención en el elemento del epígrafe 2.4). Se constituye así la denominada vía en placa, con mayor capacidad portante que la balastada, proporcionando una base de la superestructura con mayor rigidez y confinamiento del carril respecto a la capa de acabado superficial.
- En cuanto a innovación tecnológica, la primera es la introducción de elementos elásticos que se disponen acoplándose alrededor del alma del carril para confinarlo. La parte externa de estos elementos es una superficie lisa con objeto de garantizar la unión correcta con el acabado superficial (intervención en el elemento del epígrafe 2.5).
- La segunda innovación tecnológica se concreta en la disposición de una suela elástica bajo el patín del carril, confiriendo de este modo un determinado nivel de aislamiento respecto a las vibraciones (epígrafe 2.6).

Por lo tanto, esta primera generación de Carril Embebido se caracteriza por los siguientes elementos:

- a) Tipo de carril: principalmente de garganta o también denominado Phoenix.
- b) Sujeción del carril: tipo mecánica sobre bloques gemelos o traviesa de hormigón principalmente y, en menor medida, sujeción mecánica sobre placa metálica de asiento directa. Se mantienen dispuestas riostras transversales de unión entre ambos carriles con objeto de garantizar la conservación del ancho de vía.
- c) Tipo de elemento soporte: elemento soporte discreto (bloques o traviesa).
- d) Naturaleza de la base de la superestructura de vía: losa de hormigón armado bajo el carril con espesores mínimos de 600 mm.

- e) Confinamiento del carril: elemento elásticos de relleno adheridos al alma del carril con la única función de garantizar dicho relleno entre carril y capa de acabado superficial. Las sujeciones mecánicas del carril se protegen mediante capuchones.
- f) Rigidez de la suela bajo carril: suele instalarse uno de estos dos tipos:
- Suelas elásticas estándar, con  $k_{din} = 150 \text{ kN/mm}$  (o módulo de carril  $k_{din} < 200 \text{ MN/m/m-carril}$ )
  - Suelas de alta elasticidad, con  $k_{din} < 50 \text{ kN/mm}$  (o  $k_{din} < 70 \text{ MN/m/m-carril}$ ), habiendo de ser compatibles las deflexiones que se producen con las admitidas por la sujeción mecánica del carril.
- g) Proceso constructivo: en referencia a las operaciones descritas en el epígrafe 2.7 este Carril Embebido de primera generación es un sistema de construcción de arriba a bajo (“top-down”) y comprende las siguientes fases de montaje:
- Fase 1 = operación 1
  - Fase 2 = operaciones 2 y 3 simultáneamente
  - Fase 3 = operación 4
  - Fase 4 = operación 5



**Figura 12. Proceso constructivo en la primera generación de carril embebido**

h) Protección contra corrientes vagabundas: asegurada por elementos de relleno elásticos en el alma del carril y capuchas de protección en las fijaciones y placas de carril.

Esta primera generación resultó un avance técnico importante, el cual sigue empleándose ampliamente hoy día. La patología comúnmente presente en este sistema de Carril Embebido es la aparición relativamente rápida de rugosidad en el carril, al apoyarse éste sobre elementos discretos (bloques o traviesa). Los efectos más notorios observados en cuanto a la superestructura de vía son:

- Incremento del mantenimiento
- Incremento del nivel de vibraciones
- Incremento del ruido aéreo

- Inestabilidad en lo que a la protección de corrientes vagabundas se refiere (debido a la cantidad de juntas, soportes discretos del carril y otras discontinuidades).

Estas soluciones de carril embebido de primera generación también se caracterizan por el hecho de que los distintos componentes son suministrados por diferentes fabricantes. El instalador combina todos los elementos y, por tanto, recae sobre él la responsabilidad final del sistema.

Se citan a continuación una serie de elementos típicamente usados en los sistemas de primera generación (referencias en punto 5.1).

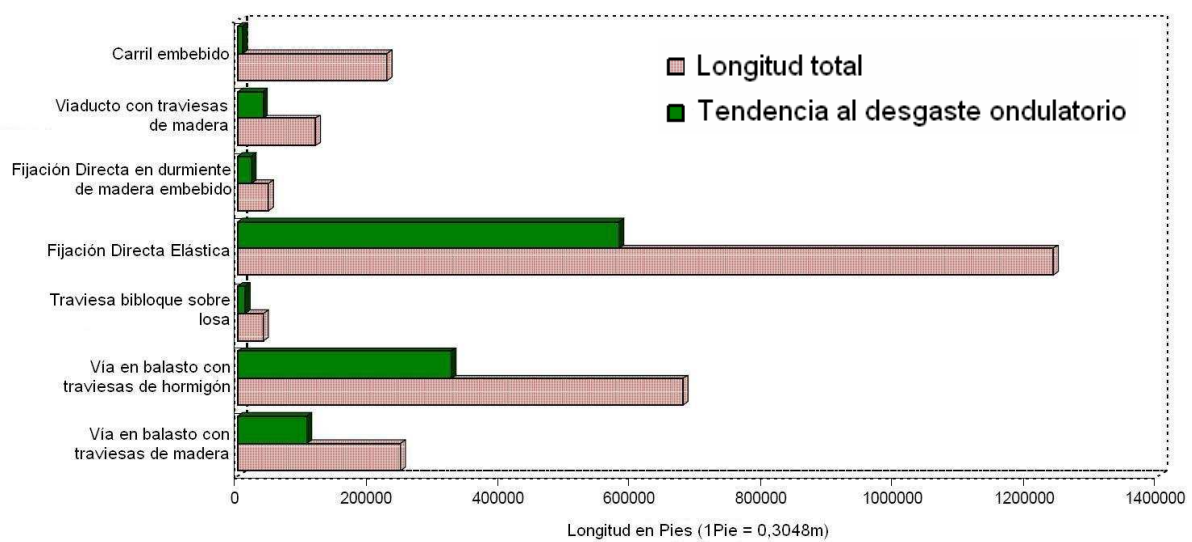
- Fijaciones:
  - Pandrol – fastclip
  - Vossloh
  - Nabla
  
- Traviesas Bloque
  - Sateba
  - Rheda City
  
- Bloques elásticos y placas de soporte
  - Sedra
  - Phoenix
  - CDM-DEPHI
  - Plastiform's
  - Rheinfeder
  - Beco Bermüller

### 3.3 Segunda Generación de Carril Embebido

---

Esta segunda generación aporta un avance tecnológico sustancial al introducir el concepto de elemento soporte continuo del carril, el cual se materializa en una losa de hormigón que ejerce como soporte del carril en lugar de los bloques o la traviesa (al comienzo de los años noventa se registraron distintas patentes); en dicha década se elaboran diversos estudios sobre este concepto. Uno de los más destacados es el resultante del proyecto de I+D cofinanciado por la UE denominado CORRUGATION ([www.corrugation.eu](http://www.corrugation.eu)).





**Figura 13. Desgaste ondulatorio en función del tipo de superestructura de vía**

Tal como muestra la figura, en un sistema de vía con elemento soporte continuo del carril (intervención sobre elemento del epígrafe 2.3, el resto no sufren cambios), el desarrollo del desgaste ondulatorio del carril es menor con el consiguiente beneficio sobre la conservación del carril y la emisión de ruido y vibraciones.

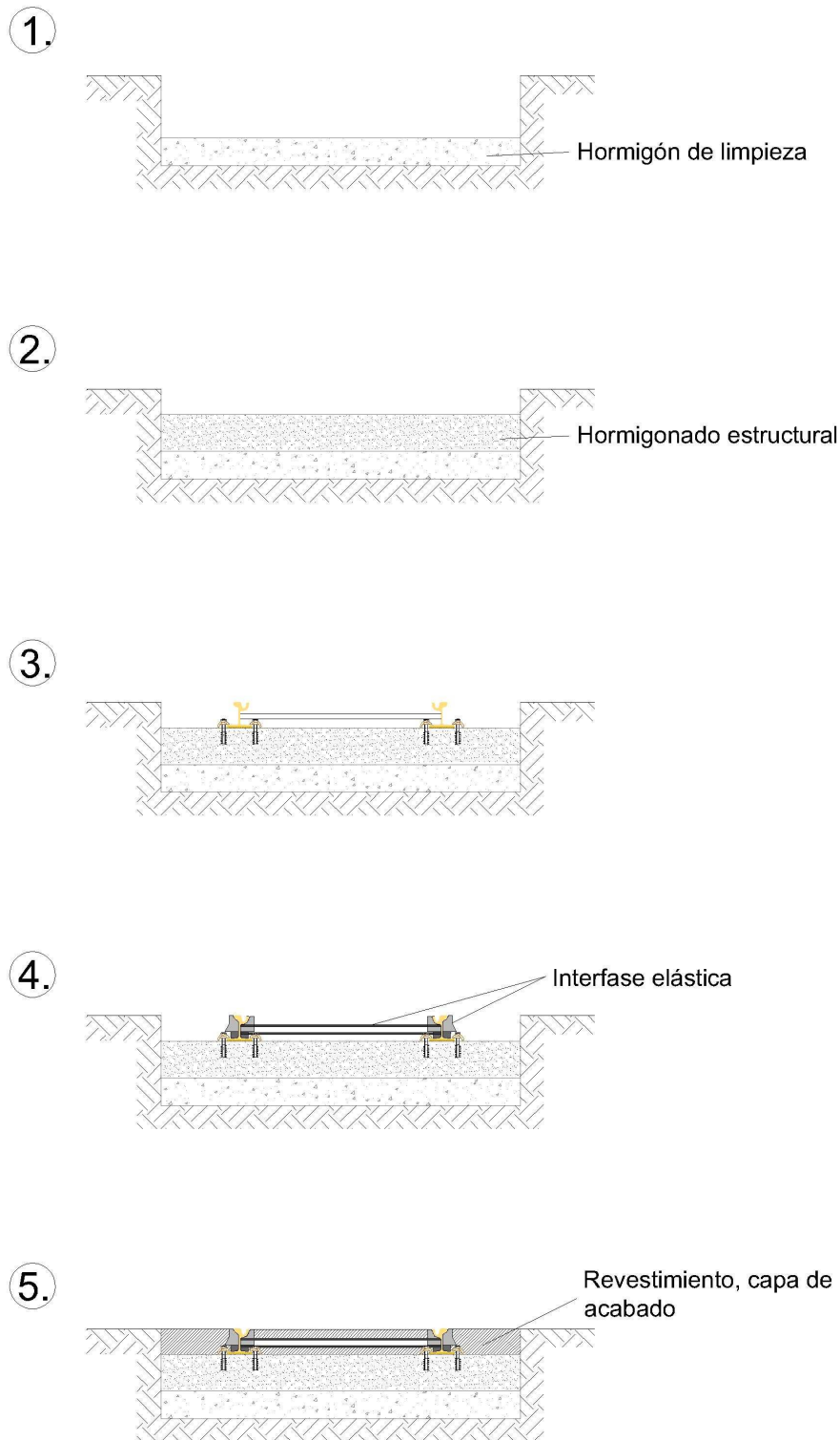
Esta segunda generación de Carril Embebido se caracteriza por los siguientes elementos:

- a) Tipo de carril: principalmente de garganta o también denominado Phoenix.
- b) Sujeción del carril y ancho de vía: tipo mecánico con placa metálica de asiento sobre la losa de hormigón. El ancho de vía queda garantizado por riostras transversales dispuestas cada cierta distancia entre ambos carriles.
- c) Tipo de elemento soporte: elemento soporte continuo (losa de hormigón).
- d) Naturaleza de la base de la superestructura de vía: losa de hormigón bajo el carril con espesores mínimos de 600 mm.
- e) Confinamiento del carril: elementos elásticos de relleno adheridos al alma del carril con la única función de garantizar dicho relleno entre carril y capa de acabado superficial. Las sujeciones mecánicas del carril, con anclaje sobre la losa y que fijan el patín sobre la misma, se protegen mediante capuchones. Es igualmente necesario proteger las riostras transversales fijadas al alma de los carriles, encapsulándolas y fijándolas al carril de modo que sean compatibles con los movimientos de éste (de no ser así se crearía un punto fijo con concentración de tensiones en el alma).
- f) Rigidez de la suela bajo carril: en este caso se trata de una suela continua o banda elástica, con distintos niveles de elasticidad (normalmente  $k_{din}$  60 MN/m/m-carril). Se confiere igualmente al material de encapsulado de las riostras una elasticidad en consonancia. Otro elemento relevante en esta segunda generación es el hecho de que la banda elástica continua, con una elasticidad homogénea en toda su extensión, no resulta tal al instalarse. Ello se debe a que en

los puntos donde se encuentran las sujeciones de carril (entre 1m y 1.5 m.), se crea un punto singular en el que la deflexión del carril está influida por la fuerza de apriete de la sujeción. El efecto resultante es un comportamiento no homogéneo de la banda elástica en su función de apoyo del carril (“elasticidad híbrida”). Con objeto de minorar este efecto, se desarrolló una banda elástica de dos elasticidades (ver la publicación de Esveld, Modern Railway Track, 2ª Ed. 2001, p. 262) que supuso una importante innovación.

g) Proceso constructivo: en referencia a las operaciones descritas en el epígrafe 2.7 esta segunda generación de Carril Embebido es de instalación del tipo denominado de arriba a bajo (top-down) y comprende las siguientes fases de montaje:

- Fase 1 = operación 1
- Fase 2 = operación 2
- Fase 3 = operación 3
- Fase 4 = operación 4
- Fase 5 = operación 5



**Figura 14. Proceso constructivo de la segunda generación de carril embebido**

h) Protección contra corrientes vagabundas: asegurada por elementos elásticos de relleno en el alma del carril y encapsulado elástico de las riostras.

En síntesis, la segunda generación de Carril Embebido aporta como innovación técnica el apoyo continuo bajo carril, manteniendo el resto de elementos sin grandes variaciones; ello supone una mejora sustancial, fundamentalmente en lo que se refiere a la vida útil del carril y, como consecuencia,

del resto de la superestructura de vía; asimismo, la afección medioambiental en forma de ruido y vibraciones se ve notoriamente reducida.

Sin embargo, la disposición obligada de riostras transversales entre carriles, fijadas al alma y relativamente próximas a la superficie (más aún considerando el encapsulado elástico) comporta la posibilidad de una patología característica que se manifiesta en una degradación de la superficie sobre las mismas, apareciendo fisuras originadas por la escasa resistencia de este fino recubrimiento frente al tráfico rodado. En aquellas redes tranviarias en las que se encuentran instalados sistemas de esta segunda generación, el problema se ha solventado disponiendo riostras especiales que permiten un mayor recubrimiento, ofreciendo mayor resistencia en dicha zona.

La protección contra corrientes vagabundas no queda automáticamente garantizada debido a la cantidad de juntas, riostras y otros puntos singulares.

Esta solución de carril embebido de segunda generación también se caracteriza por el hecho de que los distintos componentes son suministrados por diferentes fabricantes. El instalador combina todos los elementos y, por tanto, teóricamente recae sobre él la responsabilidad final del sistema.

Se citan a continuación una serie de elementos típicamente usados en los sistemas de segunda generación (referencias ver punto 5.1)

- Fijaciones:
  - Pandrol – fastclip
  - Vossloh
  - Nabla
  
- Bloques elásticos, tiras de soporte y encapsulados de riostras:
  - Iron Horse Engineering Embedded Track
  - Sedra SDS
  - Thyssenkrupp
  - CDM-Comfotrack
  - STRAILastic
  - Rheinfeder

### 3.4 Tercera y cuarta generación de Carril Embebido

---

Hasta este punto del estado del arte, el sistema de Carril Embebido ha venido empleando sujeciones mecánicas con clip elástico para fijar el carril, apretando el patín sobre el elemento soporte, ya sea éste de bloques, traviesas o losa.

En el momento de renovar el carril en operaciones de mantenimiento en las soluciones de sistemas de primera y segunda generación se hace necesario levantar o desmontar parcialmente la capa de acabado superficial, en una banda longitudinal de anchura equivalente a la del patín del carril más la del espacio que ocupan las sujeciones mecánicas para poder retirar aquél libremente.

Como se ha indicado en la introducción, con la llegada de las políticas de desarrollo urbano sostenible, tanto la integración urbanística como la reducción de costes de mantenimiento se convierten en condicionantes a tener en cuenta en el diseño de la superestructura de vía.

En el caso de la renovación del carril se trata de desarrollar una tecnología que permita realizar esta operación sin afectar a la plataforma compartida con el tráfico rodado. En este sentido, las sujeciones mecánicas suponen un impedimento.

En este contexto es en el que se va a producir un importante avance con la introducción del concepto de “sujeción propia” de la superestructura de vía. Es decir, en lugar de implementar la fijación del carril mediante sujeciones mecánicas (intervención sobre elemento descrito en epígrafe 2.2), es el propio cuerpo de la superestructura de vía el que ejerce dicha función, garantizando igualmente la conservación del ancho de vía. En este caso es necesario que el elemento soporte del carril (epígrafe 2.3) sea una losa de hormigón, cuya cota ha de elevarse por encima del patín del carril y, de ese modo, ejercer de apoyo lateral para el confinamiento y sujeción del mismo.

Este concepto se materializa de dos formas, presentando cada una de ellas las siguientes características:

- **Tercera generación:** fijación del carril mediante adherencia del mismo a la losa sobre una acanaladura longitudinal conformada en el hormigón. La adherencia se logra mediante un elastómero vertido en la citada acanaladura, rellenando los huecos entre ésta y el carril, y que posteriormente se solidifica. El proceso constructivo se caracteriza por la técnica del “bottom-up”, es decir, que la posición del carril en las tres coordenadas espaciales se consigue como último paso del proceso, una vez la losa ha alcanzado la cota superficial prevista. Entonces, antes de ejecutar el vertido, se fija el carril a la acanaladura de la losa de hormigón mediante pequeñas cuñas y elementos cónicos para su apoyo vertical y lateral respectivamente.

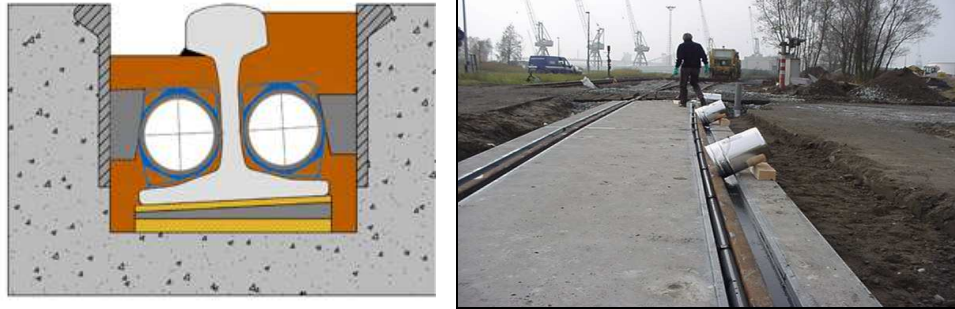


Figura 15. Ejemplo de tercera generación de Carril Embebido

- Cuarta generación:** un avance más sobre la técnica anterior de puesta en obra con elastómero vertido es el empleo de elementos elastómeros prefabricados, con un perfil totalmente adaptado al del carril, y que se encajan lateralmente en la zona del alma encapsulándola y rellenando así los huecos entre el carril y la acanaladura (técnica del “prechaquetado”). En este caso el proceso constructivo se caracteriza por la técnica de “top-down”, es decir, que una vez posicionado el carril en sus coordenadas (x,y,z) definitivas, el resto de la superestructura, fundamentalmente la losa de hormigón con su acanaladura, se va recreciendo desde su base, siguiendo unos sistemas de apeo-guías específicamente dispuestos, hasta alcanzar la cota superficial prevista. Todo ello en una operación única de hormigonado.

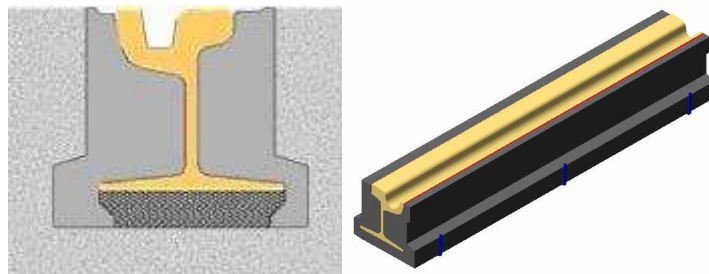


Figura 16. Elementos elastómeros para encapsulado del carril (técnica del “prechaquetado”)



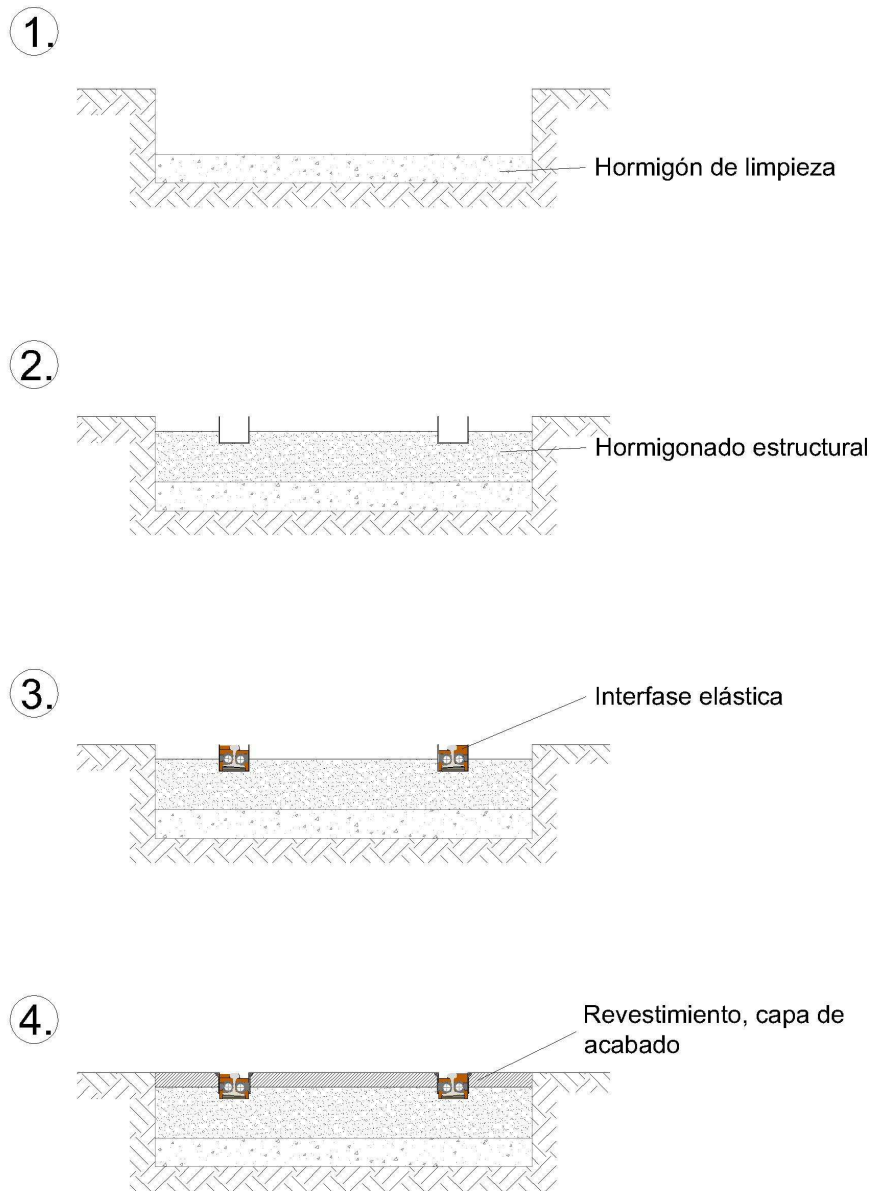
**Figura 17. Sistema de apeo-guías que fijan la posición final del carril en las sus tres coordenadas (técnica “top-down”)**

En síntesis, la tercera y cuarta generación de Carril Embebido se caracterizan por los siguientes elementos:

- a) Tipo de carril: tanto de garganta como de perfil Vignole.
- b) Sujeción del carril: se eliminan las sujeciones mecánicas y las riostras transversales entre carriles. El carril y el ancho de vía se fijan por la propia superestructura, concretamente por los elementos de confinamiento y la losa de hormigón.
  - Tercera generación: la fijación del carril la ejerce el elastómero vertido en la acanaladura, que, una vez solidificado, ejerce de adherente entre carril y la losa de hormigón (técnica de vertido).
  - Cuarta Generación: la fijación del carril la ejercen los elementos elastómeros prefabricados que encapsulan el carril en la acanaladura y lo integran en la losa de hormigón (técnica del prechaquetado)
- c) Tipo de elemento soporte: elemento soporte continuo (losa de hormigón).
- d) Naturaleza de la base de la superestructura de vía: el carril se encuentra ahora integrado en la losa de hormigón, lo que permite reducir su espesor final a valores en torno a 400 mm, en las siguientes condiciones:
  - Tercera generación: para materializar la operación de posicionamiento y adherencia del carril es necesario que la losa se encuentre conformada en su espesor completo y a la cota prevista.
  - Cuarta generación: el espesor de la losa puede reducirse sensiblemente por debajo de su cota prevista con objeto de montar un acabado superficial de naturaleza distinta al de la losa.
- e) Confinamiento del carril: el hecho de encapsular el carril en acanaladura de la losa mediante elastómero vertido o prefabricado, intrínsecamente confina al mismo. En cualquier caso, es importante señalar lo siguiente sobre la forma del material de encapsulado:

- Tercera generación: para un vertido que rellene todos los huecos, la acanaladura (y por consiguiente el encapsulado) ha de ser de tipo rectangular sin recovecos que resulten complejos de rellenar.
  - Cuarta generación ERS: dado que en el sistema “top-down” se dispone primeramente el carril con los elementos de encapsulado ya adheridos y después se procede al hormigonado de la losa, esto permite que el encapsulado presente un perfil con salientes o pestañas que el hormigón envolverá. De este modo la adherencia con el carril se garantiza en mayor medida.
- f) Rigidez de la suela bajo carril: vendrá determinada por la elasticidad del encapsulamiento del carril. Ésta se puede preestablecer eligiendo el tipo de material del encapsulado y, fundamentalmente, empleando un material específico para la banda elástica bajo el patín del carril, el cual determina la rigidez vertical que, normalmente, resulta la más importante.
- Tercera generación: dado que el ajuste final de la posición del carril se realiza introduciendo pequeñas cuñas o elementos cónicos (en ocasiones de madera) para, una vez alcanzada la posición definitiva, proceder al vertido del elastómero, la elasticidad final puede verse afectada por estos pequeños elementos. Esto puede provocar que el comportamiento elástico del sistema no resulte homogéneo con el consiguiente perjuicio a la vida útil del sistema y la dificultad para regular la atenuación de vibraciones.
  - Cuarta generación: en este caso el ajuste de la posición final del carril se realiza al principio y se mantiene gracias al sistema de apeo-guías, no necesitando de las citadas cuñas. Así, el comportamiento elástico resulta homogéneo y permite seleccionar un tipo de material adecuado que pueda atenuar las vibraciones de una forma más regular. Este sistema permite una rigidez mínima que puede alcanzar un módulo de carril de  $k_{din} = 15-20 \text{ MN/m/m-carril}$  en condiciones compatibles con la seguridad.
- g) Proceso constructivo: en referencia a las operaciones descritas en el epígrafe 2.7 este sistema de Carril Embebido de tercera generación comprende las siguientes fases de montaje:
- Fase 1 = operación 1
  - Fase 2 = operación 2
  - Fase 3 = operaciones 3 y 4, simultáneamente
  - Fase 4 = operación 5

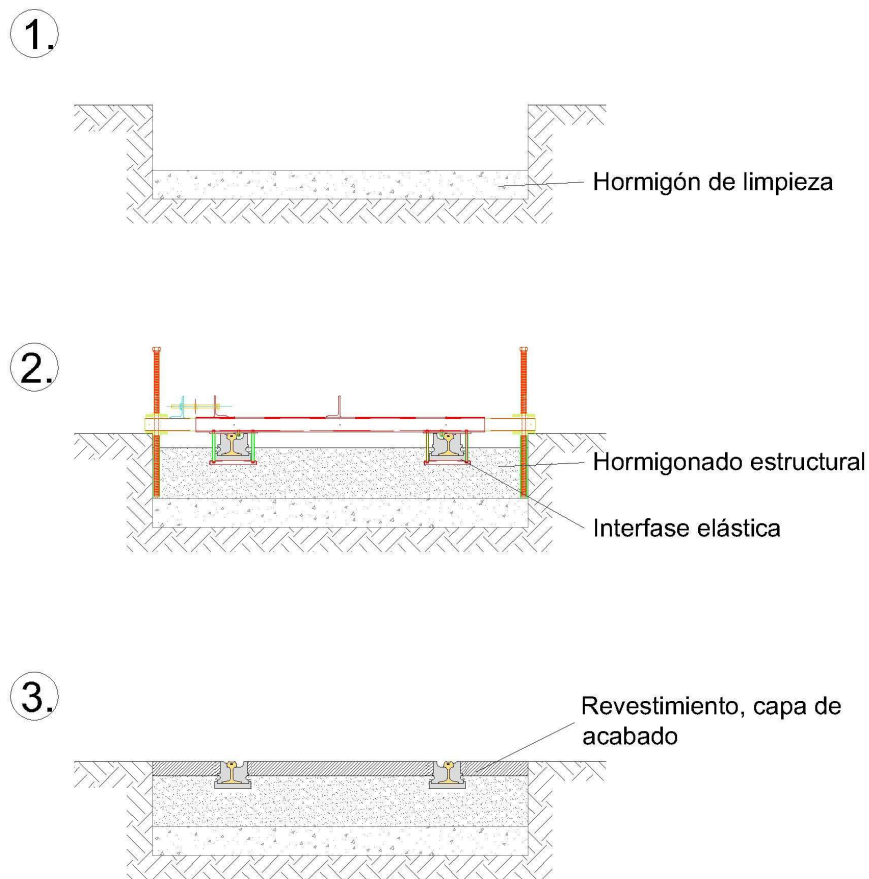




**Figura 18. Proceso constructivo de tercera generación de carril embebido**

Este sistema de Carril Embebido de cuarta generación comprende las siguientes tres fases de montaje (por ellos es el sistema de vía “in situ” más rápido en montar):

- Fase 1 = operación 1
- Fase 2 = operaciones 2, 3 y 4, simultáneamente
- Fase 3 = operación 5



**Figura 19. Proceso constructivo de cuarta generación de carril embebido**

h) Protección contra corrientes vagabundas:

- Sistema de carril embebido de 3ª generación: asegurado mediante embebido completo
- Sistema de carril embebido de 4ª generación: asegurado mediante encapsulado elástico completo

Las tecnologías de tercera y cuarta generación se emplean ampliamente en la actualidad y se comercializan como un sistema, es decir, todos los componentes se suministran por un solo proveedor. En este caso el instalador ha de seguir las instrucciones de instalación del suministrador y la responsabilidad final sobre la calidad del sistema es susceptible de repartirse al 50/50 entre el instalador y el suministrador.

Sistemas de tercera generación habituales (ver referencias en punto 5.1):

- ALH Series Six
- Edilon corkelast
- CDM Porotrack
- Bolidt

Sistemas de cuarta generación habituales (ver referencias en punto 5.1):

- CDM-Prefarail
- ALH Pre-Coated Rail

### 3.5 Quinta generación de Carril Embebido

---

En los años recientes el desarrollo del sistema de Carril Embebido ha venido impulsado por la necesidad de resolver los siguientes condicionantes:

- La exigencia de reducir la afección del proceso constructivo en el medioambiente urbano y sobre el resto de medios de transporte.
- El objetivo de reducción del mantenimiento y, por consiguiente, del coste del ciclo de vida útil del sistema.
- Los requerimientos crecientes respecto a los niveles permitidos de ruido y vibraciones durante la fase de explotación.

La consecución de estos objetivos, que constituyen condicionantes para el diseño y el proceso constructivo, se va a lograr con el desarrollo de las denominadas técnicas de vía en placa prefabricada. Así, el Estado del Arte actual presenta esta importante innovación que constituye la quinta generación del sistema de Carril Embebido.

Desde el punto de vista de la integración y afección al entorno urbano las técnicas de vía en placa prefabricada permiten:

- Integrar sobre la losa de hormigón un acabado superficial prefabricado de diversa naturaleza y de alta calidad (ver epígrafe 2.5). Esta integración confiere al acabado superficial mayor rigidez frente a la rodadura de los diversos medios de transporte, lo que se traduce en un menor coste del ciclo de vida.
- Un proceso constructivo que integra y optimiza las operaciones de montaje, facilitando la instalación del sistema en zonas críticas en las que se dispone de un tiempo de intervención muy reducido para la construcción de una nueva plataforma. De este modo se reducen también los trastornos derivados de la generación de ruido y la interrupción eventual del tráfico rodado.

Desde el punto de vista de la evolución del estado de arte es importante señalar los vínculos existentes en los aspectos de diseño y proceso constructivo propios de la tercera y cuarta generación con las características de los sistemas de la quinta generación. Esto da lugar, respectivamente, a dos familias principales de vía en placa prefabricada:

- Soluciones basadas en la tercera generación: las losas prefabricadas disponen de una acanaladura conformada al efecto de alojar y fijar en ella el carril, de acuerdo al procedimiento “bottom-up”. En el presente análisis del estado del arte esta familia de la quinta generación no

se califica como innovación técnica, ya que, operativamente, resulta análoga a la de tercera generación de la que procede, dado que la nivelación y alineación de los paneles de losa prefabricados y el ajuste final de la posición del carril constituyen operaciones independientes.

- Soluciones basadas en la cuarta generación: las losas prefabricadas constituyen un conjunto que integra toda la superestructura, es decir, el carril, su elemento soporte, que es la propia losa, y los elementos elásticos de confinamiento y fijación. De este modo, con la instalación de la losa, el carril también queda instalado en su posición definitiva, por lo que se materializan simultáneamente distintas operaciones. Los desarrollos más recientes incluso incorporan losa flotante integrada en el conjunto prefabricado. Todo ello constituye un avance tecnológico que da respuesta a los requerimientos actuales citados por lo cual, este conjunto de soluciones se considera como la realmente representativa de la quinta generación de Carril Embebido.



**Figura 20. Ejemplo de quinta generación de Carril Embebido**

Este sistema de quinta generación se caracteriza por el hecho de que es realmente un sistema integral, cuya responsabilidad puede asignarse inicialmente sobre un solo proveedor de la tecnología. No obstante, como el instalador únicamente coloca los paneles prefabricados, la responsabilidad del sistema resulta susceptible de ser repartida en un 80% para el suministrador de tecnología y un 20% para el instalador de vía.

La siguiente tabla recoge una síntesis de lo descrito en los epígrafes anteriores:

Revisión crítica del estado del arte de los sistemas de carril embebido (ERS) - año 2008						
Elementos esenciales de sistema de carril embebido	ERS clásico	1ª generación ERS	2ª generación ERS	3ª generación ERS	4ª generación ERS	5ª generación ERS
Tipo de carril				De garganta y vignole		
Fijación del carril a la superestructura y mantenimiento de ancho de vía		Con fijaciones mecánicas		Con técnicas de pegado al carril		Técnicas de pre-enchafetado de carril
Necesidad de ríostros		No	Sí		No	
Tipo de apoyo		Apoyo discreto			Apoyo continuo	
Naturaleza de la infraestructura apoyovía		Balasto		Losa de hormigón bajo patin de carril		Carril integrado en la losa de hormigón
Protección del carril del ambiente exterior		Sin protección		Bloques elásticos de relleno sin funciones de fijación		Encapsulamiento elástico con funciones de relleno y fijación de la vía
Forma de la interface elástica entre el carril y la capa de revestimiento		Sin relevancia		Bordes rectos		Bordes con forma
Rigidez del apoyo del carril		no specific attention		Suela bajo carril elástica		Tiras elásticas - elasticidad homogénea
Proceso constructivo				Bottom-up (taladrado)		Top-Down (embebido)
Fases constructivas		4 fases de proceso		5 fases de proceso		4 fases de proceso
Protección contra corrientes vagabundas		No estable, demasiados puentes eléctricos				3 fases de proceso
						Protección estable contra corrientes vagabundas

## 4 CONCLUSIONES

---

Como se ha indicado en la introducción, en el presente documento se ha pretendido dar un repaso a las distintas soluciones tranviarias empleadas en la construcción de su camino de rodadura con la idea de que pueda servir de referencia para los numerosos proyectos que se están desarrollando y los que en un futuro se inicien. Los autores han pretendido que el lector pueda adquirir una perspectiva que le permita distinguir las distintas generaciones de este tipo de sistemas, así como comprender las características básicas, particularidades y patologías con las que se puede encontrar, teniendo en cuenta que la calidad final de la solución adoptada vendrá definida por los materiales empleados y por una ejecución profesional de los trabajos, por lo que resulta recomendable, independientemente del grado de responsabilidad que se asigne inicialmente a cada uno, que los suministradores de materiales, e incluso los suministradores de soluciones integrales, realicen un seguimiento de los procedimientos constructivos con el fin de asegurar la calidad integral.

Por otra parte, los autores también esperan cualquier comentario o sugerencia de todo aquel que quiera ampliar o corregir la información recogida en el presente documento con el objetivo de que se pueda disponer de una referencia lo más útil y completa posible.

## 5 REFERENCIAS

---

### 5.1 Documentación Técnica

---

[www.voestalpine.com](http://www.voestalpine.com)  
[www.edilonsedra.com](http://www.edilonsedra.com)  
[www.tkgftgleistechnik.de](http://www.tkgftgleistechnik.de)  
[www.cdm.be](http://www.cdm.be)  
[www.strail.com](http://www.strail.com)  
[www.beco-bermueller.de](http://www.beco-bermueller.de)  
[www.railone.com](http://www.railone.com)  
[www.pandrol.com](http://www.pandrol.com)  
[www.vossloh-fastening-systems.de](http://www.vossloh-fastening-systems.de)

### 5.2 Bibliografía Técnica

---

- Esveld, Coenraad, Modern Railway Track, 2001, 2<sup>nd</sup> Ed.
- Fahrwege der Bahnen in Nah- und Regionalverkehr in Deutschland, Druckerei Knipping, Düsseldorf, 2007
- Lichtberger, Bernhard, Track Compendium, Eurailpress, 2005, 1<sup>st</sup> Ed.