



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales

Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DE SUJECCIÓN PARA VÍAS DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLA



Autor: Isidro Alfonso Carrascal Vaquero

**Directores: Federico Gutiérrez-Solana Salcedo
Juan Antonio Polanco Madrazo**

Santander, Mayo 2006

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El 28 de octubre de 1848, se efectuó el primer viaje por ferrocarril en España entre las localidades de Barcelona y Mataró, para lo que se invirtió una hora en recorrer 28 km. Casi un siglo y medio después, desde el 21 de abril de 1992, el AVE Madrid-Sevilla recorre 471 km en dos hora y cuarto, a una velocidad máxima comprendida entre 270 y 300 km/h.

La evolución de las velocidades de los ferrocarriles, tanto en trayectos comerciales como las conseguidas en tramos experimentales, ha sufrido un incremento espectacular, sobre todo en el último medio siglo, tal como se puede observar en la Figura 1.1. Así, la velocidad máxima experimental ha superado la barrera de los 500 km/h, mientras que, la máxima comercial en servicio, se ha situado en 350 km/h [1 y 2].

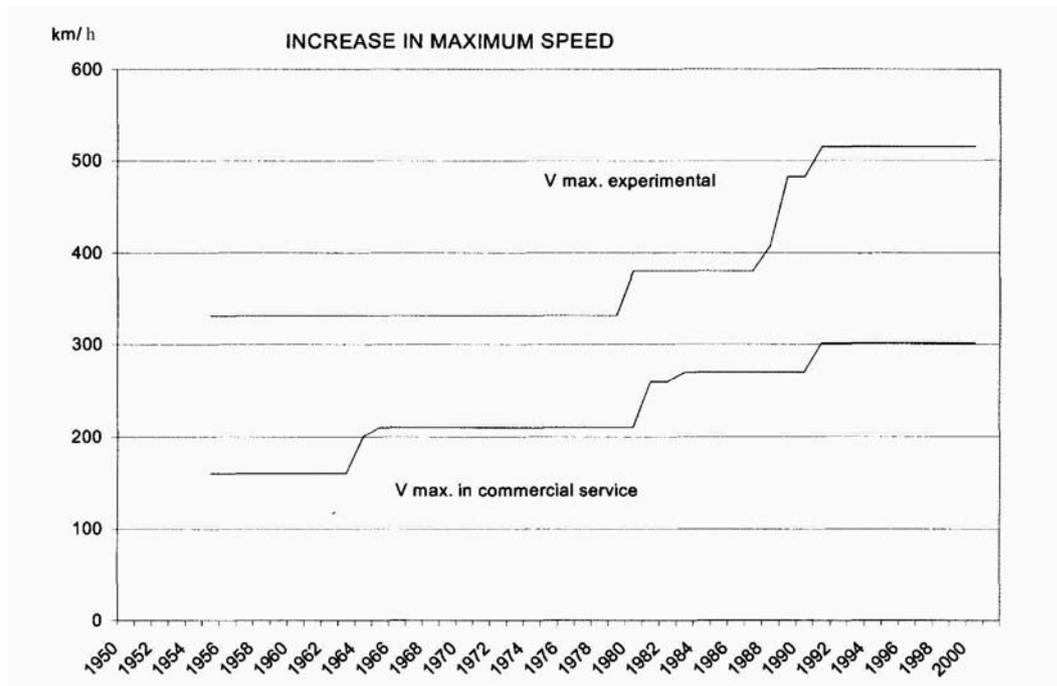


Figura 1.1.- Incremento en la velocidad máxima alcanzada en vehículos ferroviarios [1]

Como se puede comprobar, hoy en día el transporte ferroviario sigue creando expectación allí por donde pasa, tanto por los avances tecnológicos que se están desarrollando en torno al mismo, como por el beneficio social generado. La alta velocidad ha cambiado el concepto de largo recorrido, reduciendo, significativamente, el tiempo de transporte, tanto para viajeros como para mercancías (Tabla 1.1) [3]. Por todo ello, el tren vuelve a ser el protagonista del transporte, lo que supone que una enorme cantidad de recursos humanos y económicos se estén invirtiendo en el desarrollo de la infraestructura ferroviaria.

Entre los principales objetivos pretendidos por la alta velocidad, se encuentra el de competir y restar cuota de mercado al transporte aéreo. Para distancias inferiores a 500 km y con tiempos de viaje inferiores a 2 horas y media, la alta velocidad supera ampliamente al avión, llevándose, prácticamente, el 90 % del mercado. En el otro extremo, se encontrarían los viajes que superan los 1000 km, que requerirían más de 4 horas, por lo que, en ellos, el predominio del avión es muy claro.

Tabla 1.1. Reducción de los tiempos de viaje con la implantación de la alta velocidad [3]

Trayecto		Tiempo de viaje		
Localidades	Distancia (km)	Línea convencional	Alta velocidad	Ahorro (%)
Madrid-Sevilla	471	6h 00'	2h 15'	62.5
Tokyo-Osaka	515	6h 00'	2h 30'	58.3
Paris-Lyon	430	4h 00'	2h 00'	50.0
Londres-Paris	399	5h 15'	3h 00'	42.8
Paris-Bruselas	310	2h 35'	1h 20'	48.4
Berlin-Hannover	264	3h 45'	1h 34'	58.2
Roma-Florenca	316	3h 00'	1h 35'	47.2

En la Figura 1.2, se puede comprobar el decremento en cuota de mercado sufrido por el transporte aéreo en el trayecto Madrid-Sevilla (471 km) a partir de 1992, año de inauguración de la línea de alta velocidad [4]. De la misma forma, también se aprecia, a partir de la misma fecha, un importante incremento en el transporte por ferrocarril.



Figura 1.2.- Distribución modal Madrid-Sevilla [4]

La autentica rivalidad entre los dos medios de transporte surge en recorridos comprendidos entre los 500 y 1000 km. En esta franja, la alta velocidad gana en competitividad a base de la reducción de los tiempos de viaje, esto es, con el incremento de velocidad media del ferrocarril. Este aumento de velocidad, no sólo se basa en el incremento de la velocidad máxima del tren, sino que, también, lleva incorporados otros conceptos, como, por ejemplo, la mejora de la superestructura de la vía para que el tren pueda desarrollar sus capacidades, el optimizado de paradas intermedias y las mejoras del servicio, como el incremento del número de viajes.

En la Figura 1.3, se muestra la cuota de mercado del ferrocarril frente al avión en función de la duración del viaje y de la longitud del mismo para trayectos comprendidos entre 300 y 600 km. Se puede comprobar que, mientras mas corto es el trayecto, tanto en tiempo como en longitud, más cuota de mercado presenta la alta velocidad [3].

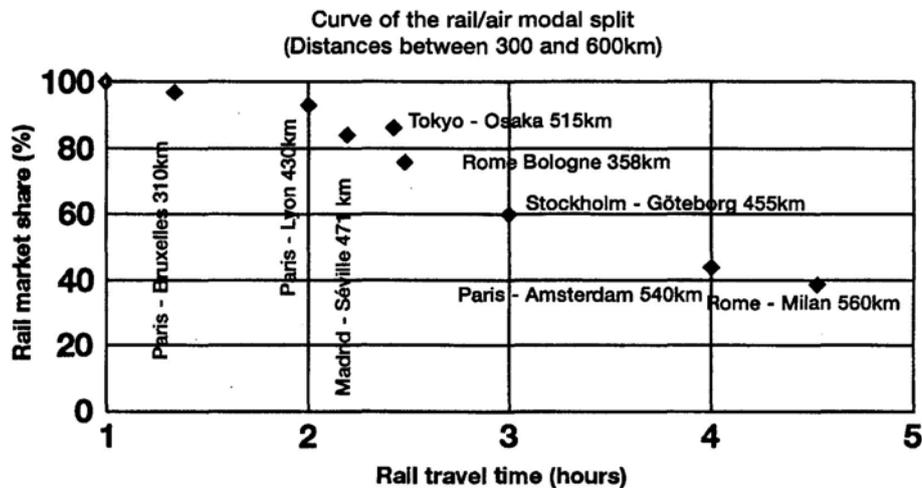


Figura 1.3.- Cuota del transporte por ferrocarril para distancias comprendidas entre 300 y 600 km [3]

En España, con el objeto de competir con el transporte aéreo, la línea Madrid-Barcelona ha apostado por un incremento en la velocidad del trayecto, planteándose una velocidad máxima de 350 km/h. Con esta velocidad máxima de diseño, el tiempo de viaje entre Madrid y Lérída se pretende reducir de las 4

horas y 45 minutos del mejor de los trenes actuales a las 2 horas y 4 minutos, lo que supondrá una disminución en tiempo del 56.5 % [5].

Este aumento de velocidad máxima, entre 50 y 80 km/h respecto al AVE Madrid-Sevilla, implica un notable incremento en los esfuerzos soportados por la superestructura de la vía, que se traducen en una necesidad de cambios en el diseño de la misma. Entre los elementos a los que afectan estos cambios, se encuentran la propia geometría de la vía, la plataforma y las capas de asiento, las traviesas y, lógicamente, el sistema de la sujeción carril-traviesa.

Entre las modificaciones introducidas en el trayecto Madrid-Barcelona respecto al Madrid-Sevilla en lo referente a la superestructura de vía destacan las siguientes:

- Los radios de curvatura para la máxima velocidad deben pasar de 4000 a 6500 m;
- la distancia mínima entre centros de vía se debe incrementar desde 4.3 a 4.7 m;
- la sección de túneles para doble vía debe aumentar de 75 a 100 m²
- y, por último, las traviesas incrementarán su peso en 35 kg, pasando de 300 a 335 kg, y su altura 20 mm hasta alcanzar los 242 mm.

En lo concerniente a la subestructura se pueden destacar:

- el mínimo espesor de balasto se incrementará en 5 cm, pasando de 30 a 35 cm
- y el mínimo espesor de sub-balasto otros 5 cm, de 25 a 30 cm;

En este sentido, el sistema de sujeción también se ve obligado a evolucionar para adaptarse a este incremento sustancial de velocidad.

La sujeción está formada por el conjunto de pequeño material de vía cuya misión es fijar el carril a las traviesas, manteniendo en todo momento el ancho de vía y

facilitar así la transferencia a la infraestructura de las acciones, tanto estáticas como dinámicas, ejercidas por el material rodante. Es decir, la sujeción es la encargada de dar continuidad estructural a la vía.

A la sujeción, además de asegurar una resistencia mecánica adecuada para soportar todo tipo de esfuerzos a los que puede estar sometida, también se le exigen otra serie de propiedades, entre las que se encuentran:

- Aislamiento eléctrico, ya que las sujeciones que permiten una continuidad eléctrica entre los dos hilos de la vía férrea producen derivaciones que cortocircuitan eléctricamente ambos carriles, con el consecuente peligro originado al descompensarse el sistema de señalización que regula el tráfico por la vía.
- Invariabilidad de su comportamiento mecánico con el tiempo y una larga vida útil
- Coste bajo
- Sencillez, tanto de montaje, como de mantenimiento
- Garantizar el confort de los viajeros

Todas estas exigencias han conducido al desarrollo de sistemas de sujeción caracterizados por la gran heterogeneidad de las soluciones propuestas, así como de los materiales elegidos para las mismas: metales, polímeros y materiales compuestos, además del hormigón de la traviesa con el que también interactúa.

Por ejemplo, el empleo de polímeros y materiales compuestos de matriz polimérica en la sujeción tiene una doble justificación: su naturaleza aislante evita interferencias con la señalización viaria y sus excelentes propiedades de amortiguación garantizan el confort durante el paso del convoy. Sin embargo, estos materiales poliméricos manifiestan un problema respecto al resto, cual es su peor respuesta ante esfuerzos de fatiga [6].

2. OBJETIVOS

La optimización de la sujeción que se adapte a las exigencias funcionales del tren de alta velocidad Madrid-Barcelona motiva la realización de esta Tesis. Sus objetivos se pueden resumir básicamente en dos: definición de la sujeción y validación de su comportamiento.

Por un lado, partiendo de la experiencia adquirida con el AVE Madrid-Sevilla y con las líneas de alta velocidad del resto de administraciones europeas y contando con los últimos desarrollos tecnológicos del sector y la oferta disponible en el mercado, se trata de buscar el sistema de sujeción para las nuevas líneas de alta velocidad que mejor se adapte a las exigencias establecidas por el Gestor de Infraestructura Ferroviaria (GIF) en el “Pliego de bases para el suministro de sujeciones” [7].

Por el otro lado, una vez definido el sistema de sujeción, se tratará de estudiar el comportamiento del mismo. Este estudio se realizará desde dos puntos de vista:

- Análisis del comportamiento de los elementos individuales constituyentes de la solución elegida.
- Análisis del comportamiento global del sistema completo.

El análisis del comportamiento deberá abarcar la totalidad de propiedades importantes del sistema, desde las mecánicas, ya sean estáticas o dinámicas, hasta las eléctricas, pasando, entre otras, por las de durabilidad y deterioro.

También se analizará la variación de estas propiedades en función de parámetros externos e internos que puedan afectarlas. Entre las principales variables externas destacan las de carácter ambiental, como la temperatura y la humedad, con influencia sobre el comportamiento mecánico de los componentes, así como en su envejecimiento y deterioro. En cuanto a las variables internas, se analizarán aquéllas que puedan modificarse en servicio, por accidente u otro motivo, como pueden ser el par de apriete o la rigidez del asiento entre otras.

En el planteamiento del estudio sobre el control del comportamiento tanto global como individual, se va a priorizar en la respuesta de los componentes de naturaleza polimérica frente a los componentes metálicos, ya que estos materiales desde el punto de vista resistente son los más débiles, actuando, en muchos de los casos, como fusible mecánico del sistema, es decir que son los componentes que primero fallan ante sobrecargas, presentando, además, el problema añadido de la influencia de la temperatura ante esfuerzos dinámicos continuados.

3. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

En el diagrama de la Figura 1.4, se presenta, de forma esquematizada, el contenido y el trabajo desarrollado para la realización de esta Tesis.

La Tesis se ha estructurado en tres grandes bloques: uno primero que recopila el estado del arte, de carácter descriptivo y otros dos bloques, que, precisamente, coinciden con los objetivos descritos en el apartado anterior, la selección del diseño y el análisis de su comportamiento, con una marcada condición experimental.

El primer bloque, se desarrolla a lo largo de los capítulos 2, 3 y 4 de la presente Tesis. En el Capítulo 2, se pretende dar a conocer lo que es una sujeción, sus funciones, sus características, su clasificación y se realiza un recorrido por los principales sistemas de sujeción empleados en la actualidad en España, efectuando una completa descripción de cada uno de ellos.

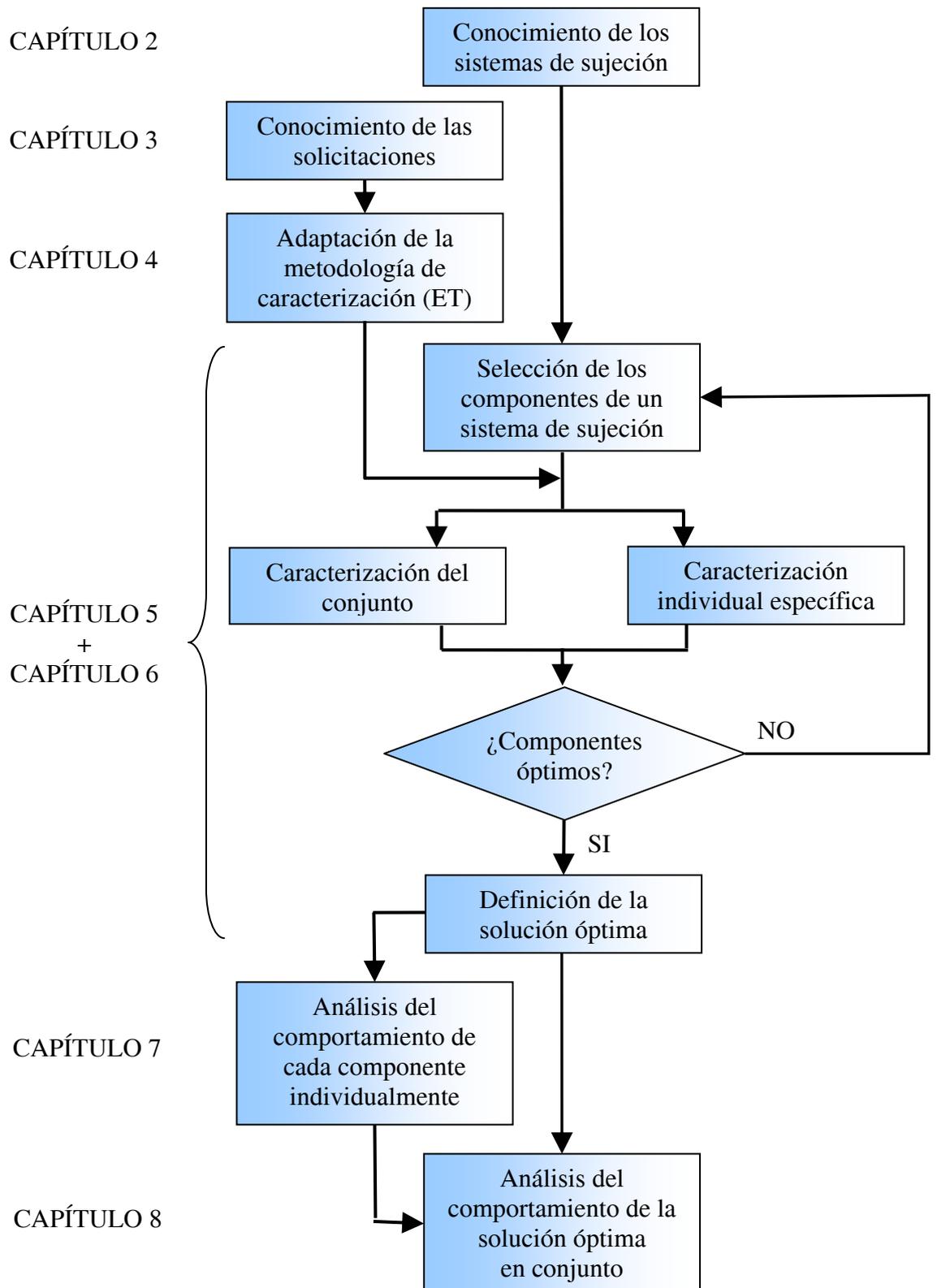


Figura 1.4.- Contenido y desarrollo de la Tesis

El Capítulo 3 es una introducción a la tecnología ferroviaria relativa a la sujeción. En él, se revisa la naturaleza de los diferentes esfuerzos que pueden actuar sobre el sistema de sujeción, haciendo un pequeño inciso en aquéllos de naturaleza dinámica, evaluando, también, la influencia que la velocidad puede llegar a tener en los esfuerzos que actúan sobre la sujeción, así como, sobre el diseño del trazado de la vía. También, resultará de interés detallar los valores reales de los esfuerzos realizados por los vehículos, tanto a velocidad normal como a alta velocidad, y la influencia sobre los mismos de parámetros como radios de curvatura, número de elementos de anclaje o la velocidad de paso del vehículo. Por último, se profundiza sobre la influencia que las propiedades mecánicas de la sujeción pueden tener sobre el deterioro de la superestructura en su conjunto.

En el último capítulo de este primer bloque, se analizan los requerimientos establecidos por el GIF para caracterizar y validar las sujeciones. Se realiza un repaso del conjunto de ensayos incluidos en la Especificación Técnica, tratando de justificar cada uno de los mismos. En cada caso ello incluye una descripción completa del ensayo según la especificación, la interpretación de la normativa, el planteamiento de una solución para la realización del ensayo que garantice la máxima representatividad y, por último, comentar los resultados que se pueden esperar en cada uno de los ensayos, así como los valores límites fijados por la especificación.

El segundo de los bloques, desarrollado en los capítulos 5 y 6, engloba la totalidad del proceso hasta conseguir la optimización del sistema completo de sujeción. Se parte de la experiencia previa obtenida en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, eligiendo una sujeción elástica e indirecta, del tipo HM, en la que se irán introduciendo algunas modificaciones, hasta definir el sistema de sujeción óptimo. En la Figura 1.5 [8], se muestra el aspecto que presenta este tipo de sujeciones formada por cuatro componentes: anclaje, placa de asiento, placa acodada aislante y clip elástico.

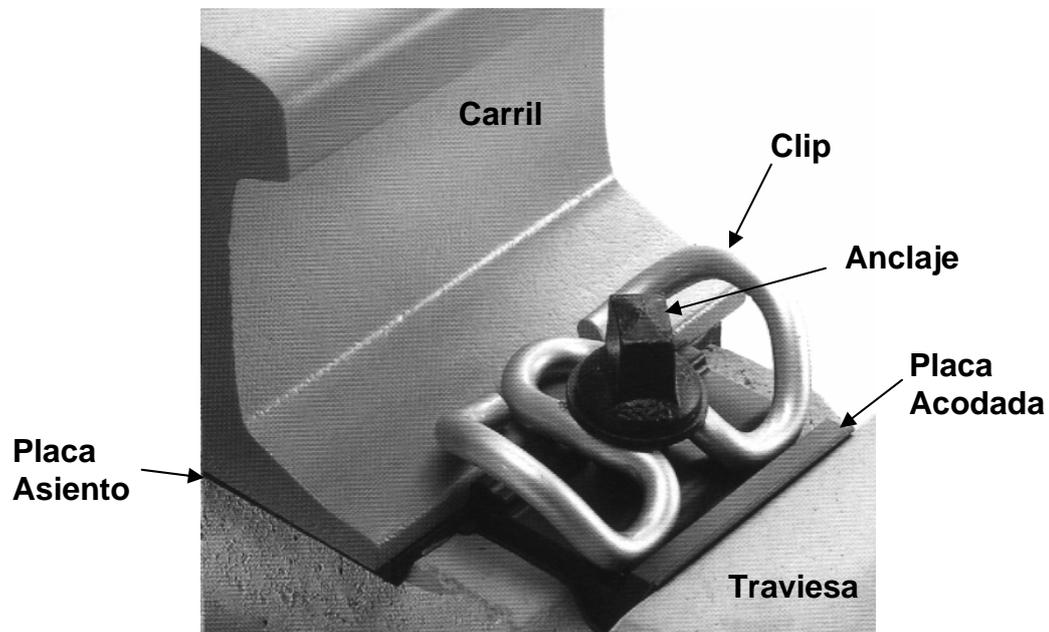


Figura 1.5.- Sistema de sujeción tipo HM [8]

Se comienza con una amplia descripción de cada uno de los elementos individuales seleccionados en un principio como posibles candidatos para formar parte del sistema de sujeción óptimo que montarán las líneas de alta velocidad. A la dificultad de elegir los componentes más adecuados de entre los seleccionados de partida, en base a las especificaciones propias de cada componente, se suma la imposibilidad de comprobar todas las posibles combinaciones, dado que, los ensayos propuestos en la especificación técnica son, en muchos casos, demasiado largos. La solución adoptada consistió en caracterizar diferentes configuraciones de sistemas de sujeción en las que se intercambiaban los componentes seleccionados de partida. El análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de la especificación, se acompañó con la realización de pruebas específicas complementarias que ayudaron a la toma de la decisión final.

Una vez definidos cuáles son los componentes óptimos para la sujeción del tren de alta velocidad, el último de los bloques que incorpora la presente Tesis corresponde al análisis del comportamiento de todos y cada uno de los componentes del sistema de sujeción, así como de la sujeción al completo.

Con el estudio de los elementos individuales, en el capítulo 7, se pretende analizar propiedades que, en conjunto, serían difíciles de asignar a uno u otro componente. Para realizar este control ha sido necesario el diseño de útiles y ensayos específicos para cada componente. Se estudia, también, si la acción de agentes externos puede modificar el comportamiento de los diferentes elementos caracterizados.

Dos de los cuatro componentes de la sujeción tendrán en su composición poliamida, material fuertemente higroscópico, por lo que, ha sido necesario incluir en un estudio anexo, el análisis de la influencia del contenido de humedad en el comportamiento de las poliamidas. Se centrará el estudio en el efecto que el agua genera sobre el comportamiento mecánico, pero, también, se revisará su influencia sobre otras propiedades como las eléctricas o las dimensionales.

Por último, en el capítulo 8 se evalúa el comportamiento conjunto de la solución definitiva propuesta. Para este estudio, se recurre, de nuevo, a la aplicación de la especificación técnica, obteniendo resultados respecto a la influencia de parámetros de diseño o montaje como la rigidez de la placa de asiento, la fuerza de apriete del conjunto o, en general, la geometría de ciertos componentes, sobre la respuesta global del sistema. También, se trata de establecer la influencia entre diversos componentes y de esta forma localizar posibles interrelaciones entre dos o más elementos del sistema.