

Estructura para prototipo funcional de un sistema automatizado de transporte de mercancías

Framework for a functional prototype of an automated goods transport system

Manuel Biedma García^a, Pablo Álvaro Gutiérrez^b, Gonzalo de la Cruz Alcalá^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe del Departamento de Estructuras Metálicas y Procedimientos Constructivos. manuel.biedma.garcia@acciona.com

^b Ingeniero Industrial. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos de Estructuras. paalvarog@acciona.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos de Estructuras. gocruz@acciona.com

RESUMEN

Se ha realizado el proyecto y la construcción de una pista de pruebas para un prototipo funcional del Sistema Automatizado de Transporte de Mercancías desarrollado por Zeleros. El proyecto se enmarca en el desarrollo de un motor lineal capaz de trasladar cargas en dos escenarios o misiones. Para su funcionamiento se hace necesario establecer unos límites muy estrictos de deformaciones y de tolerancias de montaje de las estructuras. En este caso las estructuras que diseñamos y construimos están fuera de toda tolerancia indicadas en las normas de construcción metálica, y es necesario “inventar” la manera de montar cada elemento de la estructura con holguras del orden de décimas de milímetro.

ABSTRACT

The project and construction of a test track for a functional prototype of the Automated Goods Transport System developed by Zeleros has been carried out. The project is framed in the development of a linear motor capable of moving loads in two scenarios or missions. For its operation it is necessary to establish very strict limits of deformations and assembly tolerances of the structures. In this case, the structures we design and build are outside any tolerance indicated in the steel construction standards, and it is necessary to “invent” a way to assemble each element of the structure with tolerances in the order of tenths of a millimeter.

PALABRAS CLAVE: tolerancias, innovación, tecnología de la construcción, prototipo.

KEYWORDS: tolerances, innovation, construction technology, prototype.

1. Concepto del proyecto

Enmarcado dentro del programa Eurostars desarrollado por Zeleros se ha diseñado y construido la estructura soporte de un Motor Lineal, necesaria para la realización de un

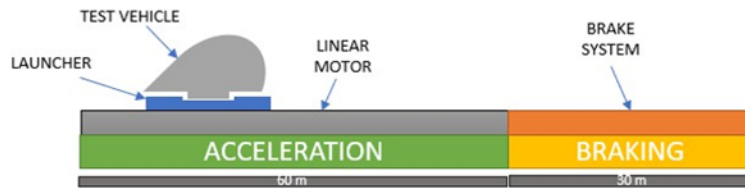
prototipo funcional de un Sistema Automatizado de Transporte de Mercancías.

El motor lineal, ahora en estudio, podría tener varias aplicaciones en el transporte.

Mission I - High speed demonstrator

Q3 2022

- Target Speed = V_{max} [km/h]
- Mass < 200 [kg]



Mission II - Cargo transport demonstrator

Q1 2023

- Target Speed = 40 [km/h]
- Mass ≥ 1000 [kg]

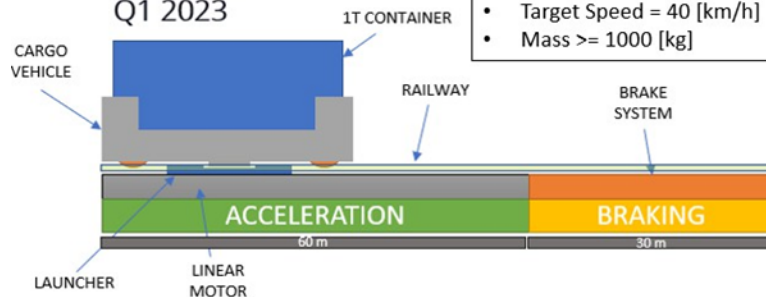


Figura 1. Misiones del proyecto.

Su uso en diferentes áreas permitiría abrir campo a sistemas de transporte no contaminante, dando paso así a un sistema más limpio medioambientalmente.

Una aplicación directa podría ser su uso en sistemas de transportes de mercancías de los puertos, aeropuertos o zonas de logística, todos ellos necesitados de energías limpias, lo que permitiría un incremento de la automatización y eficiencia de estos sistemas en cada uno de ellos.

El prototipo funcional de un Sistema Automatizado de Transporte de Mercancías desarrollado por Zeleros en el marco del programa Eurostars, consta de un motor lineal y de todo lo necesario para cumplir con las dos misiones principales que se prueban indicadas en la Figura 1.

En un principio, tal y como se concibió el proyecto, los primeros 60 m de la pista corresponden a la fase de aceleración del vehículo y requerirán un motor lineal, mientras que los últimos 40 m de la pista se reservarán para el frenado del vehículo.

La pista de pruebas se construye en Puerto de Sagunto, en Valencia, en un lugar próximo al mar.

2. ¿Qué es un motor lineal?

Un motor lineal es una versión "desplegada" de un motor eléctrico convencional que genera movimiento lineal en lugar de rotatorio. En lugar de un eje que gira, un motor lineal produce un empuje o tracción directa en línea recta. Aquí se explica su funcionamiento de manera sencilla:

Los componentes principales de un motor lineal son:

Estátor: Es la parte fija, que contiene bobinas eléctricas enrolladas. En un motor lineal, el estátor se extiende a lo largo de la trayectoria deseada.

Slider, rotor o translator: En un motor lineal, este componente se desplaza a lo largo del estátor y puede ser un imán permanente o una pieza conductora.

Fuente de energía eléctrica: Suministra corriente eléctrica al estátor para generar campos magnéticos.

El motor lineal opera con el mismo principio del electromagnetismo que un motor eléctrico rotatorio:

Generación del campo magnético: Cuando una corriente eléctrica pasa por las

bobinas del estátor, se genera un campo magnético que varía en el espacio.

Interacción con el slider: Este campo magnético interactúa con el rotor, generando fuerzas magnéticas que producen un movimiento lineal.

Movimiento continuo: La corriente eléctrica en las bobinas del estátor se controla cuidadosamente para que el campo magnético

"avance" de manera lineal, empujando o tirando del rotor en línea recta.

El estátor genera un campo magnético que "arrastra" al slider, de manera síncrona (se crean sucesivos campos magnéticos en diferentes zonas sucesivas del estátor, y en tiempos sucesivos separados décimas de segundo), de manera que arrastra el slider.

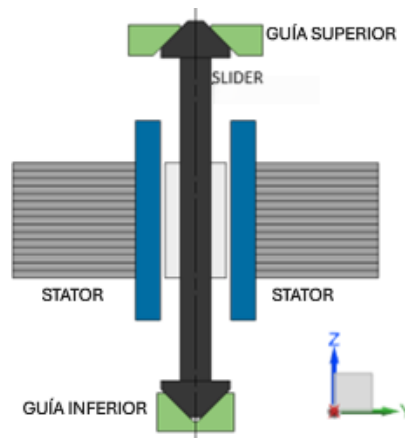


Figura 2. Vista frontal del estátor, los carriles guía y el translator.

Para generar el movimiento del slider se utiliza el principio de atracción de un material (el slider) hacia la región de mayor densidad de flujo magnético.

El slider necesita unas guías tanto superior como inferior, que le obliga a no salir del trazado que debe seguir en su movimiento. En realidad, según estaba previsto en un principio, para los primeros 60 m se requiere una interfaz de motor lineal, así como carriles de guiado del vehículo. Para los últimos 40 m, no

será necesario alojar un motor lineal, pero sí los raíles de guiado. Posteriormente se decidió acortar la longitud del banco de pruebas como consecuencia de la limitación del presupuesto dedicado a este proyecto de innovación.

Como ya se ha comentado, el sistema de tracción magnética, llamado motor lineal, se compone de una parte fija (estátor) y una parte móvil (slider). El estátor precisa de apoyo, para lo que se conforma una estructura que apoya sobre la cimentación y que alberga el estátor.

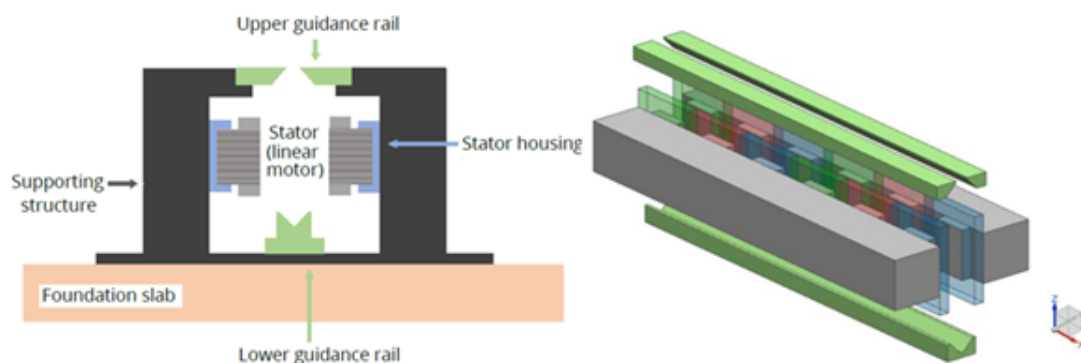


Figura 3. Vista conceptual de una sección de la infraestructura de la pista de pruebas.

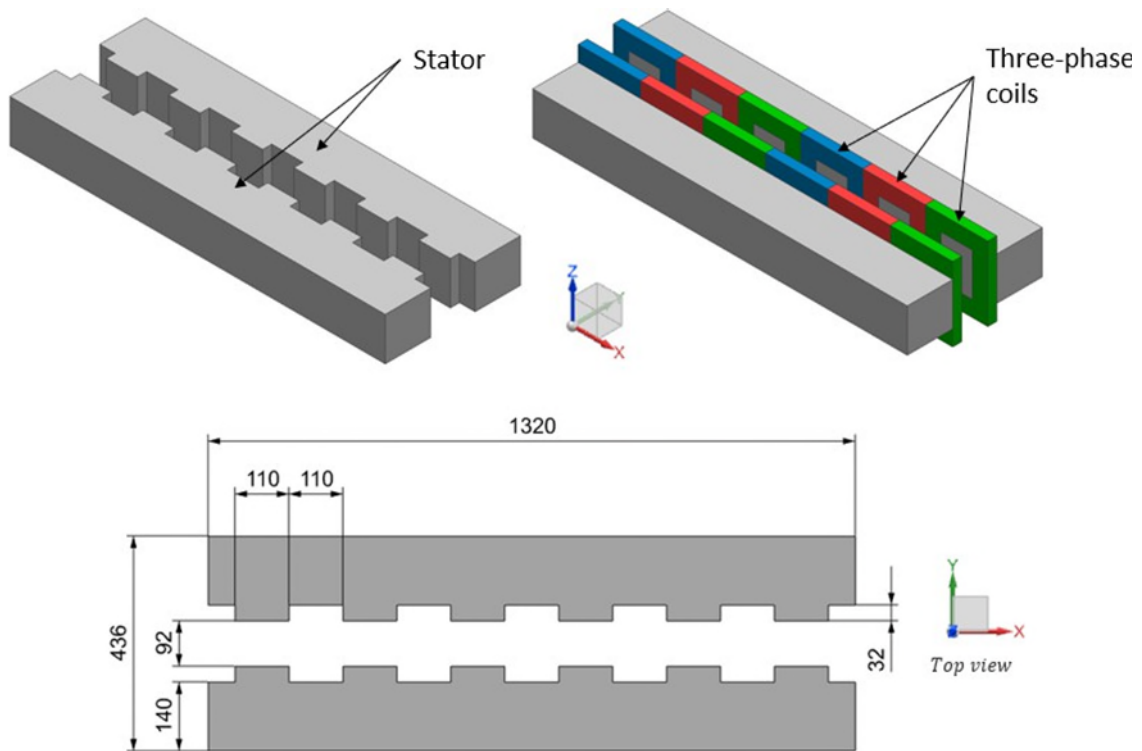


Figura 4. Vistas del estátor.

En la Figura 4 se muestran otras vistas del estátor, incluidas las tres fases diferentes de la bobina. En Figura 5 se muestra una representación esquemática del slider o traductor sin las interfaces deslizantes en las guías y sus dimensiones más relevantes.

El slider consta de cuatro dientes magnéticos de acero que generan el movimiento al interactuar con el campo magnético generado por el estátor.

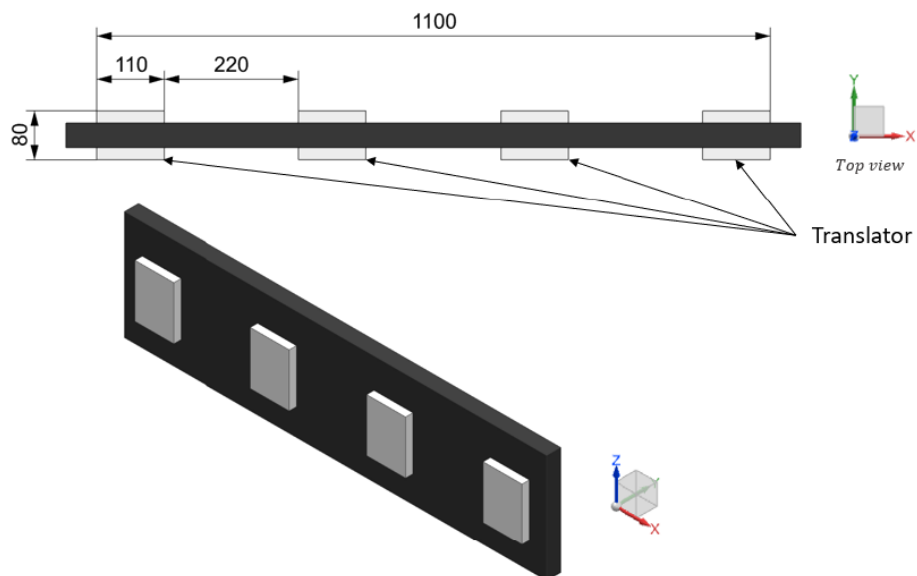


Figura 5. Vistas del slider.

Se prevén dos maniobras de transporte diferente:

- Misión I: Desplazamiento a la velocidad máxima del slider con masa igual o inferior a 200 kg.

- Misión II: Desplazamiento a 40 km/h de un carro unido al slider que circula por unos carriles con masa igual o superior a 1000 kg. Se lleva a cabo con un vehículo de transporte de carga de 1.000 kg arrastrado por el slider a lo largo de toda la pista de pruebas. El plan consiste en diseñar ese vehículo como un carro de cuatro ruedas que pueda soportar el peso requerido. Este carro debe ser guiado para evitar que se desplace lateralmente, lo que podría dañar el motor lineal y la infraestructura. Por lo tanto, serán necesarios dos raíles in situ, separados por la distancia entre las ruedas del vehículo.

3. Requisitos geométricos

El diseño de la estructura soporte de las interfaces, debe realizarse respetando las dimensiones y ubicación relativa de las partes descritas en el apartado anterior: Guía superior, Carril guía inferior y Estátor (motor lineal).

El diseño de la estructura soporte del estátor se ha realizado teniendo en cuenta que podría ser necesario colocar más sensores, a los ubicados en principio.

Además, la estructura soporte se ha diseñado teniendo en cuenta que puede requerir ser modificada en el futuro, para probar y validar otras tecnologías escalables diseñadas por Zeleros.

El motor lineal se ha diseñado para una separación nominal de 6 mm entre el estátor y el Slider, como se indica en la figura 6. En cualquier caso, estas medidas están ligadas a las deformaciones admisibles que se indican más adelante y a las tolerancias de ejecución y de montaje, que han sido lo complejo en la definición de la estructura metálica.

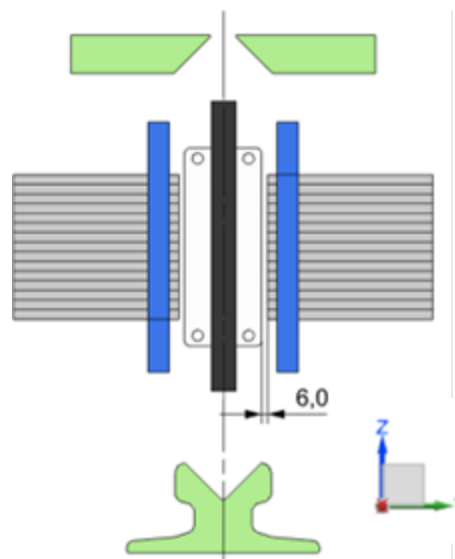


Figura 6. Vista frontal de la separación entre el estátor y el slider.

4. Requisitos funcionales

Además de la función principal de la estructura, la de resistir los esfuerzos derivados del funcionamiento del motor lineal, existen otros requisitos funcionales que debe cumplir la estructura soporte. Uno de los más importantes es la necesidad de mantenimiento. Para permitir el mantenimiento del estátor, éste debe poder ser extraído a través de la abertura superior. Además, otros elementos del interior de la estructura deben permanecer accesibles para su reparación y cambio.

Por otro lado, los primeros y últimos 2m de la estructura necesitan permitir la fácil extracción, en sentido vertical, del translador. Esta acción se realizará con regularidad y, por lo tanto, la facilidad de extracción tiene que ser superior aquí que en el resto de la vía por cuestiones de mantenimiento.

Para detener el vehículo, se instalará un sistema de eslingas con el que el vehículo se detendrá gradualmente mediante la extensión de una banda elástica. Para que esta banda elástica no se vea atrapada por ninguna irregularidad vertical, es necesario que la superficie horizontal superior de la estructura sea plana y continua y no presente irregularidades que puedan interferir con este sistema de frenado.

Además, es necesario que haya suficiente espacio cerca del carril de guiado superior para colocar el sistema de guiado lineal. La trayectoria del sistema de posicionamiento tiene que estar libre de obstáculos.

La estructura de soporte debe permitir la colocación de todos los sensores necesarios, su cableado y la estructura soporte de las bobinas: La estructura deberá disponer de espacio suficiente en la parte superior del estátor para alojar el cableado de las bobinas y los posibles sensores, y deberá permitir las canalizaciones eléctricas previstas a lo largo de la misma y en la cimentación de hormigón. Incluso la estructura dispondrá de las fijaciones o los orificios de montaje necesarios para montar los elementos del codificador.

El carril guía inferior discurrirá a lo largo de toda la estructura y se fijará mediante clips comerciales que permitan la alineación tanto en la dirección z vertical como en la dirección y transversal.

Cada carril de guiado superior debe poder ser ajustado individualmente en la dirección horizontal, como se muestra en la figura 7, para permitir la accesibilidad al interior de la estructura y el ajuste preciso de la guía.

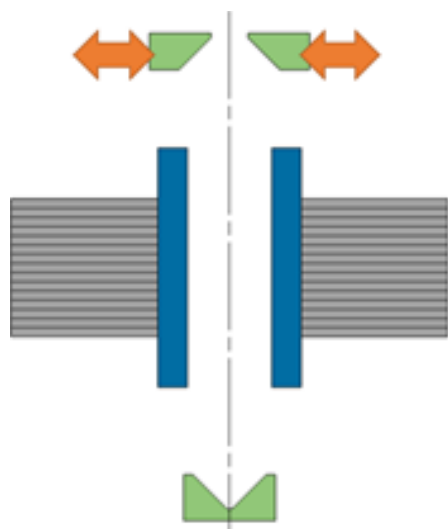


Figura 7. Ajuste requerido en guía superior.

La losa de hormigón sobre la que se montará la estructura de soporte deberá tener una planitud con una tolerancia de ± 5 mm.

5. Tolerancias de deformación

Además de las verificaciones estructurales habituales en toda estructura metálica y de acuerdo con la sección, se admitirá en condiciones de servicio, un desplazamiento transversal de la estructura de 0,3 mm.

Este desplazamiento se mide de forma relativa entre los distintos elementos de la estructura que interaccionan con el traductor, el plano de contacto del carril superior y la superficie del paquete estátor.

Si el desplazamiento de ambos elementos tiene el mismo signo, se considerará el mayor de ellos, mientras que, si ambos son de sentido contrario, se considerará la suma en valor absoluto de ambos valores

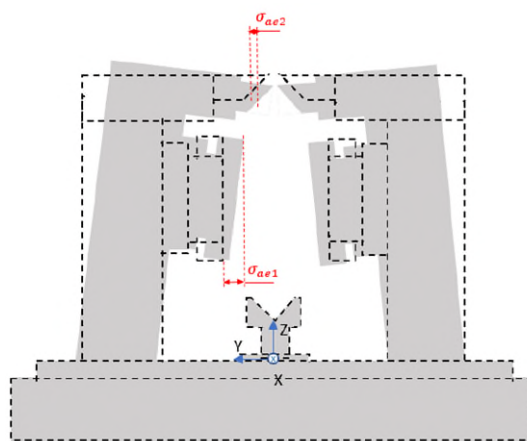


Figura 8. Esquema de desplazamientos a controlar durante el funcionamiento de la estructura.

En resumen, los desplazamientos transversales del estátor (σ_{ae1}) y el carril de guiado superior (σ_{ae2}) deben verificar:

- Si σ_{ae1} y σ_{ae2} tienen el mismo signo:
 $\sigma_{ae1}, \sigma_{ae2} < 0.3\text{mm}$
- Si σ_{ae1} y σ_{ae2} tienen signo opuesto:
 $\sigma_{ae1} + \sigma_{ae2} < 0.3\text{mm}$

Los desplazamientos medidos durante la realización de las pruebas fueron del orden del 85% de los límites indicados.

6. Tolerancias de fabricación y de montaje

Para que el sistema del motor lineal funcione adecuadamente es necesario, además, fabricar y montar la estructura con unas muy estrictas tolerancias de montaje. Indicado cada parámetro en la figura 9, se definen las desviaciones máximas entre superficies que limitan estos parámetros.

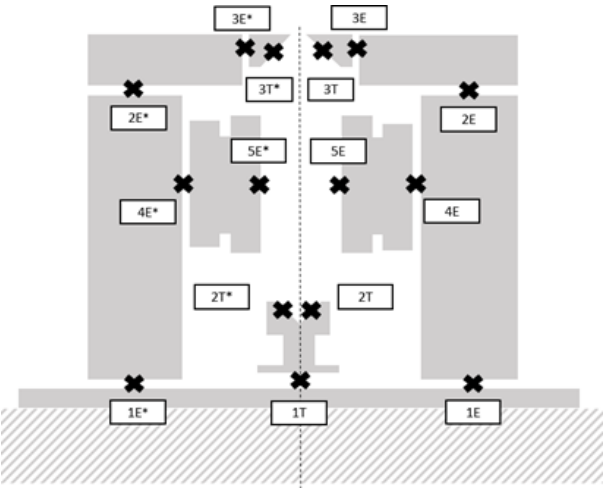


Figura 9. Vista esquemática de los parámetros de tolerancia de montaje.

- **1T-4E**: se define como la desviación máxima de medida permitida entre la superficie de apoyo del carril inferior y la superficie de apoyo del estátor.
- **4E-5E**: se define como la desviación máxima de medida permitida entre la superficie de apoyo del estátor y la superficie libre del estátor.
- **3E-4E**: se define como la desviación de medida máxima permitida entre la superficie de apoyo del estátor y la superficie de apoyo del carril superior.
- **3E-3T**: se define como la desviación de medida máxima entre la superficie de apoyo del carril superior y la superficie de deslizamiento del carril superior.
- **1T-2T**: se define como la desviación de medida máxima permitida entre la superficie de apoyo

del carril inferior y la superficie de deslizamiento del carril inferior.

Tabla 1. Tolerancias de montaje de la estructura soporte del estátor.

Parámetro	Tolerancia (mm)
1T-4E	$\pm 0,20$
4E-5E	$\pm 0,35$
3E-4E	$\pm 0,15$
3E-3T	$\pm 0,15$
1T-2T	$\pm 0,15$

Las diferentes partes de la estructura y del estátor deben garantizar tolerancias de fabricación inferiores a los valores indicados.

7. Claves del proyecto y el vado de Yaboc

Los ingenieros de estructuras en el desarrollo habitual de sus trabajos se mueven en órdenes de magnitud de esfuerzos, de tensiones y de deformaciones. Sin embargo, cuando nos movemos en el campo de la física, es decir, en el campo de ciencias más exactas, se hace necesario establecer unos límites muy estrictos de deformaciones y de montaje de las estructuras. En este caso las estructuras que diseñamos y construimos están fuera de toda tolerancia indicadas en las normas de construcción metálica y es necesario “inventar”, tener recursos, para dejar la estructura en su sitio, dotándola además de la rigidez necesaria para que las deformaciones no condicionen los datos obtenidos en los ensayos.

Como Jacob en el vado de Yaboc, nos enfrentamos durante el diseño a una lucha entre sombras sin saber muy bien a quién nos enfrentábamos. Golpes, vueltas y más vueltas. Y asumimos nuestra derrota. Más tarde, perdidos en el abrazo de la ciencia, vencimos, y el proyecto salió adelante.

8. Definición de la estructura

La estructura soporte para el motor lineal diseñada consiste en una sucesión de soportes formados por 4 elementos: Poste vertical, Ménsula inferior, Montante inclinado y Ménsula superior.

Esta estructura sirve tanto para soportar verticalmente los paquetes del estátor sobre las ménsulas inferiores, como para transmitir las cargas de funcionamiento del motor lineal (sobre los apoyos de las bobinas y sobre los carriles superiores) y mantener las deformaciones por debajo del límite admisible. Para garantizar que todos los paquetes que conforman el estátor

apoyan en dos pórticos, su espaciado fundamental será igual a la longitud del paquete del estátor.

Sobre estos postes verticales se fija una viga longitudinal con sección en “H” constituida por un perfil armado de 180 mm de canto (Detalle 08). La fijación a los postes se hará mediante uniones atornilladas para priorizar la flexibilidad del proceso de montaje. A este perfil, se atornillan mediante unos angulares en “L” los sucesivos paquetes del estátor (Detalle 04). Esta unión acogerá tanto un tornillo de fijación como tornillos de regulación.

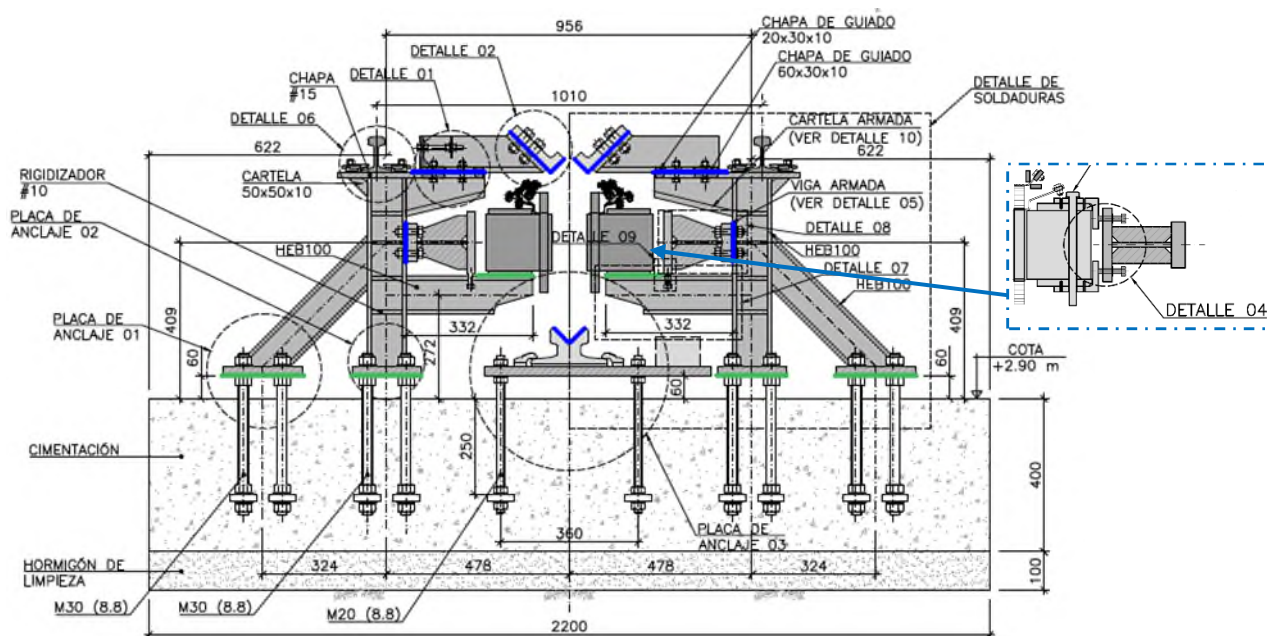


Figura 10. Sección transversal del conjunto.

Todos los elementos descritos hasta ahora forman un conjunto que será montado en taller y trasladado al lugar de instalación. La longitud de estos módulos se ha limitado a 5280 mm, es decir la longitud correspondiente a 4 módulos de estátor. Esta longitud viene impuesta por las dimensiones de los puentes de mecanizado que habitualmente pueden acoger piezas de 6 m de largo. Como se puede observar

los vanos exteriores son de 1100 mm, dejando un voladizo de 220 mm en cada extremo de la estructura. La distancia entre pórticos es, por tanto: 1100 mm - 1320 mm - 1320 mm - 1100 mm. Esta configuración permite por un lado controlar las deformaciones horizontales del perfil longitudinal y por otro acoger las juntas entre módulos en los voladizos extremos, sin interferir con los postes verticales.

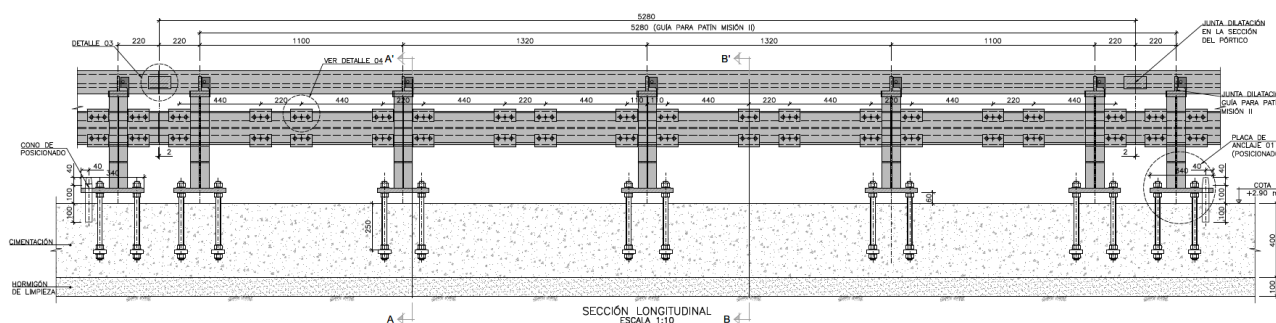


Figura 11. Vista longitudinal de un módulo.

El otro conjunto es el formado por los carriles superiores y por los perfiles en “T” invertida de 100 mm de ancho por 95 mm de alto y 15 mm de espesor que se conectan con una unión atornillada. Estos módulos, cuya longitud es también de 5280 mm, se unen al conjunto de soportes mediante una unión atornillada entre el ala de la “T” invertida y el chapón superior. Ambas uniones contarán con agujeros rasgados en dirección transversal en los cuales se utilizarán tornillos pretensados M12 (10.9) para poder fijar la unión durante el funcionamiento, y a la vez permitir el deslizamiento para la regulación y ajuste de la máquina.

El único elemento que tiene continuidad en las juntas es el conjunto de carriles superiores. La unión entre tramos adyacentes se hará mediante 2 chapones que abrazan el lado largo de los carriles a ambos lados de la junta. Sobre uno de los lados los agujeros serán rasgados para permitir la relajación de los axiles de origen térmico. El resto de los movimientos y giros sí tendrán continuidad a través de la junta.

Todos los soportes se apoyan sobre una losa de hormigón armado de 40 cm de espesor y 220 cm de ancho. Las placas de anclaje de los soportes deben permitir la regulación vertical de los módulos, por lo que serán elevadas respecto a la cara superior del hormigón. Esta solución permitirá asimismo el paso libre de los cables bajo el carril inferior de un lado al otro de la estructura.

En general, la estructura se define con múltiples regulaciones verticales y horizontales necesarias para el funcionamiento y puesta a punto del sistema.

Además, todas las superficies coloreadas en color verde y azul indicadas en la Figura 9 fueron mecanizadas en la manera necesaria para cumplir con unas exigencias tan restrictivas de fabricación y de montaje, fuera de toda norma.

Una vez definida la estructura y sus mecanizados, se construyó en los Talleres Centrales de Acciona, y Acciona Construcción ejecutó la obra, mientras Acciona Ingeniería además de diseñador de la estructura desarrolló las tareas de Asistencia a la obra.



Figura 12. Estructura soporte del motor lineal en taller.

9. Ejecución de la obra.

Para la ejecución de la obra fue necesario proyectar una plantilla que ayudara a la colocación de los anclajes (108) embebidos en la losa de hormigón para cada módulo metálico.

Se definió durante la redacción del proyecto las diferentes fases de la construcción de la estructura soporte del motor lineal. Las fases del

proceso constructivo definidos para la construcción civil del proyecto fueron las siguientes:

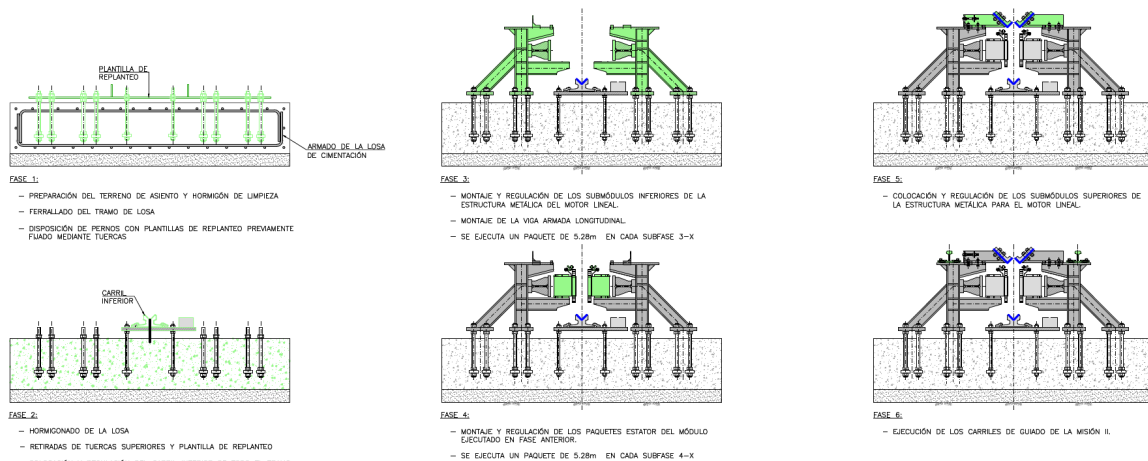


Figura 13. Fases del proceso constructivo.

10. Pruebas realizadas

Una vez ejecutada la obra civil, Zeleros montó todo el sistema eléctrico y puso en marcha el proyecto para la realización de las pruebas pertinentes y ensayos necesarios para poner a punto el sistema ideado para el motor lineal.



Figura 14. Estructura soporte del motor lineal

Se han realizado las pruebas tanto de la Misión 1 como de la Misión 2. Se han probado varias tolerancias de montaje de la guía superior, así como varias distancias entre las bobinas del

estátor y el slider, obteniendo el ajuste más idóneo de acuerdo con el comportamiento físico del slider en el conjunto del motor lineal.

Se han comprobado los ajustes teóricos con el modelo real, y el proyecto ha cumplido su objetivo.



Figura 15. Prueba de la Misión 2.

Referencias

- [1] G. M. Ilaria. Timeline: tracing the evolution of hyperloop rail technology. Rail Technology Website. March 2021.
- [2] Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. EN 1993.