



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos
Área de Ingeniería Mecánica**

TRABAJO FIN DE GRADO

Dispositivo encarrilador para carriles embebidos

Grado en Ingeniería Mecánica

Autora Aida Romero Quintana

Tutor Sergio Postigo Pozo

Cotutora M.^a Belén Estébanez Campos

Fecha 12 de enero de 2024

AGRADECIMIENTOS

A quienes me han acompañado durante este loco y maravilloso viaje.

A mis chicos, gracias por esas risas que me habéis dado, sobre todo en momentos donde dudé de mí misma.

A mis padres, gracias por esta segunda oportunidad y por ese gran capote, que, sin duda, si no fuese por vosotros, no hubiese sido posible. Parte de esto os pertenece.

Una especial mención a aquellos Profesores y Profesoras que, al compartir sus clases, tuvieron que: aclararme todas mis dudas, debatido todos mis razonamientos, discutido todas mis inconformidades, aguantado mis intentos de revolución y, sobre todo, por ese tiempo concedido en las innumerables tutorías; sí, a aquellos que, a diferencia del resto, llevan esta preciosa profesión a un siguiente nivel, y por ello, agradecerles esa infinita paciencia.

Simplemente gracias.

RESUMEN

En la actualidad, el ferrocarril se ha convertido en el transporte interurbano más rápido, puntual y cómodo. Tiene y tendrá un papel determinante, sobre todo en los años venideros, como transporte sostenible para la mejora de la situación ambiental y social.

Por ello, impera el hecho de buscar soluciones a uno de los problemas más comunes del ferrocarril cuando circula por vía y es: el descarrilamiento.

Actualmente no existen encarriladores para railes embebidos de ahí la importancia de buscar alternativas creativas a las actuales. Los sistemas de encarrilamiento, que existen en el mercado, son deficientes, sea por la lentitud del proceso de su reinserción en vía como la inadecuación del uso en carriles de garganta, por ello supone un reto al encontrar un camino diferente en un mercado inexistente.

En el presente proyecto se parte de una serie de hipótesis basadas en el trazado de las vías de los ferrocarriles, así elaborar un adecuado camino de rodadura con el fin de poder embocar la rueda en el carril.

Gracias a este diseño se persigue una optimización del restablecimiento de la circulación en vía, siempre con la mira puesta en los usuarios del transporte y al resto de posibles afectados que puedan verse repercutidos por los retrasos de los servicios de los operarios.

Así mismo, se diseña un dispositivo de bajo peso, cómodo, al transportar por cualquier vehículo que use el operario. Cabe destacar también su simplicidad de diseño, aportando así una facilidad en su fabricación y un bajo coste del mismo.

PALABRAS CLAVE

Encarrilador, carril embebido, descarrilamiento, ferrocarril.

ABSTRACT

Nowadays, the railway has become the fastest, most punctual and comfortable intercity transport. It has and will have a decisive role, especially in the next future, as sustainable transport to improve the environmental and social situation.

Therefore, it is imperative to look for solutions to one of the most common problems of the railway when trains run on railway tracks: derailment.

Currently there are no rerailers for grooved rails, hence the importance of looking for creative alternatives to the current ones. The rerailing systems that exist on the market are deficient, either due to the slowness of the process of reinsertion into the track or the inappropriate use in grooved rails, so finding a new method in a missing market suppose a challenge.

This project is based on a series of hypotheses about the layout of the railway tracks, thus the aim of creating an adequate method that is able to fit the wheel into the rail.

Thanks to this design, It is pursuing a optimisation of the reestablishment to run railways in track, always with consideration for the passengers and everyone who may be affected by trains delays for the railway maintenance services.

Likewise, it is designed a lightweight and comfortable device that any worker in railway maintenance can transport it in any vehicle. This is also worth noting the simplicity of design, thus providing ease of manufacture and low cost.

KEYWORDS

Rerailer, grooved rail, derailment, railways

Índice

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Introducción | 2 |
| 1.1 | Antecedentes | 2 |
| 2.2 | Planteamiento del problema | 5 |
| 2.3 | Objeto | 7 |
| 2.4 | Alcance..... | 7 |
| 2. | Introducción a la ferroviaria..... | 9 |
| 2.1 | Definición ferrocarril..... | 9 |
| 2.2 | Clasificación del sistema ferroviario..... | 9 |
| 2.3 | Elementos físicos que componen el sistema ferroviario. | 11 |
| 2.4 | Material rodante | 15 |
| 3. | Requisitos y condicionantes del diseño | 19 |
| 3.1 | Requisitos geométricos | 19 |
| 3.2 | Parámetros condicionantes | 19 |
| 3.3 | Plataforma ferroviaria | 21 |
| 4. | Metodología | 23 |
| 4.1 | Supuestos y su problemática | 23 |
| 4.2 | Marco teórico | 24 |
| 4.2.1 | Trazado geométrico | 24 |
| 4.2.2 | Aspectos técnicos para el cálculo de un desvío..... | 27 |
| 4.3 | Aplicación del marco normativo | 32 |
| 5. | Evolución del diseño..... | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6. | Propuesta del diseño | 39 |
| 7. | Análisis preliminar | 45 |
| 7.1 | Introducción al método de elementos finitos | 45 |
| 7.2 | Metodología previa para el análisis..... | 47 |
| 7.2.1 | El proceso de convergencia..... | 48 |
| 7.3 | Condiciones de contorno..... | 49 |
| 7.3.1 | Material | 49 |
| 7.3.2 | Condiciones de carga | 50 |
| 7.3.3 | Condiciones de apoyo | 51 |
| 8. | Análisis del comportamiento | 54 |
| 8.1 | Primer análisis | 54 |
| 8.2 | Segundo análisis..... | 56 |
| 8.3 | Tercer análisis..... | 59 |
| 8.4 | Iteración..... | 60 |
| 8.5 | Mallado..... | 62 |
| 8.6 | Ajuste del mallado local..... | 63 |
| 9. | Resultados | 66 |
| 10. | Conclusiones | 71 |
| 11. | Bibliografía | 73 |
| | ANEXOS | 76 |
| | Anexo 1 | 77 |
| | Anexo 2..... | 79 |
| | PLANOS..... | 81 |

Planos..... 82

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Trabajos de encarrilamiento con grúa [8]..... | 2 |
| Figura 2. Sistemas hidráulicos para trenes [10]..... | 3 |
| Figura 3. Encarriladores tipo calzos [12]..... | 4 |
| Figura 4. Rerailer equipment in the Railway Museum, Guatemala City [16]..... | 4 |
| Figura 5. Localización Google Maps Línea 1 y rutas de entrada al Hospital Virgen | 6 |
| Figura 6. Carril Brunel [17]..... | 12 |
| Figura 7. Carril Vignole [17]..... | 13 |
| Figura 8. Carril de garganta o Phoenix [17]..... | 13 |
| Figura 9. Partes del carril [17]..... | 14 |
| Figura 10. Ancho de vía [17]..... | 14 |
| Figura 11. Partes del bogie [17]..... | 16 |
| Figura 12. Eje y ruedas [17]..... | 17 |
| Figura 13. Parámetros de la rueda..... | 18 |
| Figura 14. UNE-EN 14811 carril 56R1 [23]..... | 20 |
| Figura 15. Vía en placa | 21 |
| Figura 16. Posición rueda carril con determinado ángulo | 23 |
| Figura 17. Clotoide [17]..... | 25 |
| Figura 18. The Railway Transition Spiral [14]..... | 25 |
| Figura 19. Tramo con espiral de transición..... | 26 |
| Figura 20. Partes de un desvío ferroviario NAV 3-6-0.0 [21]..... | 27 |
| Figura 21. Elementos que componen el cruzamiento | 28 |
| Figura 22. Paso de la rueda por la laguna y sus puntos de apoyo..... | 29 |
| Figura 23. Cruzamiento Figura 2.2.1.1a NAV3-6-0.0 [21]..... | 29 |
| Figura 24. Fuente (Fernández 2013) [4] | 30 |
| Figura 25. Ángulo de cruzamiento [21]..... | 31 |
| Figura 26 UNE EN 3-6-0.0 Semejanzas ángulo corazón y ángulo de cruzamiento [21] . | 32 |
| Figura 27. Diseño inicial..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 28. Fotografía encarrilador Metro-North Derailment Recovery [10]..... | 35 |
| Figura 29. Evolución del diseño | 36 |
| Figura 30. Planteamiento el problema del saliente | 37 |
| Figura 31. Propuesta del diseño | 39 |
| Figura 32. Cálculo del desvío NAV 3-6-0.0 [21]..... | 40 |
| Figura 33. Bocetos | 40 |
| Figura 34. Partes importantes de la justificación del diseño..... | 42 |
| Figura 35. Partes de la justificación del diseño..... | 43 |
| Figura 36. Diseño saliente inferior..... | 43 |
| Figura 37. Diseño inicial escalón..... | 44 |
| Figura 38. Visualización zona intermedia..... | 44 |
| Figura 39. Diseño salida del dispositivo | 44 |
| Figura 40. Diagrama de flujo | 48 |
| Figura 41. Huella y forma de la distribución de la carga. [14] | 50 |
| Figura 42. Parámetros que definen tamaño de la huella (Rovira,2012) [14]..... | 51 |
| Figura 43, Superficie de la vía | 52 |
| Figura 44. Puntos de apoyo con adoquines..... | 52 |
| Figura 45. Apoyos fijos..... | 53 |
| Figura 46. Resultado deformación primer análisis | 55 |
| Figura 47. Resultado de primer análisis tensiones..... | 55 |
| Figura 48. Condiciones de apoyo mixtas | 56 |
| Figura 49. Resultado deformaciones segundo análisis | 56 |
| Figura 50. Resultado de tensiones en el segundo análisis | 57 |
| Figura 51. Valores de las tensiones tercer análisis | 58 |
| Figura 52. Visualización tensiones parte inferior..... | 58 |
| Figura 53. Soporte elástico parte inferior | 59 |
| Figura 54. Resultado tensiones | 59 |
| Figura 55. Resultados tercer mallado..... | 60 |
| Figura 56. Apoyos soporte elástico..... | 61 |
| Figura 57. Puntos de control | 62 |
| Figura 58. Configuración para control de malla local | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 59. Progresión del tamaño de malla | 64 |
| Figura 60. Resultado cociente jacobiano | 66 |
| Figura 61. Resultado cociente de aspecto | 67 |
| Figura 62. Resultado FDS..... | 67 |
| Figura 63. Volumen supera límite de ruptura..... | 68 |
| Figura 64. Resultado de la deformada | 68 |
| Figura 65. Desplazamientos globales | 69 |
| Figura 66. Resultado tensiones zona de la huella | 69 |
| Figura 67. Corte vista lateral..... | 70 |
| Figura 68. Corte vista frontal | 70 |
| Figura 69. Varios bocetos del desarrollo del diseño..... | 79 |
| Figura 70. Diseño final | 80 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tablas de medidas de las ruedas..... | 20 |
| Tabla 3. Propiedades del acero al carbono 1023..... | 50 |
| Tabla 4. Dimensiones de la huella | 51 |
| Tabla 5. Peso bogie | 51 |
| Tabla 6. Iteración de espesores | 61 |
| Tabla 7. Iteración de desplazamientos | 62 |
| Tabla 8. Control de malla local..... | 65 |
| Tabla 9. Estudio de la malla..... | 65 |

MEMORIA

1. Introducción

Este proyecto tiene como fin crear un diseño de encarrilador, que, a través de un guiado, sitúen nuevamente al bogie descarrilado sobre las vías ferroviarias. Para ello, se estudiará la manera de encontrar un diseño óptimo partiendo de modelos anteriores y usando las herramientas disponibles como Solidworks.

1.1 Antecedentes

Una vez descarrilado el tren, se requiere de precisión y mucho tiempo para volver a colocar el vehículo ferroviario de nuevo en vía.

Según cómo se declare el accidente, ya sea significativo o grave, tendrán un método de actuación diferente. Hoy en día existen sistemas tanto mecánicos, hidráulicos u otras técnicas para poder asistir al tren. A continuación, se expondrán los más representativos.

Los accidentes donde haya una salida de vía con vuelque del vagón, su reinscripción requerirá de un tren taller dotado de una grúa móvil. Se trata de un tren, que, en este tipo de casos, realiza labores de rescate tales como encarrilar o retirar el material móvil, Figura 1, con el objetivo de reparar y desbloquear la vía. Las grúas móviles dan apoyo a estos trenes, éstos requieren de potencia necesaria para levantar una locomotora.



Figura 1. Trabajos de encarrilamiento con grúa [8]

Otra posibilidad para encarar este tipo de situaciones son los ayudados con los sistemas hidráulicos, basados en un fluido incompresible a presión de modo que transmiten la energía necesaria para elevar la maquinaria, cuya distancia a las vías sea elevada con lo que acarrea un tiempo de actuación alto. Su capacidad de elevación está en torno a 180-350 toneladas, y con un gran recorrido de elevación, Figura 2.



Figura 2. Sistemas hidráulicos para trenes [10]

Los sistemas mecánicos, como los gatos mecánicos, es otra de las alternativas, aunque su limitación reside en la capacidad de elevación entre 10-100 toneladas con un recorrido exclusivamente vertical.

En los casos donde los accidentes son significativos o leves, implica una salida de vía en el cual las ruedas están cerca del carril. Pueden usarse unos calzos colocados en la misma vía, Figura 3 y 4, estos disponen de una rampa para permitir el acceso al riel independientemente del lado donde se sitúe la rueda descarrilada.



Figura 3. Encarriladores tipo calzos [12]

Su funcionamiento consiste en el paso de la rueda por la rampa, donde el calzo levanta la rueda y la guía de regreso al riel, en ocasiones, usan bloqueadores para evitar que éstos salgan despedidos. Sus características son su poco peso, proceso fácil y rápido de encarrilado, además de ser lo suficientemente fuerte para encarrilar la locomotora.



Figura 4. Rerailer equipment in the Railway Museum, Guatemala City [16]



2.2 Planteamiento del problema

Al inicio del proyecto se propone la problemática que surge al descarrilar un vagón del metro de Málaga al circular en superficie. Generalmente, el factor desencadenante es que un turismo invade indebidamente la plataforma cuando el semáforo habilita el paso del tren.

Una vez accidentado, bloquean el paso de la circulación de vehículos, no solamente afectando e incomodando a los conductores y a los viajeros de tren, sino que, el impacto negativo ocurre en la inhabilitación de uno de los carriles de acceso al Hospital Virgen de la Victoria.

Uno de los requisitos importantes para la construcción de un hospital es su ubicación. Ésta debe ser accesible, de tal manera que se pueda llegar usando diversos medios de transporte. Por ello, es fundamental evitar las calles o avenidas que se bloqueen frecuentemente por el tráfico. Así pues, se considera una repercusión grave la obstaculización de la carretera, debido a los accidentes propiamente dichos, y ocasionando así, la imposibilidad del paso de los servicios de urgencias del hospital.

Desde 2014 hasta día de hoy, se pueden contabilizar en torno a 31 accidentes, de los cuales 3 terminaron en descarrilamiento, información cedida por la Conserjería de Fomento de la Junta de Andalucía. A causa de estos incidentes, se abrió dos vías más de entrada al hospital desde la incorporación de la autovía por Avenida Jenofonte.

El trayecto en superficie abarca un recorrido total 3 km que abarca cinco paradas de la Línea 1 de Metro Málaga: Universidad, Clínico, Cónsul, Paraninfo y Andalucía Tech. De los cuales los considerados puntos negros del trazado suburbano son los cruces de la calle Jiménez Fraud y Boulevard Luis Pasteur con la Línea 1 de Metro, donde se señalan en el mapa.

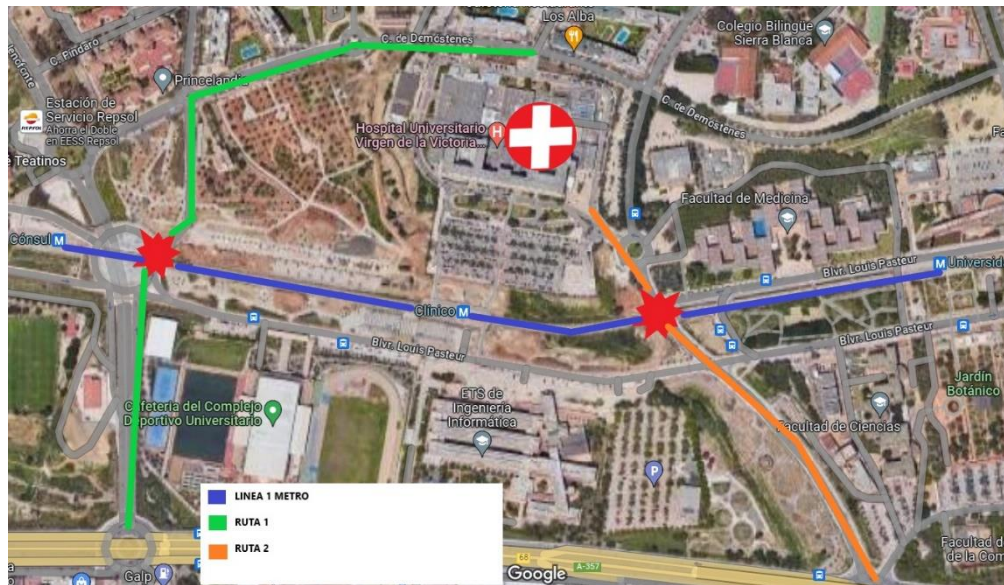


Figura 5. Localización Google Maps Línea 1 y rutas de entrada al Hospital Virgen de la Victoria

En las situaciones de emergencia el procedimiento a seguir por parte de Metro Málaga es: el operario de línea es quién informa al centro de control y, desde allí, se llama a emergencias. Además, se realiza un visionado continuo de estos puntos calientes tanto en los exteriores como en los interiores del vagón, y después, se envía el coche taller para la valoración de los daños y las posibles reparaciones in situ que pueda necesitar para la reincorporación del vagón en la vía.

A continuación, se comienza a reubicar a las demás líneas en recorridos alternativos con el objetivo de aislar la zona accidentada para facilitar las labores del servicio de emergencias, de igual manera se informa a los pasajeros de la línea con el tramo cortado.

El tiempo de restablecimiento, tanto de la Línea 1 de Metro como de la circulación del tráfico, está en torno a varias horas en adelante y, en casos de accidentes graves, en torno a un día. Considerando esto y sumado a la gravedad de la localización de los accidentes, conlleva un serio problema en la rapidez de actuación de los servicios de emergencias.

Cierto es los pocos incidentes que ha habido, y es a causa del limitado trayecto que realiza en la calzada. Por ello, la tasa de accidentabilidad es muy baja en comparación con otros metros de trazado parcial o mayoritariamente en superficie, pero no resta la gravedad del asunto.

2.3 Objeto

El objeto principal del presente proyecto es el diseño y posterior cálculo de un encarrilador ferroviario que se adecúe a las características ferroviarias de este tipo de transporte. Se persigue una viabilidad y una eficiencia en el uso del producto y, sobre todo, conseguir una rapidez de restablecimiento de la línea. Aportando una solución a la gravedad que supone el bloqueo de la entrada al hospital, añadiendo como consecuencia, a las retenciones de tráfico ocasionadas y, por ende, a los usuarios del metro.

A su vez, se busca conferir al dispositivo un bajo peso, una simplicidad en la fabricación, una comodidad en su transporte, todo ello orientado para un mejor uso de los operarios y, finalmente conseguir dar una solución óptima al descarrilamiento.

2.4 Alcance

El presente proyecto se ha orientado a ir marcando una serie de pautas a seguir delimitando el aprendizaje como trabajo de fin de grado, a su vez, consiguiendo unos objetivos en cada una de las etapas, desarrolladas a continuación:

Síntesis del marco teórico ferroviario. Se presenta un conjunto de información básica y general sobre el tema en cuestión, cuya finalidad es poseer terminología y conocimientos ferroviarios necesarios para abordar cualquier documento explicativo.

Planteamiento del problema. Abarca lo relativo a inconvenientes y ventajas que se sitúan en el marco del contexto del presente proyecto. Además, se trabaja en la consideración de las posibles soluciones.

Prediseño. Estudio previo de las soluciones ya existentes, sus aplicaciones y así fomentar la creatividad para el enfoque de los bocetos.

Diseño conceptual. A partir de los aspectos más relevantes de la anterior etapa, actuarán como requisitos indispensables para el desarrollo de este apartado. El estudio del marco ferroviario será parte indispensable para el desarrollo del diseño.



Análisis, la realización del cálculo del análisis por elementos finitos ante la sollicitación más desfavorable. Los resultados arrojados por la simulación mediante Solidworks determinaran qué aspectos habrá que modificar para cumplir la viabilidad del producto.

2. Introducción a la ferroviaria

A continuación, se ha redactado una pequeña introducción sobre el ferrocarril, conceptos técnicos y el sistema ferroviario, con el fin de facilitar la comprensión del presente proyecto.

2.1 Definición ferrocarril

Su definición clásica: es un sistema de transporte guiado sobre una vía férrea que tiene por objeto el transporte tanto de viajeros como de mercancías. [1]

2.2 Clasificación del sistema ferroviario

Para ampliar la información sobre la variedad de ferrocarriles que existen y visualizar la distinción de cada uno de los tipos, a continuación, se detallan una pequeña clasificación extraída del *Manual de ferrocarriles. El sistema ferroviario español*. [1]

i. Según el tipo de tracción

Se pueden comentar varios tipos donde la energía empleada para generar el movimiento y la tracción del tren pueden ser: vapor, diésel o eléctrico, también se puede considerar un posible uso simultáneo entre ellos, llamada tracción híbrida o dual. Actualmente se están trabajando con nuevas formas energéticas como el hidrógeno y el gas natural.

ii. Según la forma de transmisión de fuerza.

Atendiendo a la forma de transmisión de la fuerza, se puede considerar:

- Ferrocarriles de adherencia, el movimiento es a través del contacto entre el carril y rueda ambos de acero.
- Ferrocarriles cremallera, son aquellos con una rueda extra que actúa como piñón acoplado a un tercer carril dentado que se comporta como cremallera. La transmisión de la fuerza se obtiene con el agarre entre ambos. Este tipo de ferrocarriles son usados principalmente en zonas con grandes pendientes de más del 8%.
- Funiculares, constan de dos convoyes, que funcionan con un movimiento basado en el principio de vaivén, circulan sobre raíles y éstos son arrastrados por cables situados entre los

carriles. El funicular está accionado por un motor que mueve las poleas, las cuales ejercen la transmisión de la fuerza a los cables, empleando así su movimiento para la tracción.

iii. Según tipo de explotación ferroviaria

El ferrocarril se podría agrupar por líneas con características técnicas y sistemas de explotación semejantes, a estos sistemas ferroviarios se pueden encontrar:

- Ferrocarril de alta velocidad, son líneas diseñadas y equipadas para velocidades superiores a 250 km/h entre estaciones de considerable distancia.
- Ferrocarril convencional, son sistemas ferroviarios que circulan a una velocidad no superiores de 220 km/h, puede encontrarse de tracción diésel o eléctrica, además se emplea tanto para el tráfico de viajeros como de mercancías. Se señalan varios tipos de ferrocarriles convencionales según el tipo de servicio que desempeñan:
 - Suburbano o cercanías, situados en grandes núcleos de población, uno característico es el tren de cercanías de Málaga.
 - Media distancia o regionales son trenes que cubren trayectos intermedios o media distancia, es decir, rutas inferiores a 200 km a una velocidad máxima de 160 km/h.
 - Larga distancia o largo recorrido son servicios directos entre grandes núcleos de población.
- Metro o ferrocarril metropolitano, se trata de un ferrocarril generalmente eléctrico especializado en el transporte urbano con estaciones de distancias comprendidas entre 1000 metros. La configuración más habitual son recorridos subterráneos en vía doble, en caso de disponer de pasos a nivel, se da prioridad a este servicio. Es sistema de transportes apropiado para conurbaciones superiores al millón de habitantes.
- Metro ligero o tren ligero, opera en tramos subterráneos como un ferrocarril metropolitano o bien separado del tráfico donde hay un carril especial enrasado con la superficie de las calles sin tener barrera física entre las mismas. Por tanto, posee material rodante de características similares al tranvía, se comporta como tal en superficie y es una clara diferenciación entre el ferrocarril metropolitano y el metro ligero. Además, consta con una capacidad intermedia de

viajeros mayor que el tranvía y menor que el ferrocarril convencional. Un ejemplo claro de este vehículo es el Metro de Málaga.

- El tranvía. Suelen diseñarse con un piso muy bajo para así facilitar el acceso de todo tipo de usuarios. Discurre sobre calzadas de las grandes ciudades reservadas para ellos, cuyo motivo no sufrir los contratiempos del tráfico, al ser vehículos muy ligeros, casi siempre son eléctricos.
- Tren-tranvía, tren-tram o tranvitrén. Es un sistema ferroviario híbrido entre el tren convencional de cercanías y el tranvía, ya que puede circular tanto por las vías ferroviarias convencionales como por las vías urbanas de un tranvía, es un medio usado para conectar diferentes municipios.

2.3 Elementos físicos que componen el sistema ferroviario.

La red ferroviaria es el conjunto del camino de rodadura que resulta esencial para garantizar un adecuado sistema de transporte ferroviario en todo el territorio donde discurra. Este camino de rodadura lo conforman: la infraestructura y la superestructura. [3] [16] [6]

La infraestructura engloba todo lo referente a la construcción de la red ferroviaria que implique la ingeniería civil, se habla por tanto de túneles, pasos, terraplenes, desmontes, etc.

Y sobre ésta, se sitúa la superestructura, es la parte donde se levanta el camino de rodadura, es decir, por donde transcurre los vehículos ferroviarios, también llamado la vía. La vía férrea está sujeta a una variedad de cargas tanto estáticas como dinámicas, tanto vertical como lateral. por ello, necesita elementos que ayuden a la transmisión de todas estas cargas.

Uno de estos elementos es la disposición de la vía, puede ser vía sobre balasto o vías en placa.

La vía de balasto es un tipo tradicional de vía férrea compuesta por el carril, las sujeciones, las traviesas o durmientes y un lecho de balasto. La capa de balasto entre el suelo y la traviesa del ferrocarril forman el lecho de la vía. En general, la colocación de esta capa de piedra machacada, debajo de los durmientes del ferrocarril, tiene como finalidad reducir la tensión del suelo, además de mejorar la flexibilidad y el rendimiento de drenaje de la vía férrea.

La vía en placa o vía sin balasto es la vía férrea cuya plataforma está compuesta de hormigón, además de rieles, sujetadores o sujeciones y losas rígidas de hormigón prefabricadas. Este tipo de vía no necesitan tanto mantenimiento, poseen más rendimiento y estabilidad, pero al ser totalmente rígida implica que debe colocarse otros elementos que aporten la necesaria elasticidad, como el carril. Asimismo, es una solución alternativa ante los problemas de conservación y mantenimiento que el balasto, el uso está más extendido para zonas urbanas.

Los componentes ferroviarios desempeñan diferentes papeles en la vía férrea, aunque estas partes de vía férrea tienen un foco común y es, estar del lado de la seguridad ferroviaria. Se puede señalar:

- **Carril o riel**

Es una barra de acero que colocado uno tras otro, en dos líneas paralelas, sobre las traviesas o durmientes u otro tipo soporte, formando así el camino de rodadura. Es una parte principal de la vía porque proporciona una superficie de guiado para el tren, conducción de corriente y electrificación y señalización, y más importante aún, soporta directamente las cargas. Dependiendo de su uso, para qué tipo de tren, por dónde discorra..., es decir, para los diferentes mercados disponibles, existen varios perfiles: [3] [16] [6]

- **Brunel** es el carril que se usó originariamente, tiene forma de U invertida, como se observa en la siguiente Figura 6, pero hoy en día es menos usado, aun así, se puede encontrar en zonas que requiere un drenaje fácil y/o se necesita acceder por debajo de los vehículos ferroviarios para su mantenimiento.



Figura 6. Carril Brunel [17]

- **Vignole**, es una variante del anterior, es el carril tradicional que se puede observar en cualquier tipo de vía, su forma de asemeja a un hongo, Figura 7.



Figura 7. Carril Vignole [17]

- **Phoneix o carril embebido**, también llamado carril de garganta, Figura 8, usados para tranvías o vehículos ligeros que transcurren por núcleos urbanos, una de las ventajas de estos perfiles es que su circulación no es tan ruidosa y/o su facilidad circulación en zonas de paso compartidas por diferentes vehículos.



Figura 8. Carril de garganta o Phoenix [17]

Tanto el carril Vignole y Phoenix constan de cabeza, es la que soporta directamente los esfuerzos, patín, que actúa de base de apoyo dando estabilidad y alma, es la parte que une patín y cabeza dando así inercia a flexión, como se observa en el esquema de la Figura 9.



Figura 9. Partes del carril [17]

Están clasificados con unas medidas, unos materiales y con un peso en unos estándares estipulados en norma, como por ejemplo UIC, Union Internationale des Chemins de Fer (Unión Internacional de Ferrocarriles) o UNE, Asociación Española de Normalización (Una Norma Española).

- **Ancho de vía**

Las caras activas de un carril corresponden a la superficie interna de la cabeza del perfil que contacta con la pestaña de la rueda, cuya distancia existente entre ellas se llama ancho de vía. La medida del ancho en la vía internacional, según UIC, es de 1435 mm, mientras que en la vía española de RENFE es de 1668 mm, llamado también ancho ibérico. Este ancho es único en nuestro territorio ya que se amolda así con los aspectos técnicos de la orografía española. [3] [16] [6]



Figura 10. Ancho de vía [17]

- **El balasto**

El balasto es una capa de grava o piedra machacada de unas características granulares y una composición determinada elegidas con propósito para adecuarlas a cada tipo de terreno. Es una de las mejores opciones para el reparto de cargas, se asienta y sujeta sobre ella las traviesas con el fin de conseguir una distribución de peso. [3] [16] [6]

- **El durmiente o traviesa**

El durmiente o la traviesa es una viga o pieza colocada transversalmente a la vía férrea, que sirve de apoyo y conexión entre los rieles o carriles y aparatos de vía. Puede encontrarse de diferentes materiales bien el tipo tradicional de madera o la traviesa de hormigón pretensado, donde su uso es para ferrocarril de alta velocidad puesto que éstas soportan más cargas. [3] [16] [6]

- **Sujeciones**

El sistema de sujeción del carril es el conjunto de elementos capaces de asegurar tanto el carril a la traviesa o el bloque, o a la unión longitudinal entre las barras de carriles. Su misión principal es evitar el movimiento de los raíles tanto lateralmente como horizontalmente, asimismo este sistema también puede absorber y transferir la presión del tren. Como prioridad principal es la seguridad en la vía, se habla de seguridad en la circulación a cualquier fallo puede ocasionar el vuelco del carril, también llamado descarrilamiento. El sistema de fijación está constituido por muchos tipos de sujetadores, todos ellos diseñados con los estándares nacionales que dictan la norma. [3] [16] [6]

2.4 Material rodante

En el sistema ferroviario, el material móvil que gana una mayor relevancia en el estudio del comportamiento dinámico es el bogie. [3] [16] [6]

- **Bogie**

Es un carretón o carro al que se le fijan dos ejes con ruedas, formando así un conjunto de rodadura mecánica que soporta la caja o vagón transmitiendo su peso a la vía férrea, y éste puede tener en un extremo otro vagón o caja de arrastre.

Se atiende a varios tipos:

- Bogie motor es aquel que incorpora en su estructura los motores y los mecanismos de tracción necesarios para su funcionamiento.
- Bogie remolque son unidades ferroviarias que son arrastrados por el bogie motor, al ser vehículos remolcados por el principal se eliminan ciertos elementos conduciendo así su diseño a la mayor simplicidad.

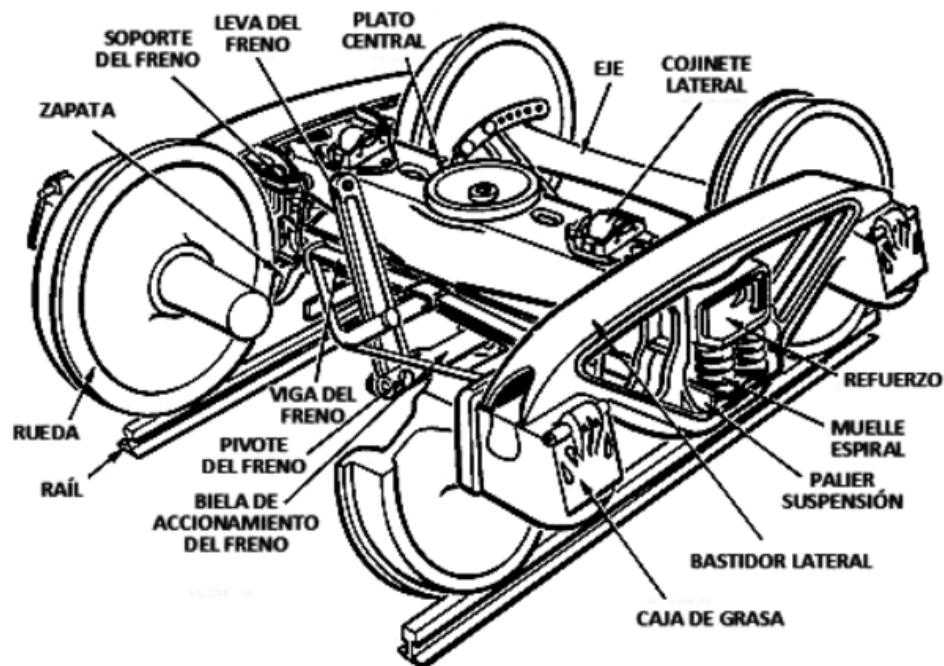


Figura 11. Partes del bogie [17]

- **Bastidor**

Es la estructura básica del cuerpo donde descansa la caja al que se le fijan el resto de los elementos conformando así el bogie. Su diseño está suscitado a las sollicitaciones que sufren, a los posibles deterioros y roturas por fatiga, por lo tanto, implican que sean extremadamente robustos y fiables.

- **Suspensión**

El sistema de suspensión permite su movimiento elástico controlado sobre sus ejes y absorbe la energía producida por las irregularidades de la vía para dar estabilidad al vehículo, por

consiguiente, proporciona un mayor confort y seguridad a los pasajeros y/o a la carga transportada. La suspensión entre el conjunto de ejes-ruedas y el bastidor siempre se intercala un sistema de suspensión, se trata del primer componente elástico denominado así suspensión primaria. Por último, posee una suspensión secundaria situada entre la caja y el bogie.

- **Ejes y ruedas**

La rueda es una pieza de acero fundido o forjado y torneado de forma circular, cuya característica principal es la conicidad de sus llantas. El eje está unido mediante calado a las ruedas en sus extremos posibilitando así el giro de las mismas, además están montadas dos por eje sobre el bogie formando un sistema rígido.

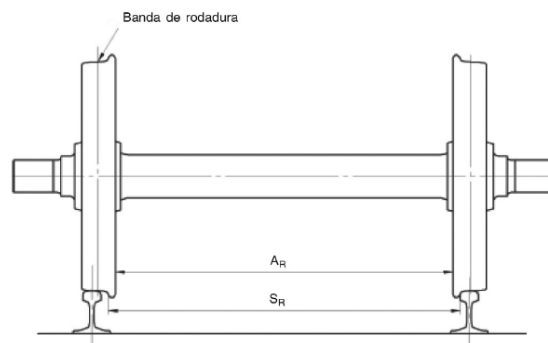


Figura 12. Eje y ruedas [17]

Se ha de diferenciar la parte correspondiente a la pestaña y la banda de rodadura, es la zona de contacto rueda carril. Al ser una rueda troncocónica, no se apoya totalmente en esa banda, sino que lo realiza en una zona determinada, a 70mm del extremo, como se observa en la Figura 13, llamada huella.

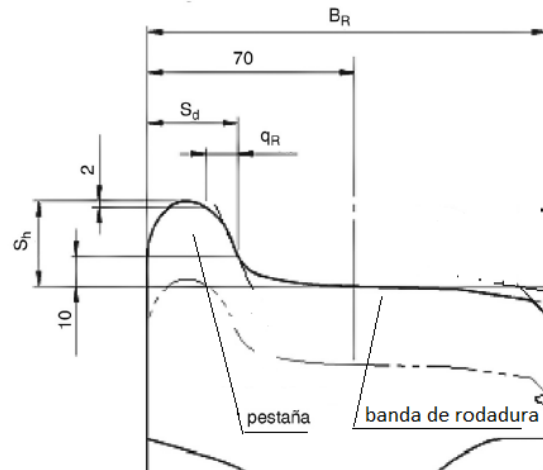


Figura 13. Parámetros de la rueda

Los valores establecidos, en nuestro caso, de las ruedas, poseen unos rangos de fabricación establecidos por el *Reglamento (UE) N° 321/2013 de la comisión de 13 de marzo de 2013 sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema «material rodante- vagones de mercancías» del sistema ferroviario de la Unión Europea*, aunque se consideran valores de diseño, también se incluyen los de límites de servicio siendo anchura de llanta (B_R), espesor de pestaña (S_d), altura de pestaña (S_h) e inclinación de pestaña (q_R).

Cabe pensar que uno de los motivos del descarrilamiento sea por el simple hecho del paso por curva, pero físicamente es el mecanismo más estable. Cuando el tren toma una curva, es una situación crítica, ya que la distancia que recorre la rueda exterior es mayor que la distancia que tiene que recorrer la rueda interior. Esto es un problema porque ambas giran a la misma velocidad angular, pero con distancias distintas. *¿Cómo se corrige?* La clave está en el diseño, las ruedas son troncocónicas unidas por un eje formando un todo, es decir, cuando se toma la curva la fuerza centrífuga provoca que el sólido rígido se deslice ligeramente hacia fuera, entonces la rueda exterior se apoya en el diámetro más grande mientras que la interior gira con un diámetro más pequeño. El sistema corrige automáticamente esta desviación, deslizándose por el carril en sentido contrario al movimiento, siendo como objetivo principal desviarse hacia el lado de la rueda de menor diámetro. Esta compensación de movimiento evita que los ferrocarriles usen diferenciales.

3. Requisitos y condicionantes del diseño

En este apartado se explica el punto de partida sobre la metodología propuesta en el cual se adecúa a una serie de requisitos del diseño: geométricos, tanto del material rodante como de la vía, del lugar del emplazamiento, y los condicionantes que ocupan a la hora de diseñar nuestro encarrilador.

3.1 Requisitos geométricos

Ancho. La distancia máxima para el uso de este dispositivo será cualquier accidente que deje la rueda a medio metro del carril. Toda medida superior a esta, se considera un siniestro de grave y, por tanto, no será aplicable el calzo diseñado, requerirá de otros métodos para reconducirlo a la vía.

Largo. Se ha observado en los calzos preexistentes, la capacidad de guiar a la rueda y situarla en vía en menos de un giro de vuelta. Se toma como condicionante una longitud determinada. Por ello, para el diseño, se ha dividido en etapas por cada determinado grado de giro de vuelta.

3.2 Parámetros condicionantes

Peso. En principio, se parte como principal requisito el peso del dispositivo. Este deberá ser capaz de poder transportarse en un derivado de turismo o furgoneta sin que se exceda de la carga transportada. Asimismo, los operarios, sin ayuda de otros dispositivos, lo puedan colocar en vía, cuya característica será primordial para facilitar y ayudar las labores del operario.

Ancho de vía. Este tipo de trenes ligeros transcurren por un ancho de vía 1435 mm, se tendrá en cuenta para el diseño, sobre todo para conocer la situación de las ruedas del mismo eje.

Tipo de carril. El carril de garganta usado para el diseño tiene las dimensiones del carril más desfavorable geométricamente. Según la norma UNE-EN 14811 *Aplicaciones ferroviarias. Vía. Carriles para fines especiales. Construcción asociada y acanalada*, [23], se escoge el 56R1,

del bogie al dispositivo a su paso por el mismo. En el apartado de anexo 1 de planos se incluye croquis con las medidas más relevantes ofrecidas por Metro Málaga.

3.3 Plataforma ferroviaria

El entorno de trabajo es parte clave en el diseño y el análisis del dispositivo. Añadiendo a lo anteriormente dicho en teoría, se describe la superestructura de vía en placa como un caso especial de vía debido especialmente por el doble uso de la calzada. Está obligado a embeber y a enrasar la parte superior de los carriles con la superficie de rodadura de la calle. [7]

Este tipo de sistema de vía está formado bien por una losa de hormigón prefabricado o por un pavimento fabricado in situ. Ambos están situados sobre la infraestructura, punto 1 de la Figura 15.

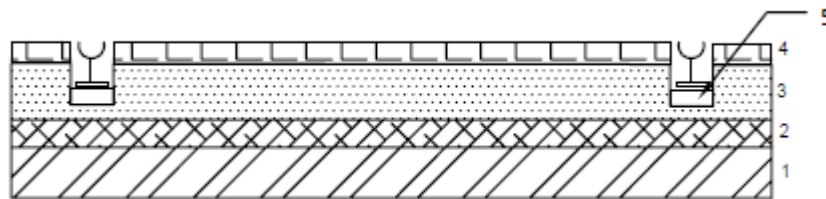


Figura 15. Vía en placa

La losa de hormigón, 2 y 3, es un elemento soporte del carril muy rígido y, además, se trata de un soporte continuo. Por tanto, se dispone de un elemento intermedio de naturaleza elástica, reduciendo así la transmisión de las vibraciones, asegurando una correcta distribución de las cargas y una reducción de las tensiones. [20] [7]

Al disponer de elementos longitudinales elásticos en los apoyos consigue la elasticidad adecuada y compensa la rigidez del hormigón. Se ha de comentar también que la rigidez de la suela bajo el carril vendrá determinada por el material usado en el encapsulado

Además, disponen de acanaladuras en las que se posiciona el carril, como se observa punto 3 de la comentada Figura, quedando sujeto así al elemento prefabricado o pavimento. A través de un material elastómero, punto 5, envuelve al carril quedando completamente embebido, dejando la zona de rodadura libre. Independientemente de su instalación, el carril quedará solidario a la losa de hormigón que lo contiene.

La generación de carriles embebidos más avanzada implica una puesta en obra con elastómero vertido, donde está adaptado totalmente al carril encapsulando y constituyendo un todo con el resto de la superestructura. En caso de necesitar una sustitución del rail se precisa del cajado y extracción completa del carril con el bloque. [7]

Como acabado en superficie, está compuesto de adoquines distribuidos por toda la superficie de la plataforma, punto 4. Todo el conjunto, que conforma la vía en placa, se trata de una losa prefabricada.

Se ha de comentar también las características del hormigón. Es un pavimento rígido que se encarga de proporcionar un apoyo estable, aporta su capacidad de distribución de las tensiones, es decir, cuando una carga actúa sobre la losa se produce una flexión en la cara inferior del hormigón.

La transmisión de cargas se realiza de manera que el carril recibe directamente esa sollicitación proveniente de las ruedas, cuya área de contacto carril rueda es tan pequeña que dicha sollicitación es elevadísima. La transmisión va de elemento a elemento hasta llegar al terreno, primero el carril, luego las traviesas o en este caso, la acanaladura y, por último, al resto de elementos que componen la superestructura. Por tanto, la traviesa o la acanaladura puede asemejarse a una viga simple donde se calculan las leyes de sus momentos flectores. [6]

4. Metodología

En este apartado se desarrolla la metodología del diseño desde un marco teórico y normativo de la ferroviaria, haciendo hincapié en las diferentes situaciones del bogie una vez descarrilado y su impacto en el diseño.

4.1 Supuestos y su problemática

El punto de partida para nuestro diseño es la situación inicial del bogie después del descarrilamiento. Para ello, se define dos “supuestos” de las posiciones rueda-carril los cuales describirán el movimiento del bogie.

El primero de ellos, es el “*descarrilamiento ideal*”, llamado así ya que tiene como requisito que las ruedas de un mismo eje quedan paralelas al carril. A partir de esta posición y con un simple trayecto tangente al carril, la rueda conseguirá entrar en la boca de la acanaladura.

Mientras que el segundo movimiento, se ha denominado “*descarrilamiento desviado o con desvío*”, ocurrirá cuando la rueda está situada a un determinado ángulo con respecto al carril, tal y como se muestra en la Figura 16. La dificultad que entraña es el diseño de la curva, ya que no puede ser tangente al carril, ¿*por qué?* porque la rueda terminaría cruzándose a la acanaladura, es decir, no encajaría en la boca. Las ruedas deben tener una *cierta posición* previa con respecto al carril.

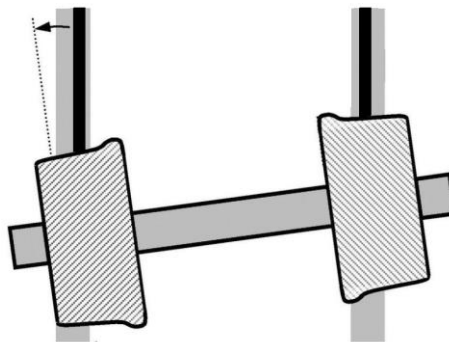


Figura 16. Posición rueda carril con determinado ángulo

A consecuencia de esto, se añade como requisito un ángulo de posicionamiento de la rueda frente al carril, será otro determinante para el uso de este dispositivo. Este valor está en torno a 30° , se va a suponer un descarrilamiento no mayor a 500 mm con respecto a los carriles.

Entonces, después de lo comentado, ¿qué movimiento necesita la rueda para que se sitúe adecuadamente y así encajar en el carril? o, mejor dicho, ¿qué “*movimiento*” requiere esta última situación para que derive a la de *descarrilamiento ideal*? Y, por ende, ¿Qué tipo de curva se ha de diseñar para que abarque ambos supuestos?

En sí, uno de los principales problemas ha sido el diseño de la curva. Se podría haber realizado una curva sencilla tangente al carril, pero no abarcaría los dos estados anteriormente comentados. Así que, después de numerosos errores, como conclusión, se ha considerado la adaptación de un desvío ferroviario en el diseño global del conjunto del encarrilador.

Este tipo de desplazamientos de gran envergadura no se pueden realizar dependiendo de una sola rueda, debido a que se pretende mover un bogie con un peso muy elevado, por tanto, se necesita de un “*conjunto de acciones*” que implique todo el vehículo para llegar a este fin.

4.2 Marco teórico

Es ineludible definir los parámetros ferroviarios claves en este proyecto, a continuación, se aborda uno a uno y sus propiedades principales.

4.2.1 *Trazado geométrico*

En el diseño del trazado de las vías, la conexión entre un tramo recto con otro curvo requiere de un parámetro geométrico, llamado clotoide o curva de transición, Figura 17. [2]

La clotoide se enrolla sobre sus puntos asintóticos igual que Klotho o Cloto hilaba las hebras de la vida en su rueca. Cloto era la más joven de las tres Moiras y determinaban el destino de los dioses y humanos en la mitología griega.

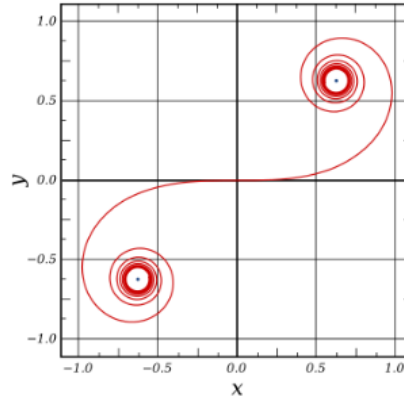


Figura 17. Clotoide [17]

Fue Arthur N. Talbot, Profesor e Ingeniero de la Universidad de Illinois, en su publicación *The Railway Transition Spiral*, en 1890, donde relata la equivalencia de la espiral de transición del ferrocarril y la clotoide, Figura 18. Usó una de las propiedades matemáticas para diseñar las vías del ferrocarril. [15]

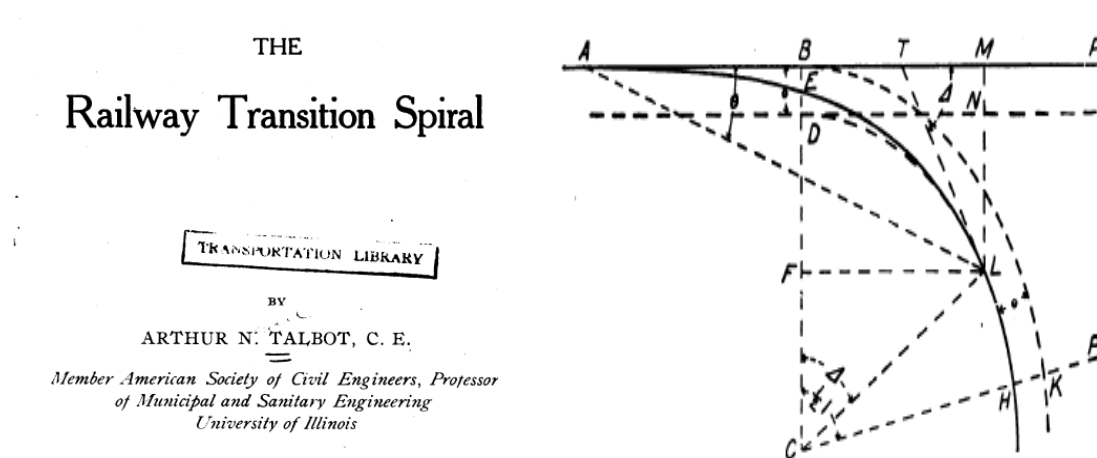


Figura 18. *The Railway Transition Spiral* [14]

La curvatura de la clotoide en cualquier punto es inversamente proporcional a la distancia a lo largo de esa curva siendo medida ésta desde el nacimiento de su arco. Esta propiedad permite conectar los segmentos de líneas y curvas con una espiral de transición, donde su curvatura varía continuamente.

En el diseño del trazado de las vías férreas es útil como curva de transición entre un tramo recto con un tramo curvo, Figura 19, porque este diseño evita los cambios bruscos de aceleración centrípeta a consecuencia de la variación de su curvatura. [2]

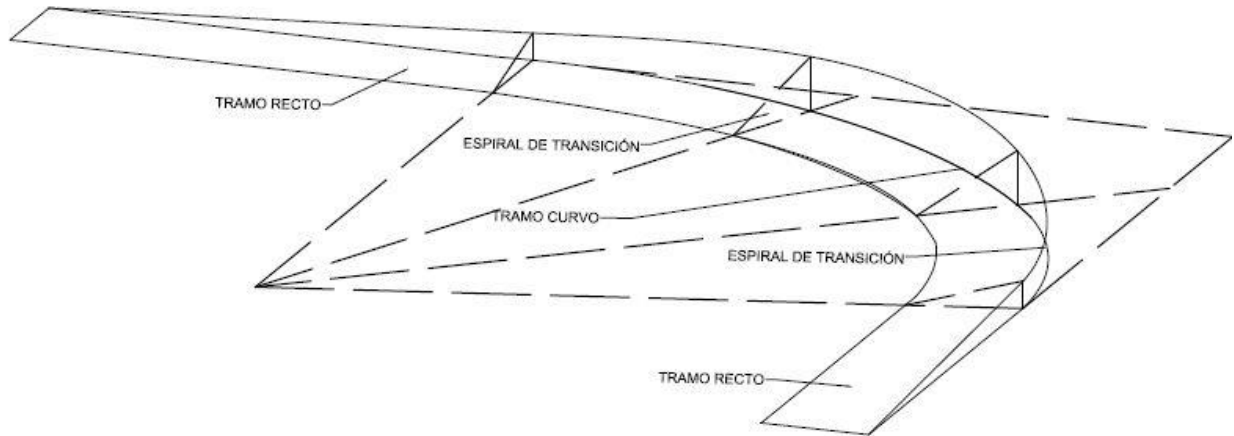


Figura 19. Tramo con espiral de transición

De modo que un vehículo sigue una trayectoria a una velocidad constante, tendrá una aceleración angular constante. Por lo tanto, la clotoide se conoce como curva de giro constante, ya que tiene como objetivo aminorar el efecto de las fuerzas centrífugas al entrar en curva, y que, al llegar a ella, no aparezcan de repente, sino progresivamente, para evitar grandes fuerzas laterales.

Regulan el cambio de sollicitación transversal a la que se somete el vehículo, la variación del ángulo de deflexión de las ruedas delanteras posibilita un desarrollo gradual del peralte, aumentando la inclinación transversal a medida que disminuye el radio, hasta llegar al punto necesario para que comience la curva circular.

En un sentido matemático, las clotoides son curvas tangentes en el origen de abscisas con un radio de curvatura que disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia recorrida sobre ella (1). Implicando que el origen de la curva, el radio tienda a infinito.

$$\rho \cdot s = C^2 \quad (1)$$

Siendo ρ el radio de curvatura, s el desarrollo o arco, C^2 la constante de la espiral.

En el sentido físico, la fuerza centrífuga es:

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

siendo masa, velocidad y radio de curvatura, a mayor masa y velocidad, mayor es la fuerza centrífuga. Por tanto, al trabajar con un radio infinito, su fuerza centrífuga es nula, y es lógico, ya que, al mover el bogie a una velocidad cuasiestática, dichas fuerzas son inexistentes.

4.2.2 Aspectos técnicos para el cálculo de un desvío

Una vez conocido el trazado a seguir, hay que adecuar las vías sobre la superestructura para la circulación del tren. En el caso de la conexión entre los tramos ya comentados, es necesario el uso de aparatos de vía: el desvío ferroviario. Las partes del desvío implicados en el cruce de las vías son el cambio y el cruzamiento, cuya unión entre ambas es a través de los carriles de unión. [4]

Está compuesto por una serie de elementos que aseguran la continuidad del itinerario en una intersección y, además, es el lugar donde se bifurca la rama principal de la otra desviada, de forma que los ejes de las ambas vías se acuerdan tangencialmente o forman un pequeño ángulo entre ellos, llamado ángulo de cruzamiento, α .

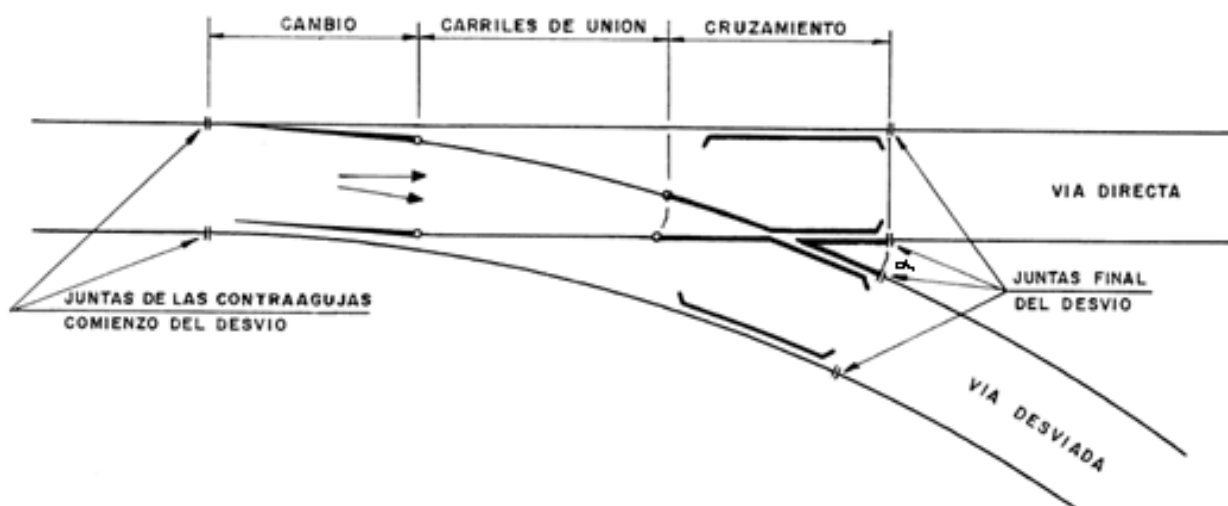


Figura 20. Partes de un desvío ferroviario NAV 3-6-0.0 [21]

El cambio permite el desdoblamiento de los carriles dos a dos de una vía mediante el desplazamiento de unas piezas móviles. Éstas conectan dicho cambio con el cruzamiento, siendo éste el que materializa el corte del carril derecho de la vía directa con el carril izquierdo de la vía desviada o viceversa. Algunas de las piezas que podemos destacar, por ejemplo, las agujas, son piezas móviles interiores excepto en su extremo más próximo al cruzamiento, llamado talón. Las agujas aseguran la continuidad del movimiento facilitando el cambio de la vía directa a la desviada sin bajar la velocidad. Las agujas pueden accionarse mediante diversos procedimientos ya sean manuales, mecánicos, hidráulicos o eléctricos. Otra de ellas, las contraguías situadas al inicio del desvío, son piezas fijas y se comportan como carriles adyacentes a las agujas. [3]

En el presente proyecto, se ha hecho hincapié en el cruzamiento, por tanto, nos ceñiremos en el desarrollo de los conceptos de los elementos que lo componen. El cruzamiento es el elemento del desvío donde se produce la superposición de una vía recta con otra desviada. Consta de contracarril, patas de liebre y corazón, Figura 21.

El elemento principal es el corazón donde se materializa la intersección entre ambas vías.

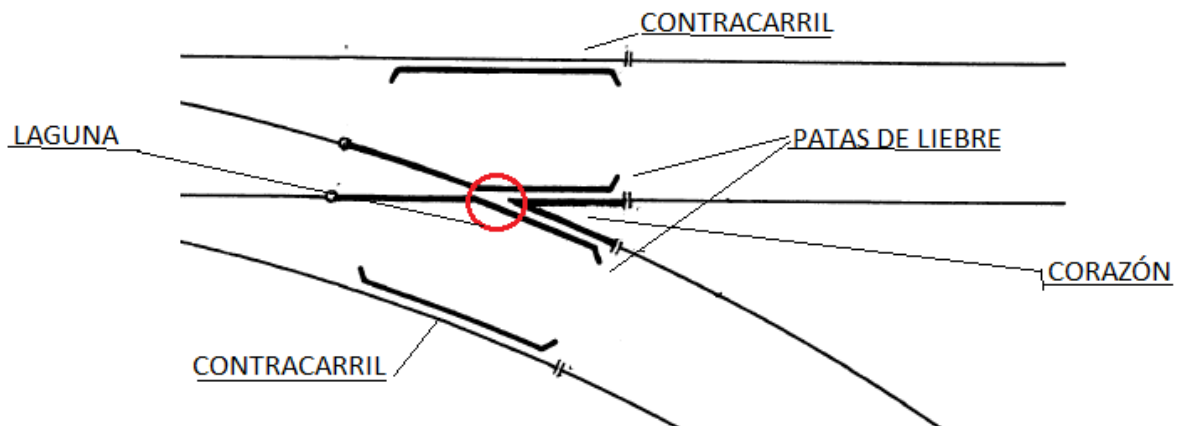


Figura 21. Elementos que componen el cruzamiento

La laguna es una discontinuidad para facilitar el paso de la rueda independiente de la dirección de la vía que recorra, se caracteriza porque el centro de la llanta no tiene punto de apoyo. Para garantizar el apoyo a su paso por la laguna, la parte exterior de la llanta se apoya sobre la pata de liebre, véase Figura 22 siguiente.

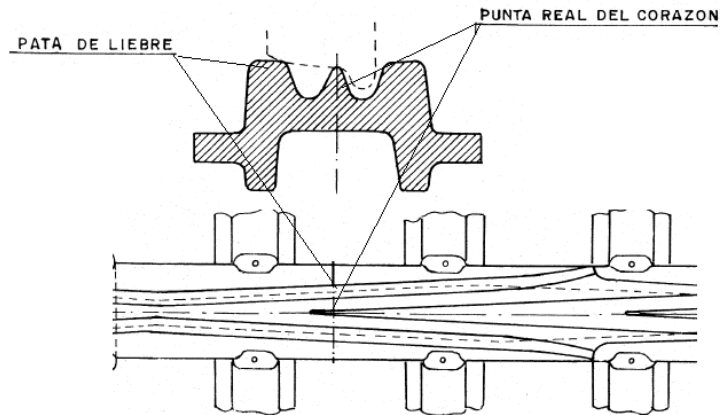


Figura 22. Paso de la rueda por la laguna y sus puntos de apoyo

Así mismo, la rueda opuesta, que comparte el mismo eje, es guiada entre el carril y el contracarril, cuyo objetivo es retener las ruedas evitando su descarrilamiento. Además de prevenir el deterioro de la parte más delicada del cruzamiento, la punta de corazón, ya que parte de la carga del vehículo es asumida por esta rueda.

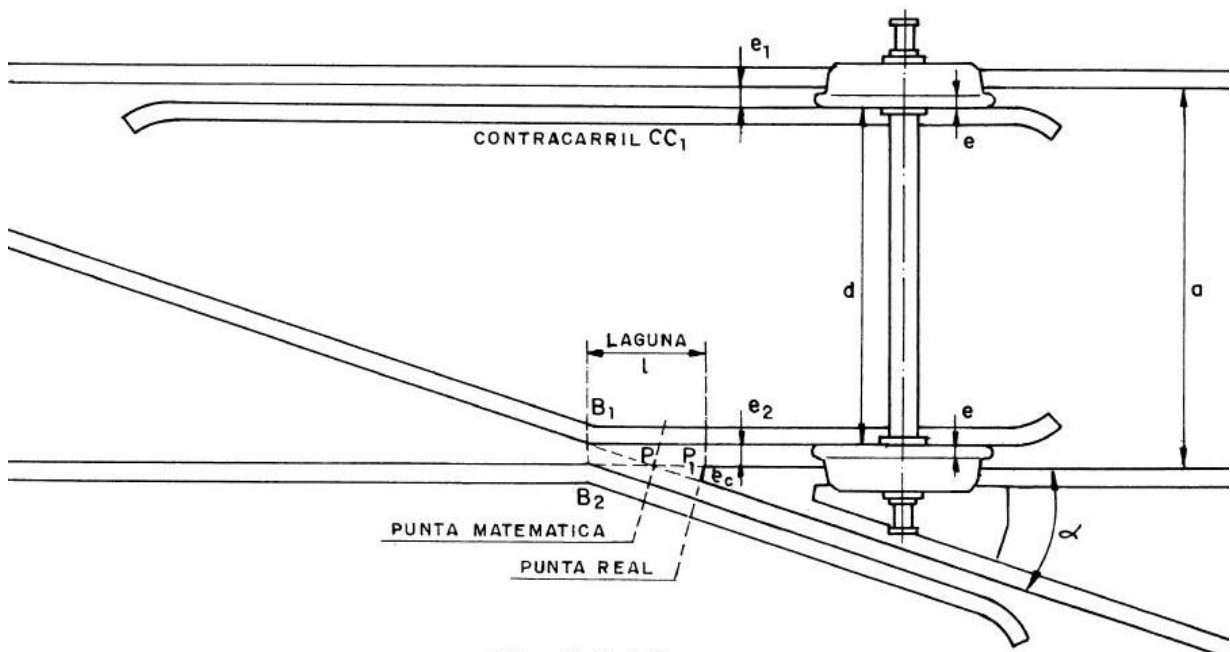


Figura 23. Cruzamiento Figura 2.2.1.1a NAV3-6-0.0 [21]

La punta de corazón es el punto de intersección de los dos carriles, es decir, la real, ya que existe otra, que es la punta matemática, punto P de la Figura 23, donde marca la intersección teórica entre ambos recorridos, directa y desviada. Es de suma importancia, porque es una señal imaginaria del paso de la rueda por el corazón logrando así fijar el recorrido en la unión de los dos carriles.

El ángulo de cruzamiento, como se puede ver en la Figura 24, α , está definido por la tangente de dicho ángulo, que depende de las velocidades a las que circule el tren.

Según el libro *Estudio de la evolución de los desvíos ferroviarios* [4] comenta como calcular de manera aproximada el ángulo de cruzamiento, conociendo el radio y su velocidad, se obtendría una serie de magnitudes que definen un desvío, la longitud del tramo desviado y el ángulo de cruzamiento.

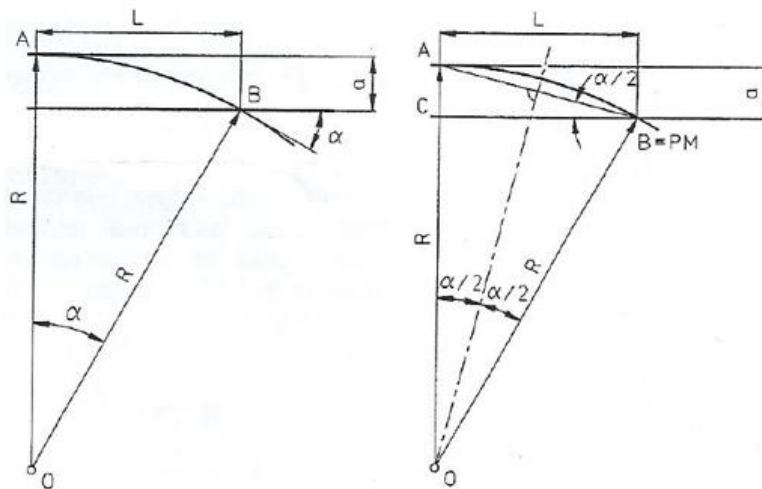


Figura 24. Fuente (Fernández 2013) [4]

Realmente el trazado anterior se considera ideal, ya que el tramo desde la curva de transición hasta el corazón no es curvo, sino que antes de llegar al trazado suele ser recto, en la Figura 25 se observa el tramo k y B, a esta zona, k, se denomina entrada al cruzamiento.

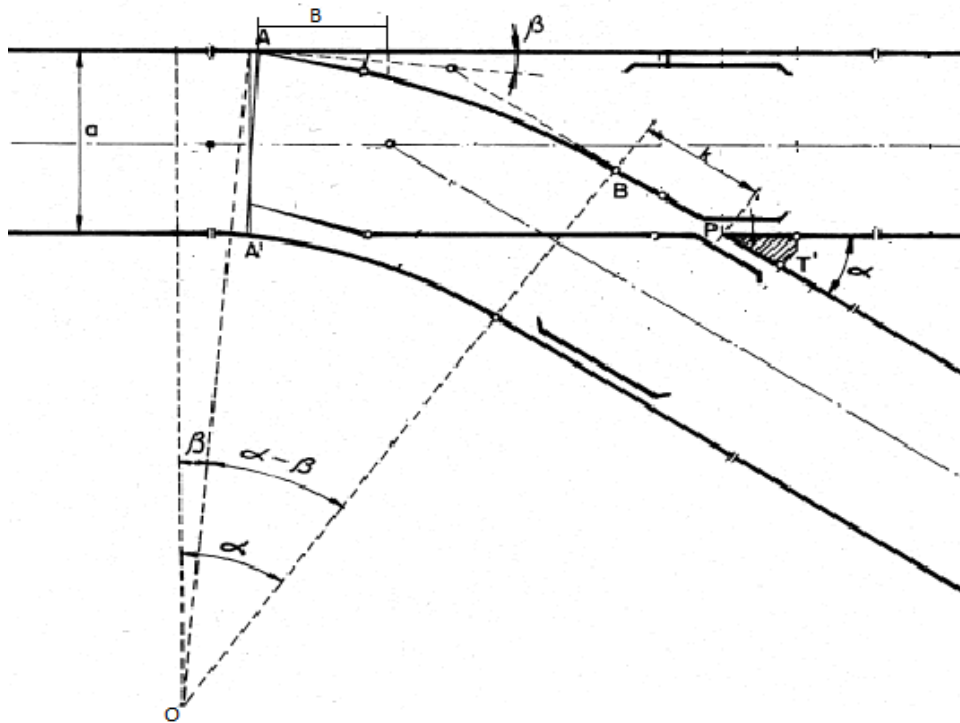


Figura 25. Ángulo de cruzamiento [21]

De entre todos los tipos de desvío existentes recogidos en NAV 3-6-0.0, el que se adecúa más a nuestro diseño, es un desvío sencillo con corazón recto, es aquel cuyos los bordes activos del corazón son rectilíneos, o también agudo, es aquel cuyo valor de la tangente del ángulo corazón es menor a la unidad. [6]

Lo más importante a destacar es que el ángulo del corazón, α , coincide con el del desvío, o sea, con el ángulo de cruzamiento, éste a su vez está representado por el valor de su tangente, Figura 26. [4]

En conclusión, después de la teoría estudiada, parece que guarda cierta semejanza con la situación real de nuestro supuesto “descarrilamiento con desvío”.

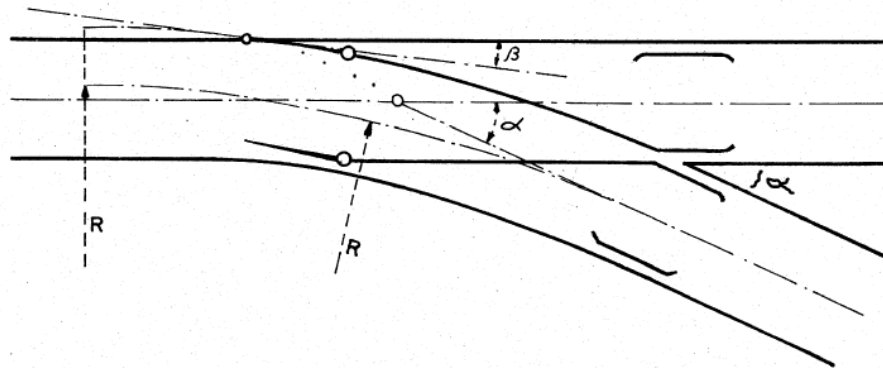


Fig. 2.1.1.a

Figura 26 UNE EN 3-6-0.0 Semejanzas ángulo corazón y ángulo de cruzamiento [21]

4.3 Aplicación del marco normativo

A continuación, se realiza un resumen de los parámetros geométricos de los desvíos ferroviarios recogidos en la NAV 3-6-0.0 y NAV 3-6-0.1 [21][22], más relevantes en la aplicación de nuestro diseño.

La longitud de la laguna, l , tiene como valor aproximado

$$l = \frac{e_2 + e_c}{\text{sen}(\alpha)} \quad [3]$$

Siendo e_2 es el espesor de la punta de corazón, e_c es el valor de la entrecalle, α el ángulo de cruzamiento.

La formula anterior indica que la longitud de la laguna será mayor cuanto menor sea el ángulo de cruzamiento, más anchas las entrecalles y el espesor de la punta de corazón. En nuestro caso, se descarta el valor del espesor de la punta corazón, al no ser relevante.

El ángulo de cruzamiento, también conocido como ángulo de corazón, variará su valor según el radio de la vía, que determina la velocidad sobre ella, y se tipifican los corazones según la velocidad de circulación. El valor del ángulo de cruzamiento es según el valor de su tangente,



está en torno a 0.07 - 0.13. Además su valor disminuirá al aumentar del radio de la vía desviada. Por tanto, se escoge un valor de su tangente mínimo acorde a nuestro diseño, siempre del rango establecido.

La entrecalle está sujeta al condicionamiento del paso de la rueda, requiere además de cierta holgura para evitar el deterioro de esta, según normativa oscila entre 40 a 45 mm.

El contracarril suele tener una elevación sobre el plano de rodadura de la vía que no excede los 40 mm, produciéndose un mayor contacto con la superficie de su cara activa, se denomina por tanto altitud del contracarril. La elevación del contracarril sobre el plano de rodadura no será mayor a la pestaña para que así la rueda no se salga de su guiado.

Las patas de liebre son una prolongación de los carriles para sustentar la rueda caracterizado por una zona de entrada abierta para evitar choques en las pestañas de las ruedas. El ángulo de entrada de unos 30° para que no sufra la rueda a su entrada al dispositivo, norma establece que la entrada contracarril-patin-pata de liebre sea de ese valor.

5. Evolución del diseño

En este apartado, se comenta como ha sido la evolución del del proceso del diseño, partiendo de un diseño inicial y la aplicación de toda la investigación.

Cuando me ofrecieron el proyecto, el tutor propuso como punto de partida un encarrilador que consistía en una placa de 2x2 metros con un camino de rodadura y en la parte inferior, unos salientes como agarre al pavimento, como se puede observar tanto en el boceto y el modelo en Solidworks, Figura 27.

En seguida, personalmente, descarté la idea. Suponía un desatino como solución posible, entre muchos de sus desaciertos, no cumplía con el objetivo de mantener un bajo peso para su traslado, era obvio la imposibilidad de meter tal lastre en un vehículo.

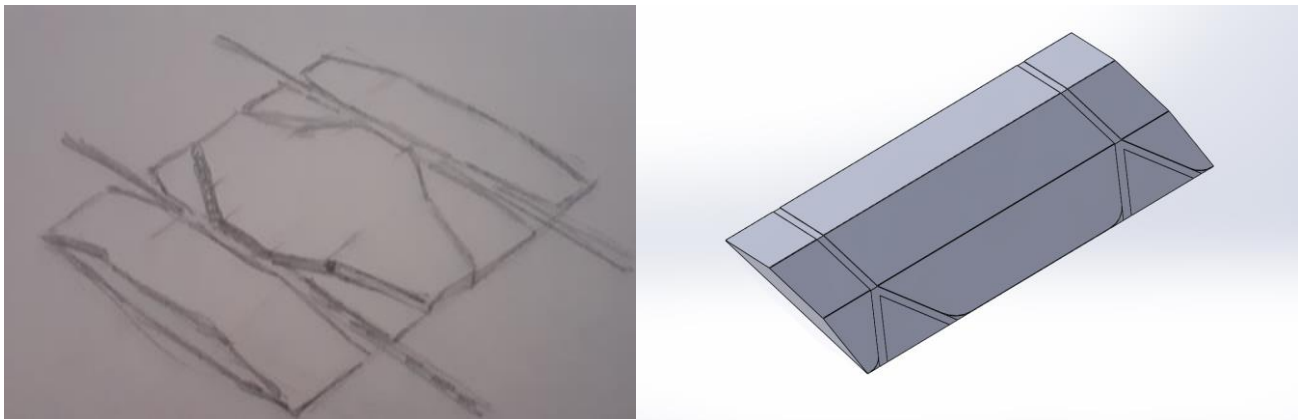


Figura 27. Diseño inicial

En mi línea y no conforme con la viabilidad de este diseño, se investigó sobre los calzos existentes en el mercado y se visualizaron numerosos videos en los cuales se usaban este tipo de dispositivos para el encarrilamiento, desde los más rudimentarios hasta los más ergonómicos.

Se prestó atención a los puntos en común a todos ellos:

1. La distancia que recorrían desde su inicio hasta que la rueda encarrila, no era superior a una vuelta de la rueda, por tanto, era evidente desechar la idea de una placa 2 x 2 m.
2. Otro de los detalles era que los calzos existentes se caracterizan por adecuarse al terreno para realizar su sujeción, es decir, tomar el carril per se, para usarse de manera creativa. Uno de esos ejemplos es el que se visualiza en la Figura 28.



Figura 28. Fotografía encarrilador Metro-North Derailment Recovery [10]

Después de numerosos bocetos, se incluye un saliente situado en la parte inferior que tiene cuyo objetivo es encajar en la boca del carril. La importancia de este punto radica en: evitar que el encarrilador salga despedido, la posibilidad de alinear con el carril y en consecuencia, facilitar el emboque de rueda-carril. A continuación, se puede ver el proceso de evolución que se ha llevado hasta el final, Figura 29.

Una vez adaptado el dispositivo, la siguiente etapa fue conseguir una curva adecuada, cuyo propósito de esta era guiarla hacia el carril.

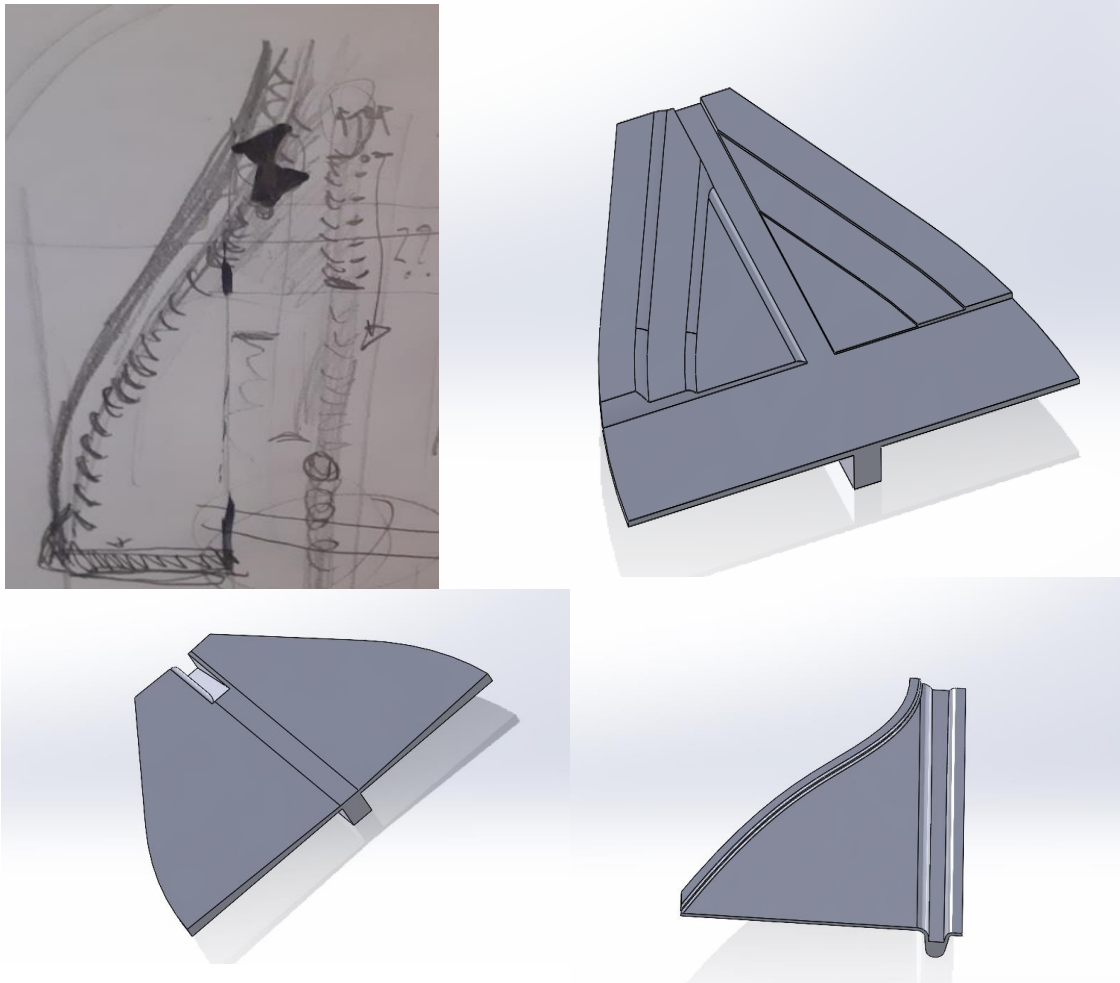


Figura 29. Evolución del diseño

De las muchas curvas propuestas como curvas de Bézier, interpolación con splines cúbica natural (no de Hermite), etc. Todas estas cavilaciones fueron un *cul-de-sac*. Cabía la posibilidad que cumplierse la misma función con una simple recta tangente. Ante esa opción y añadiendo la sugerencia del tutor para que la rueda subiera al saliente señalado en la Figura 30, se comienza a cavilar sobre su efectividad.

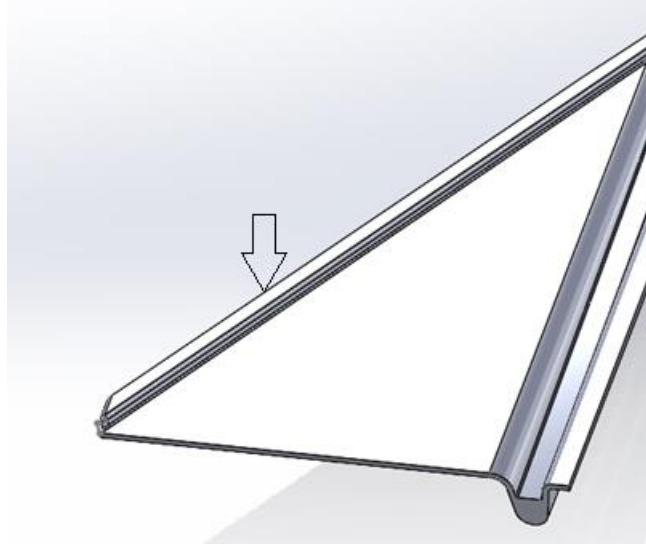


Figura 30. Planteamiento el problema del saliente

Y se plantea la siguiente pregunta ¿qué necesidad hay de subirlo? Si la finalidad es guiar la rueda hasta la boca del rail, de esta forma sería la más inestable que pueda existir. De todo el ancho de la llanta, un poco más de la mitad corresponden a la banda de rodadura. Por lo cual, se estaría limitando la zona de apoyo a una distancia tan pequeña, que supondrá un delicado trabajo para colocar la rueda en ese punto y por ello, requerirá una precisión extrema. Esto incumple así uno de los requisitos que se está buscando y es, la rapidez de actuación y facilidad de maniobrar para el operario.

¿Por qué depender de esa conicidad de la rueda? Al mínimo movimiento imprevisto, por ejemplo, el paso por un adoquín de alguna de las ruedas restantes, ésta saldrá despedida del saliente. La tasa de probabilidad de caída a plomo es elevada, sobre todo, debido a la influencia de la vibración por el paso del terreno y/o que no esté correctamente orientada en el momento de subirse al saliente.

Esta opción sugiere una imposibilidad de control del movimiento, y añadiendo que la rueda habría que encauzarla a un saliente con un determinado ángulo para que se apoye correctamente. Contando que, al contacto de acero con acero, puede que deslice y no ruede, por tanto, el operario, en el peor de los casos, tendrá que aplicar grasa más arena entre *placa* y rueda y así, fomentar la adherencia.



En conclusión, si el objetivo es realizar un posible modelado matemático del paso de la rueda por el saliente, hay que aclarar que las variables de entrada son sumamente aleatorias, es decir, uno de los datos de partida está basado en la posición del tren después de un accidente. Los datos disponibles de los accidentes son tan mínimos que es imposible muestrearlos y tener datos fiables, menos aún si cabe si se intenta obtener un modelo estocástico basado en el paso de la rueda por el carril.

Finalmente, y tras toda la teoría estudiada, se ajusta el modelo a dos placas una de ellas ya descrita con su simétrico, en el cual se mejora su funcionamiento ya que el movimiento de la rueda por la misma dependerá de la posición de la otra placa. La otra placa llamada *corazón* está diseñada conforme a los desvíos ferroviarios, en el anexo 2 se incluye los bocetos de esta placa hasta llegar al diseño final, está basado en el juego del movimiento de las ruedas que comparten el mismo eje.

6. Propuesta del diseño

En este apartado se desarrolla la propuesta y la justificación del diseño final. Es evidente la necesidad de formular una correlación con la teoría ferroviaria si se pretende tener una efectividad en el proceso de encarrilamiento. Las herramientas o conceptos ferroviarios, ya comentados, ayudarán a modelar la propuesta de diseño comentada a continuación.

El prototipo de encarrilador consiste en tres dispositivos, de los cuales se usan dos de ellos. Cuyo dispositivo situado en la imagen izquierda de la Figura 31 tendría su opuesto simétrico.

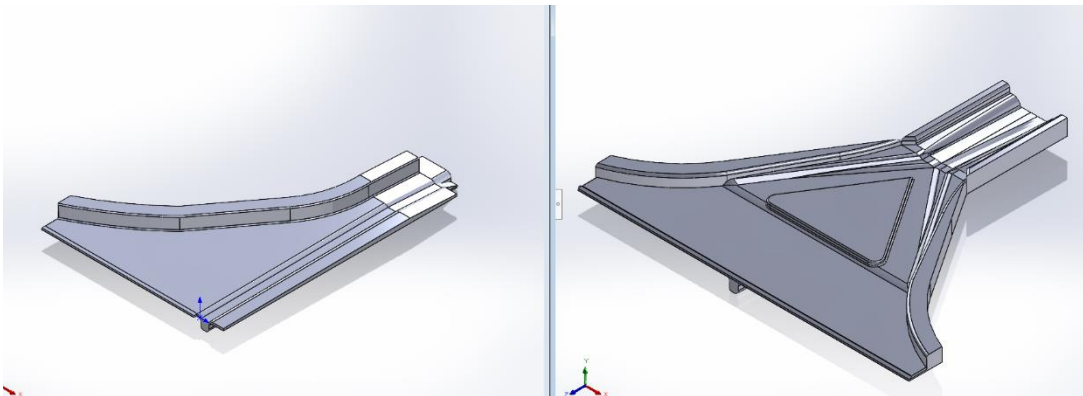


Figura 31. Propuesta del diseño

Inicialmente, se parte en el punto donde el bogie ya se encuentra descarrilado, a una distancia y a un ángulo con respecto al carril determinado, es decir, se encuentra en la suposición realizada en el capítulo 4.1, el *descarrilamiento con desvío*.

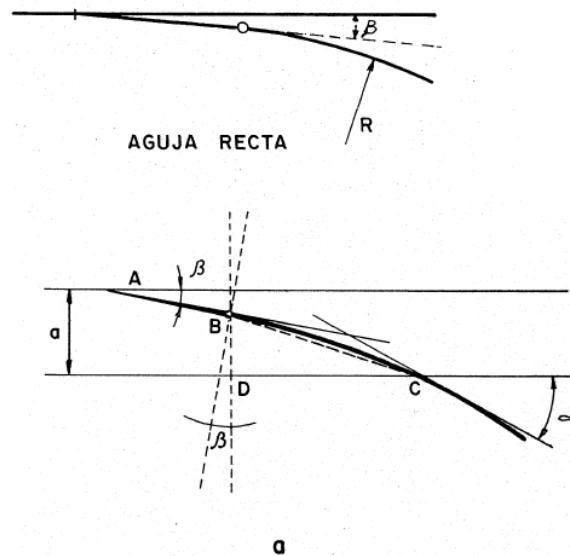


Figura 32. Cálculo del desvío NAV 3-6-0.0 [21]

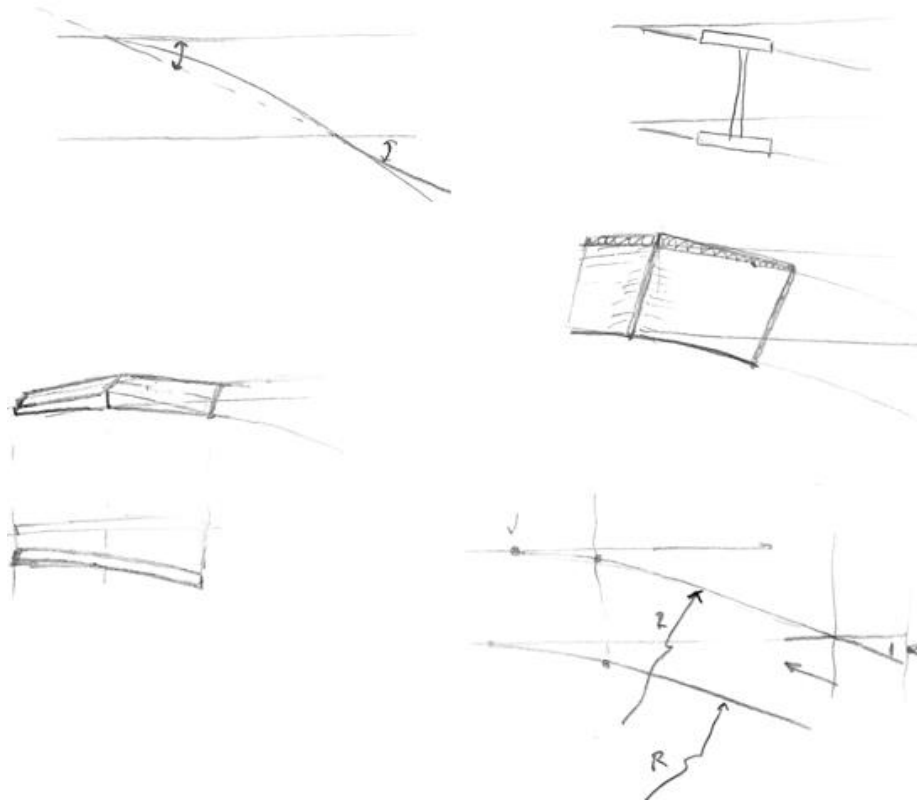


Figura 33. Bocetos

Después de analizar el movimiento de los trenes en curva y la teoría estudiada en el mencionado apartado, la hipótesis se basa primero en considerar al bogie como si estuviese

realizando un tramo curvo, Figura 32 y 33. Por tanto, necesitará una curva de transición o clotoide que conecte la supuesta curva que realiza el bogie con el tramo recto en un punto tangente.

Es más, el bogie se ubica en un punto de una curva de radio desconocido, pero puede suponerse que se trata de un fragmento de un círculo con radio infinito y, por tanto, la circunferencia es tan grande que el tramo donde se sitúa el bogie es prácticamente una recta.

¿Cómo se conecta? Esa clotoide consistirá en una espiral de transición con radio de curvatura infinito y constante a lo largo de ella, es decir, una recta que se unen al tramo donde se encuentra el bogie y al tramo recto del carril mediante dos puntos tangentes.

Se añadirá a esa clotoide un peralte el cual facilitará el movimiento de rectificación de la posición de las ruedas. Tras su paso por la espiral, la rueda situada en el tramo interno de la curva carga con el peso añadido, debido a la descompensación del nivel por el peralte. Además, con el diseño del saliente, compensa el movimiento de manera que actúa como apoyo y guía. La rueda externa, que comparte el mismo eje, aliviada por el peso restado y al pasar por el dispositivo diseñado, es la que efectúa el movimiento del *giro* con el objetivo de situar las ruedas de forma paralela a los carriles.

A continuación, se dedujo la concordancia con una intersección de vías, es decir, el bogie se localiza en el cruzamiento desde el hilo curvo al recto, cuyos elementos importantes en esta sección ya comentados se aplicarán en el diseño. Más adelante se detallarán sección por sección las adaptaciones realizadas.

De ahí la importancia del ángulo con respecto al carril, porque es evidente la semejanza geométrica que existe entre el ángulo cruzamiento y el ángulo rueda carril después del descarrilamiento, además paralelamente está también relacionado con el ángulo corazón. Recordando la Figura 26 del capítulo 4.

A partir de ahí se adapta los elementos del cruzamiento pertenecientes al desvío ferroviario para el diseño de nuestro encarrilador, sobre todo las partes claves de los elementos del cruzamiento: el corazón.

La justificación a las partes más importantes del diseño propuesto, Figura 34, son las siguientes:

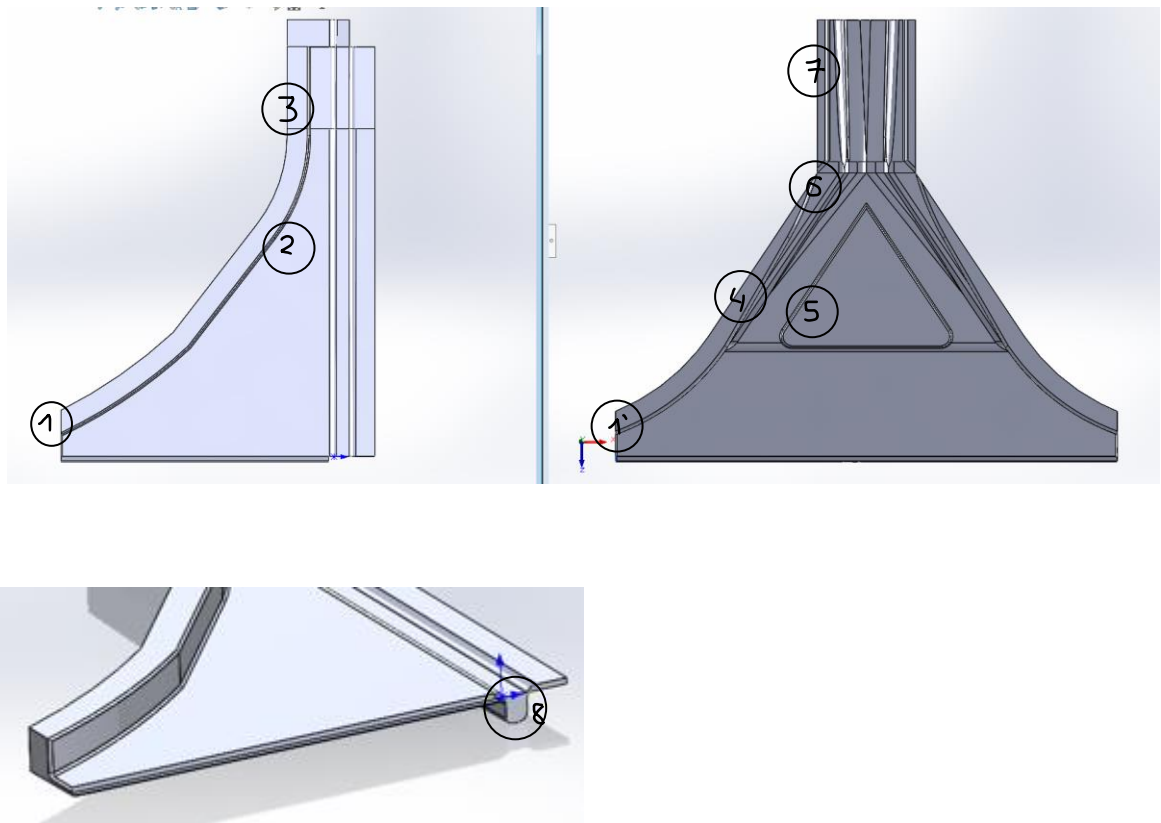


Figura 34. Partes importantes de la justificación del diseño

La entrada al dispositivo, 1-1', características entrada suave, 30°, saliente del dispositivo izquierda actúa de contracarril de altura 40 mm, objetivo guiar a la otra rueda ejerciendo ésta de apoyo, esa altura evita que se suba al saliente. Si fuese necesario con el mismo traqueteo golpeando lateralmente a la rueda ayuda al juego del movimiento para su rectificación.

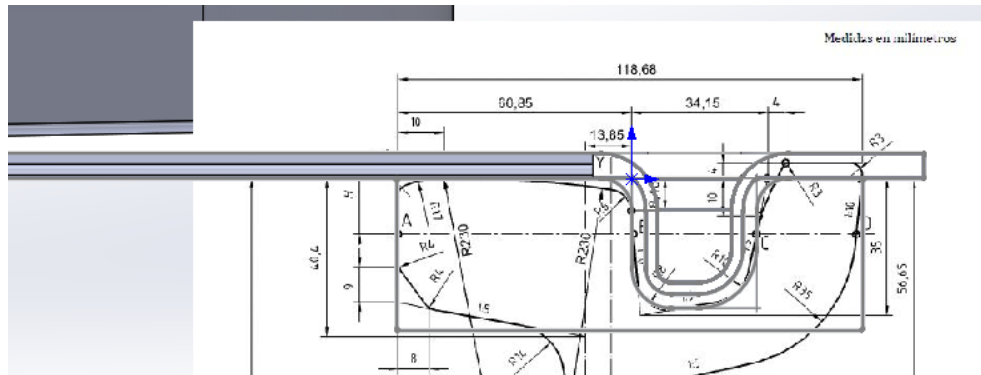


Figura 35. Partes de la justificación del diseño

El saliente inferior del punto 8, que está presente en ambos dispositivos, se ha adaptado con el comentado carril, de la siguiente manera, Figura 35 y 36.

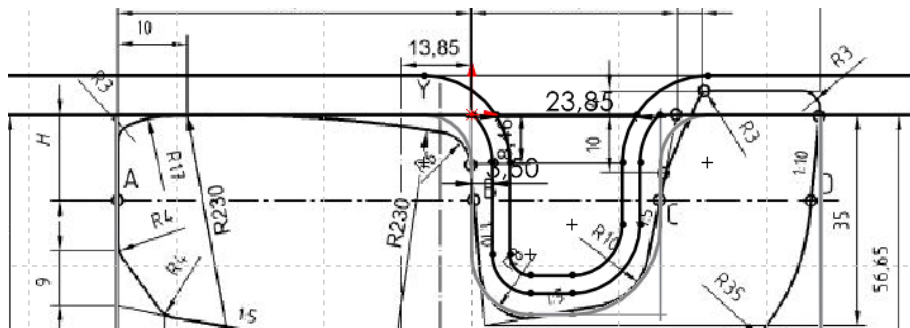


Figura 36. Diseño saliente inferior

Tramo del punto 2, señalado en la Figura 34, comienza la tangencia de la curva cuyo fin es mediante pequeños choques en el lateral de la rueda, ayude a entrar en el punto 6 la rueda del mismo eje. Los puntos 4 al 6, es el inicio del peralte a una altura con respecto al otro dispositivo, además el ancho de la zona 4 corresponde al valor de la entrecalle.

La zona 5, Figura 37, actúa como escalón y consiste en elevar a aquellas ruedas, que, con un ángulo con respecto al carril más alto, necesitan de un apoyo para facilitar la entrada a 6. Como se puede ver en las Figuras siguientes 37 y 38.

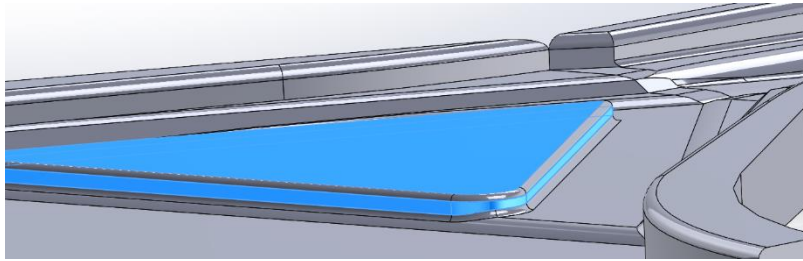


Figura 37. Diseño inicial escalón

Las salidas de ambos dispositivos, 3 y 7, tiene como fin deslizarlas hacia el emboque de la garganta del carril, donde la parte importante del guiado la realiza la zona 3, Figura 39. Mientras que la 7, ampliado en la Figura 38, se diseña de manera genérica ya que trabajará tanto si el desvío va hacia un lado como hacia el otro.

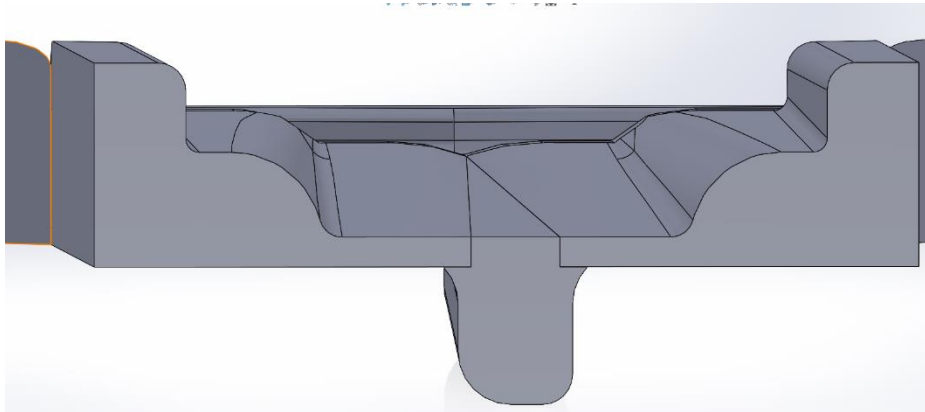


Figura 38. Visualización zona intermedia

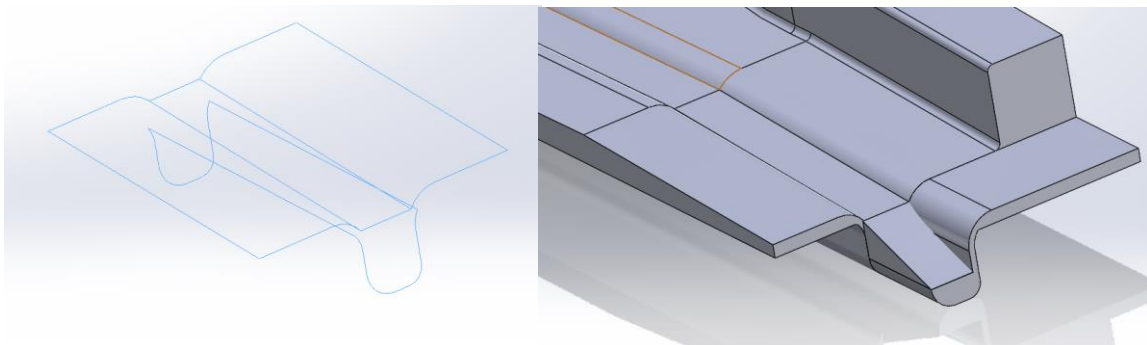


Figura 39. Diseño salida del dispositivo

7. Análisis preliminar

En este capítulo se realiza el análisis del encarrilador basado en el método de elementos finitos cuyo fin es garantizar el comportamiento bajo las posibles sollicitaciones

7.1 Introducción al método de elementos finitos

El método de los elementos finitos, tal y como define en el *El método de los elementos finitos. Volumen 1. Formulación básica y problemas lineales* [18], trata del procedimiento de aproximación de problemas continuos, donde el sistema continuo se divide en un número finito de partes o elementos. El comportamiento de todo el sistema vendrá dado en un número finito de parámetros.

Por ello, este proceso de aproximar se basa en encontrar un comportamiento similar al real. Mediante el desarrollo matemático consigue discretizar el continuo dividiéndolo en elementos de forma sencilla y unidos entre sí por puntos llamados nodos, situados en los contornos.

Este proceso de discretización se llama comúnmente mallado, se usa para resolver este modelo matemático. El método de los elementos finitos presenta como variables a los desplazamientos mediante funciones polinomiales que producen el campo de desplazamientos compatible con las condiciones de contorno aplicadas.

La geometría de la malla es el resultado del proceso comentado, pero no está limitado sólo por su geometría sino depende además de unas variables iniciales como la masa, las cargas aplicadas y sus restricciones. Por tanto, el objetivo principal será encontrar el conjunto de desplazamientos nodales que hace una energía mínima potencial, encontrando así un estado de equilibrio bajo la aplicación de las cargas y sus restricciones. Esto se reduce a la aplicación del principio del potencial mínimo de energía, que conduce a la formulación de las ecuaciones elementales del método de los elementos finitos.

$$[F] = [K] \cdot [d] \quad (4)$$

Donde K es la matriz de rigidez conocida, F es el vector conocido de las cargas nodales y d es el vector desconocido de los desplazamientos nodales. La matriz de rigidez, K , es función de la geometría del modelo, las propiedades del material y las condiciones del contorno o restricciones.

Básicamente, el método de los desplazamientos, como minimización de la energía potencial usando el principio de los trabajos virtuales, asegura el cumplimiento de las condiciones de equilibrio dentro de los límites establecidos, es decir:

$$\delta(U + W) = \delta(\Pi) = 0 \quad (5)$$

Siendo W la energía potencial de las cargas externas, Π es la energía potencial total y U la energía potencial interna.

Significa que, para asegurar dicho equilibrio, la energía potencial total debe ser estacionaria para las variaciones de los desplazamientos, por tanto, será mínima. Así pues, el método de los elementos finitos busca dicho mínimo con la condición de satisfacer una determinada configuración de los desplazamientos. Por ello, a mayor número de grados de libertad (GDL) más se acercará a la solución exacta, así afianzar el equilibrio completo, y, por ende, se tenderá a los desplazamientos verdaderos.

Las ecuaciones algebraicas son lineales y pueden solucionarse, así se obtiene los desplazamientos nodales. Partiendo de la teoría de Resistencia de Materiales en elasticidad lineal se cumple que el material aplicado en una zona elástica lineal, se producen pequeñas deformaciones y pequeños desplazamientos, estas ecuaciones son: las ecuaciones de compatibilidad, las ecuaciones constitutivas del material, la relación tensión y deformación y las ecuaciones de equilibrio del sistema (6)(7)(8), añadidas en el anexo 1.

En consecuencia, se puede proceder al cálculo de las tensiones y los esfuerzos. Actualmente se usa Solidworks como herramienta para formular y calcular el modelo de cálculo basado en este método.

7.2 Metodología previa para el análisis

En el análisis del presente proyecto, se ha seguido unas pautas previas para conseguir un modelo apropiado para su análisis, tomando como guía el libro *Finite element análisis for design engineers* [10] y los apuntes *Apuntes de clase mef: Cuaderno de prácticas de Simulación Mecánica mediante MEF con Solidworks* [12].

1. La creación de un modelo matemático que representa la geometría real y simplificada, en el cual se añadirán sus cargas, restricciones y propiedades del material.
2. El proceso de discretización del modelo matemático consiste en dividir en elementos teniendo en cuenta su geometría y sus condiciones de contorno.
3. La solución de las ecuaciones de método de elementos finitos.
4. El análisis de los resultados dependiendo de si hay una buena o mala interpretación de ellos, se tomarán unas determinadas decisiones de diseño.

Todos los errores arrastrados que vienen del modelado, de la discretización y la solución deben ser prevenidos, sino se tiene en cuenta produce una inviabilidad del análisis. Es importante entonces una verificación y validación en el análisis del diseño.

La verificación debe cumplir que el modelo matemático que haya sido discretizado y resuelto cumpliendo con una solución numérica correcta. La validación determina si un modelo de elementos finitos que representa la realidad desde la perspectiva prevista. Además, comprobar si los resultados describen correctamente el comportamiento en la vida real del objeto analizado.

Todo ello sirve como retroalimentación para la modificación del modelo matemático, así reajustarlo a una aproximación a la situación real.

Posteriormente, el análisis de convergencia revelará problemas que causan fallos en la verificación, dichos problemas pueden solventarse realizando modificaciones en la malla, como un mejor refinamiento de esta.

Un modelo con definiciones de carga incorrectas pasaría la prueba de verificación porque ésta se preocupa únicamente por la exactitud de la solución del modelo matemático, no de si el modelo es correcto o no. Por tanto, hay que establecer la corrección del modelo matemático junto

con una solución correcta, llamamos a este procedimiento el proceso de validación. Tanto la verificación como la validación son procesos que deben ejecutarse de forma paralela, según Figura 40.

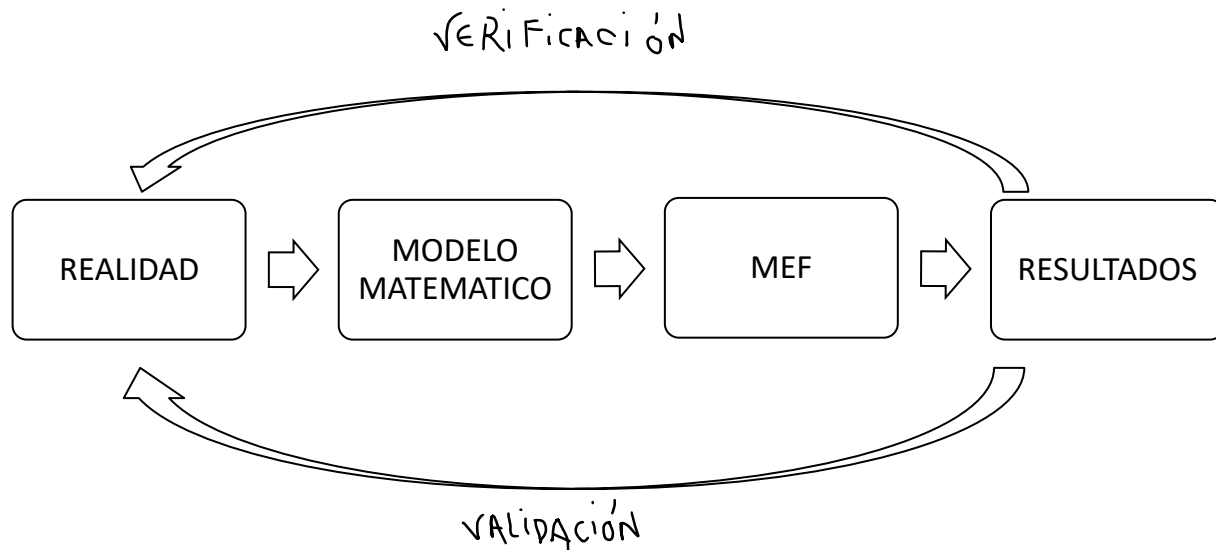


Figura 40. Diagrama de flujo

7.2.1 El proceso de convergencia

Solidworks usa el metodo adaptativo h, llamado así por el tamaño del elemento, utiliza elementos con baja distorsion de forma que modelan el primero o segundo orden del campo de desplazamientos. Los programas con convergencia adaptativa h, ofrece ventajas para detectar mallas refinadas asi identificar las tensiones. Los usuarios se benefician debido a que automaticamente generan graficos de convergencia de sumo interes. Todos los gráficos representados muestran la convergencia en un numero finito tanto desplazamientos como tensiones e indica el error de discretización que aumenta a mayor numero de grados de libertad. Aunque el mallado de la geometría preparada suele realizarse automáticamente, es responsabilidad del

usuario determinar si la malla es lo suficientemente buena. para entregar los resultados buscados.[10]

El objetivo no es minimizar el error sino obtener una solución donde los datos de interés no dependen significativamente de la elección de la discretización. La solución no puede considerarse confiable a menos que tengamos una estimación confiable de la discretización error. Para ello, el análisis de un error de discretización se realiza mediante el proceso de convergencia.

La selección del modelo adecuado es un paso fundamental para la fiabilidad de los resultados obtenidos, mediante la convergencia numérica se usa como solución de la incógnita buscada. Para encontrar un tamaño global de la malla, que asegure la convergencia del método, se usa el error de convergencia en puntos o zonas de interés preseleccionadas.

Error de convergencia de un valor se define:

$$\text{Error de convergencia} = \left| \frac{\text{Resultado}(n) - \text{Resultado}(n - 1)}{\text{Resultado}(n)} \right| \quad (6)$$

Es la aproximación consecutiva de dos mallados de grosor consecutivos, El error de convergencia se considera aceptable siempre que el error sea menor del 3%. Si unas zonas convergen para tamaños mayores que otras y se usa un tamaño de elemento medio global, entonces vendrá determinado por la convergencia de esa zona de interés.

7.3 Condiciones de contorno

7.3.1 *Material*

Como punto de partida para la hipótesis de cálculo es tomar las peores condiciones iniciales para orientar el posterior análisis en el lado de la seguridad. El material usado será chapa de acero al carbono 1023, sus características tabla 3, datos recogidos de la base de datos de Solidworks.

Tabla 2. Propiedades del acero al carbono 1023

| Propiedades | Valor | Unidades |
|--------------------------|-------------|-------------------|
| Módulo elástico | 204999.9984 | N/mm ² |
| Coefficiente de Poisson | 0.29 | |
| Densidad | 7858 | Kg/m ³ |
| Límite de rotura/ruptura | 425 | N/mm ² |
| Límite elástico | 282,685 | N/mm ² |

Este tipo de material fácil de mecanizar con unas características técnicas las cuales al tener un pobre límite elástico y un bajo límite en rotura en comparación con otros aceros de mejor calidad. Por tanto, si supera el análisis bajo estas condiciones, cualquier material de calidad superior mejorará los resultados obtenidos. Se trata de un estudio realizado desde el lado de la seguridad.

7.3.2 Condiciones de carga

El contacto rueda-carril es el área de interpenetración entre dos cuerpos en contacto. Existen numerosas teorías sobre esta interacción sobre todo la modelización de las tensiones que se producen en esa pequeña área. El estudio de estas tiene como propósito centrarse por ejemplo en la mejora de la seguridad, la reducción de los costos de mantenimiento, la gestión de la energía, entre otras.

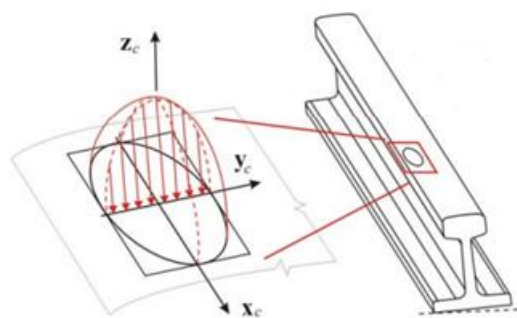


Figura 41. Huella y forma de la distribución de la carga (Rovira, 2012). [14]

La teoría de Hertz es una de ellas, considera que las superficies cercanas a la zona de contacto son paraboloides donde no existe rozamiento y tienen un comportamiento elástico lineal. Según la Figura 41, establece la distribución de esfuerzos en la huella, por tanto, la elección del punto a estudiar será en el centro de la huella, al tener el máximo valor.[17]

Por consiguiente, al ejercer las presiones verticales correspondientes, la intersección entre ambas superficies tendrá forma de elipse y, por consiguiente, la distribución de presiones normales un elipsoide. Estas elipses de contacto están condicionadas por la geometría de la zona de contacto, las cargas soportadas y las características mecánicas del acero. Se estima la geometría de la huella, Figura 42 con valores tabla 4, para ello se consulta sobre los diversos ejemplos de su configuración [17][14]

Tabla 3. Dimensiones de la huella

| | |
|----------|--------|
| a | 8 mm |
| b | 4.3 mm |

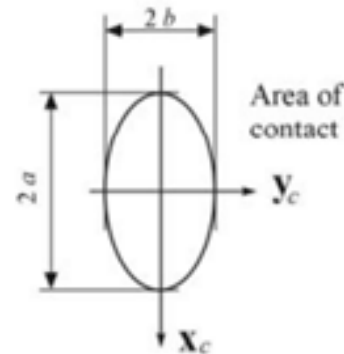


Figura 42. Parámetros que definen tamaño de la huella (Rovira,2012) [14]

El valor de la carga aplicada se toma de los datos sobre el tren ligero de Metro Málaga disponible en la siguiente web *Listado tren* [18], tabla 5, se obtiene el peso aplicado en cada rueda, es que usará para el análisis. Aunque se tome la huella con valores aproximados, en la realidad se parte que en el paso de la rueda por el dispositivo lo hace a través de la pestaña.

Tabla 4. Peso bogie

| | |
|---|-------|
| Peso total (t) | 45,45 |
| Peso por eje (t) | 7,575 |
| Peso aplicado por rueda en vacío (t) | 3,79 |

7.3.3 Condiciones de apoyo

La superficie real de apoyo está compuesta por adoquines, Figura 43, en la representación de nuestro modelo se toman valores orientativos del adoquín 20 x 10 cm, de los cuales se representan los puntos de apoyo para nuestro dispositivo como puntos repartidos de forma desigual debido a la irregularidad del terreno, al tratarse de adoquines con relieves pueden aportar más puntos de apoyo de los que se van a disponer.



Figura 43, Superficie de la vía

Por ello, en nuestro modelo se realiza se establece puntos de apoyo repartidos de forma cuadrada de 10 x10 mm, Figura 44.

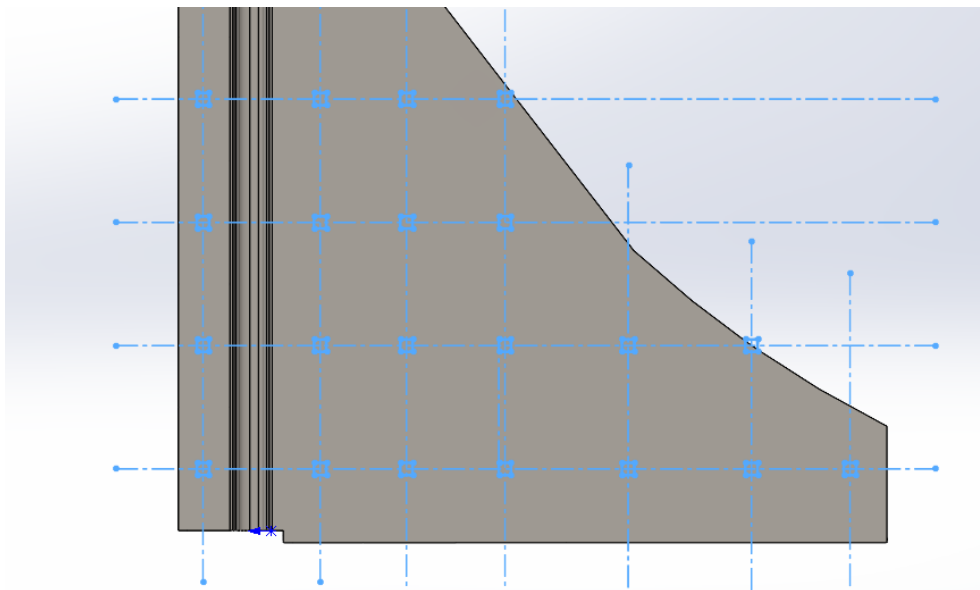


Figura 44. Puntos de apoyo con adoquines

Se considerarán puntos clave porque según los resultados obtenidos sufrirán cambios en la consideración de los mismos. Por otro parte, se establecen como puntos fijos y estables el extremo opuesto, Figura 45, a la aplicación de la carga, así estabilizar el modelo.

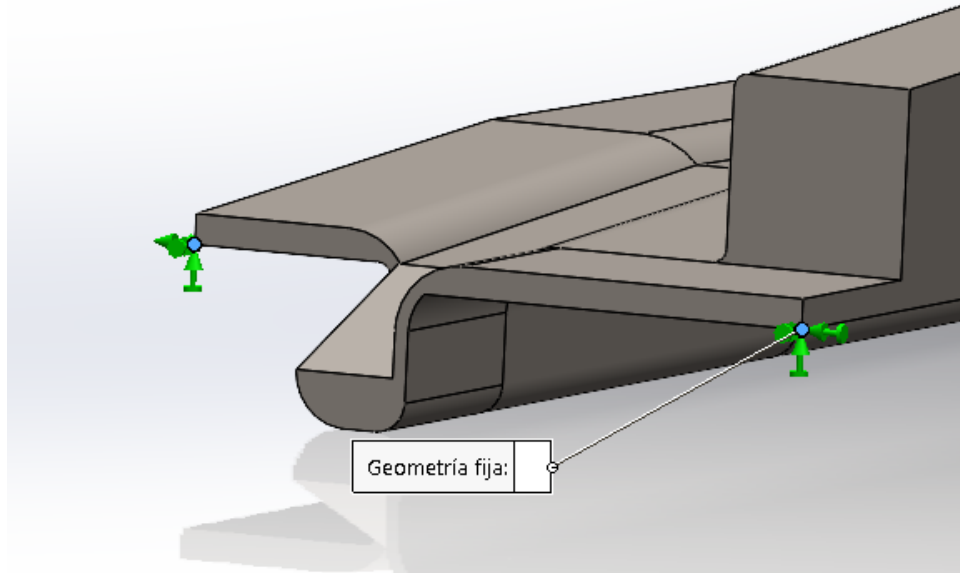


Figura 45. Apoyos fijos

8. Análisis del comportamiento

En este capítulo, se realiza la búsqueda de un buen modelo matemático fiable mediante una elección de una malla adecuada para así obtener una visión cuasi realista del comportamiento frente a la sollicitación. Estas hipótesis de cálculo serán justificadas y expresadas convenientemente: las simplificaciones, si las hubiese, el proceso de convergencia y la búsqueda de la malla adecuada.

Como ya se ha comentado anteriormente, una de las hipótesis de cálculo es analizar todo el comportamiento desde la perspectiva de la seguridad, es decir, preestableciendo las peores condiciones posibles y analizando en la situación menos conveniente. Por eso, para comenzar con el proceso del análisis a carga estática, se establece como punto más desfavorable la zona de entrada al dispositivo.

En primer lugar, se realiza una validación de las condiciones de contorno, en concreto las sujeciones, así obtener una respuesta coherente y acorde a la situación mediante los siguientes análisis, los cuales mantendrán a lo largo de ellos el tipo de material, la carga y el apoyo fijo. Se realizará una iteración de estudios donde las conclusiones se retroalimentarán cuyo fin será la modificación de las sujeciones y adecuarlo a una solución adaptada.

8.1 Primer análisis

En primer lugar, partiendo del modelo diseñado se dispone las condiciones de contorno siguiente: apoyo deslizante en la parte inferior.

Una vez realizada la configuración, Solidworks arroja los siguientes datos: se encuentran máximos fuera de la aplicación de la zona de carga, en concreto en los apoyos inferiores. Además, se aprecian ciertas deformaciones no coherentes con un material dúctil, ya que en primer lugar debería de haber una previa deformación plástica, Figura 46.

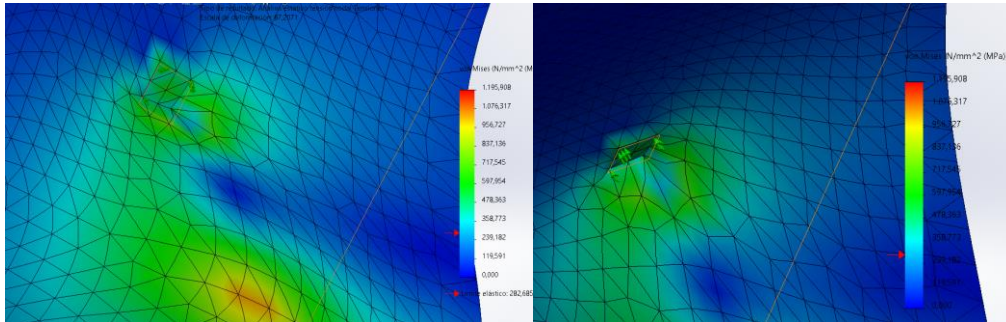


Figura 46. Resultado deformación primer análisis

En el entorno de la huella se observa aumentos de tensión elevadas, Figura 47. Esto es debido al efecto de las condiciones de contorno de apoyo dispuestas, como conclusión, están aportando una excesiva rigidez.

Por tanto, al no corresponderse con la respuesta esperada, como es el caso de las tensiones, con unos picos elevados fuera de la aplicación de la carga, y sumado a unas deformaciones irreales, estos resultados no pueden considerarse buenos e invalidan el modelo.

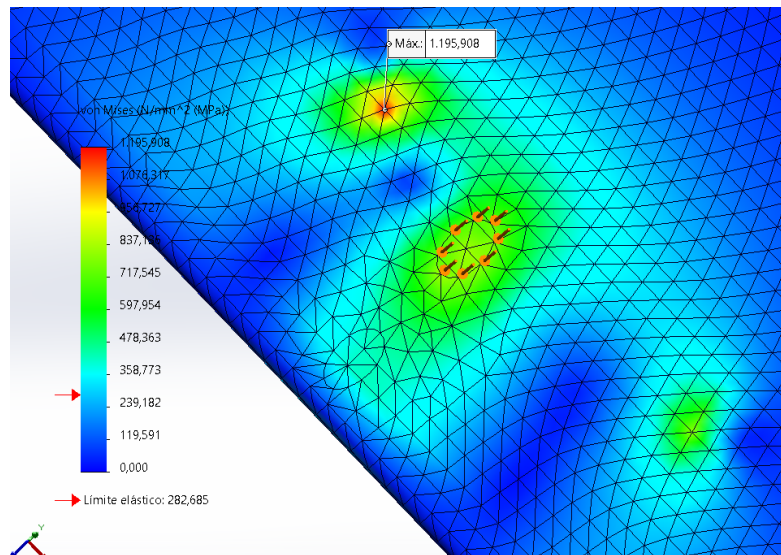


Figura 47. Resultado de primer análisis tensiones

En conclusión, de este primer análisis, se puede ver que las tensiones a las que llegan superan no solo la plastificación, sino también superan la tensión última de los aceros normales. Por lo cual, se necesita aumentar con más espesor de en torno a 20 a 30% y, además, modificar las

condiciones de contorno, es decir, las sujeciones de apoyo, para que aporten cierta flexibilidad. Para ello, se modificará como condición de apoyo unos soportes elásticos o muelles.

8.2 Segundo análisis

Se modifica las condiciones de apoyo a unas mixtas, Figura 48, no solo con apoyo deslizantes sino también con soportes elásticos en los alrededores de la huella. Se propone como valor inicial del muelle, $K = 10^6$ N/m, a diferencia del anterior este tipo de sujeción aporta menos restricción que el apoyo deslizante. Estos apoyos de rodillos aportan una condición demasiado exigente, se pretende buscar una cierta flexibilidad en el comportamiento.

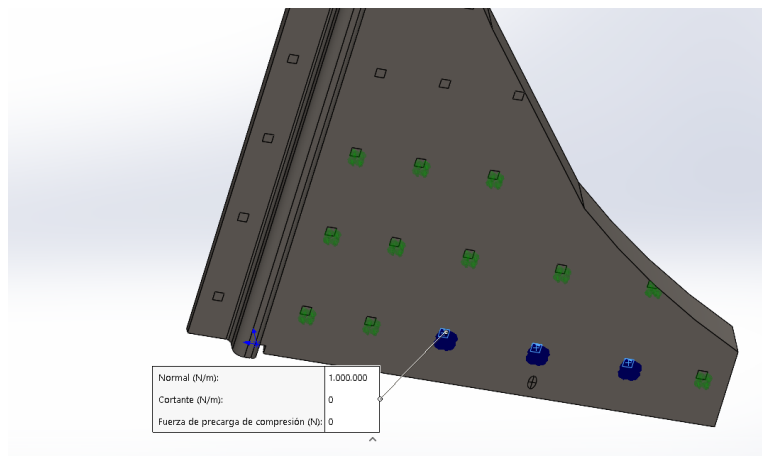


Figura 48. Condiciones de apoyo mixtas

En cada uno de los apoyos de los aledaños todavía se observa la rigidez de los extremos, véase la Figura 49.

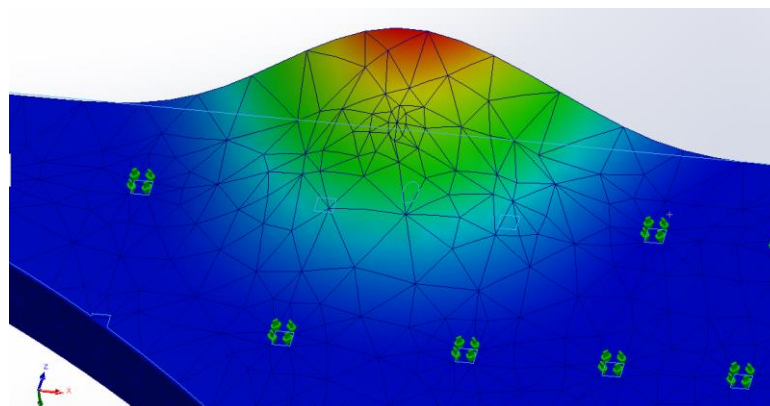


Figura 49. Resultado deformaciones segundo análisis

En la siguiente Figura 50 se muestra como las tensiones en la zona de aplicación de la carga se va difuminando a lo largo de toda la placa, que es lo más parecido a la realidad, aunque todavía se aprecia la rigidez en lugares donde hay apoyos deslizantes, zonas coloreadas en verde.

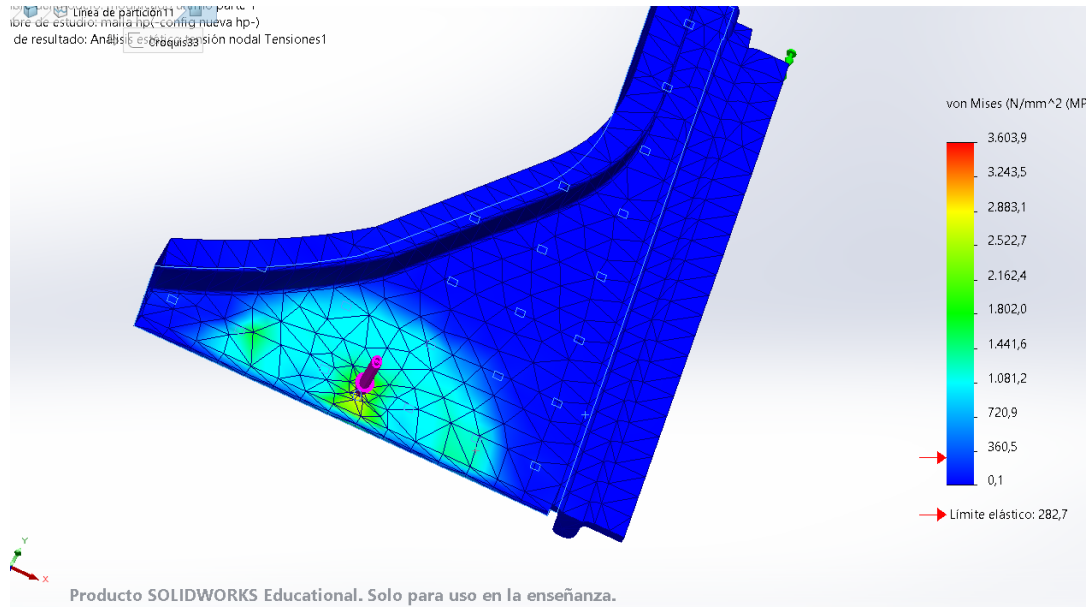


Figura 50. Resultado de tensiones en el segundo análisis

Como se observa en la Figura 50 y 51, los valores de las tensiones en zonas localizadas en torno a los apoyos deslizantes. Una de las conclusiones que se obtienen es la forma de propagación de las tensiones, que su geometría es equivalente a un arco o media circunferencia, será determinante para los análisis próximos.

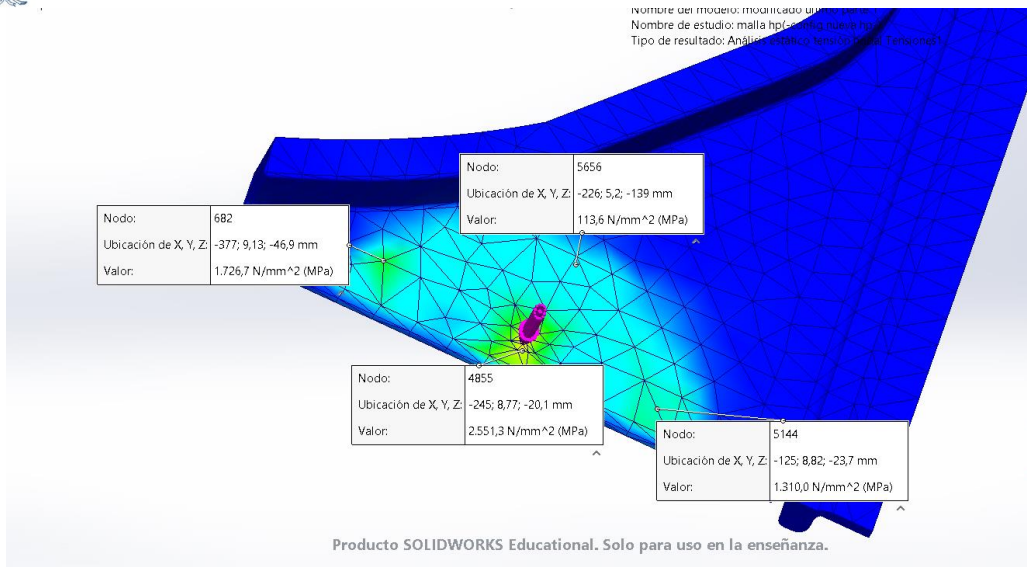
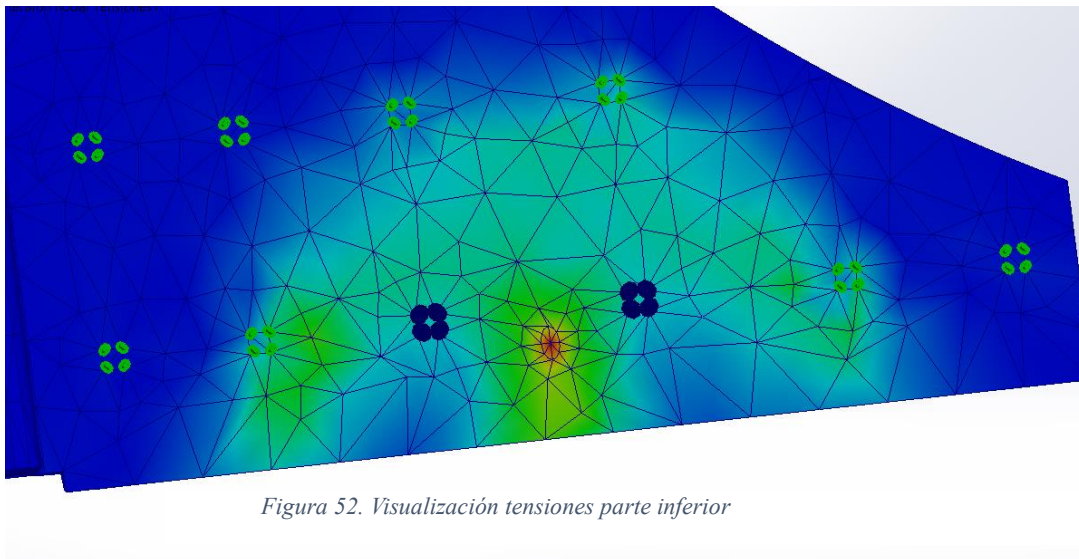


Figura 51. Valores de las tensiones tercer análisis

Es en el entorno de la huella donde hay una apreciación de una versión más realista de la deformación y de cómo se aplica la carga, Figura 52. De este modo, al finalizar este segundo análisis, se deduce que el mejor comportamiento será incluir como condición total de contorno un soporte elástico.



8.3 Tercer análisis

A continuación se realiza el análisis con las condiciones de apoyo con soportes elásticos en toda la parte inferior, cuyo valor es de 10^6 N/m, Figura 53.

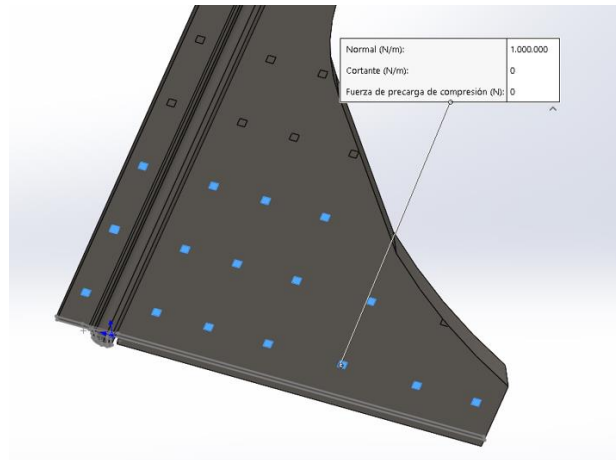


Figura 53. Soporte elástico parte inferior

Se aprecia una coherencia en la transmisión de la carga, no se observan focos con altos valores de tensiones en zonas que no corresponden, Figura 54.

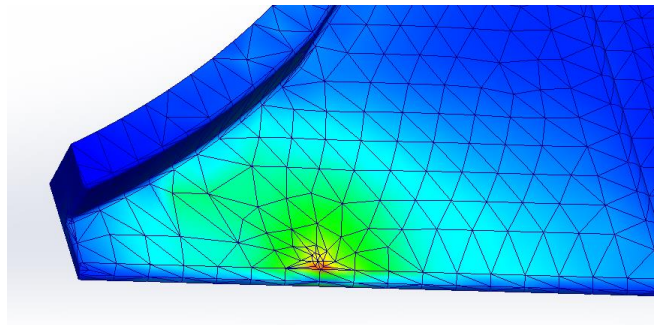


Figura 54. Resultado tensiones

Sin embargo, los valores de las tensiones son elevados, Figura 55, requiere añadir espesor al diseño para trabajar adecuadamente con el material, pero *¿cuánto?* Por esta razón se realiza una iteración de espesores, cuyo finalidad es de suma importancia ya que será clave en el diseño.

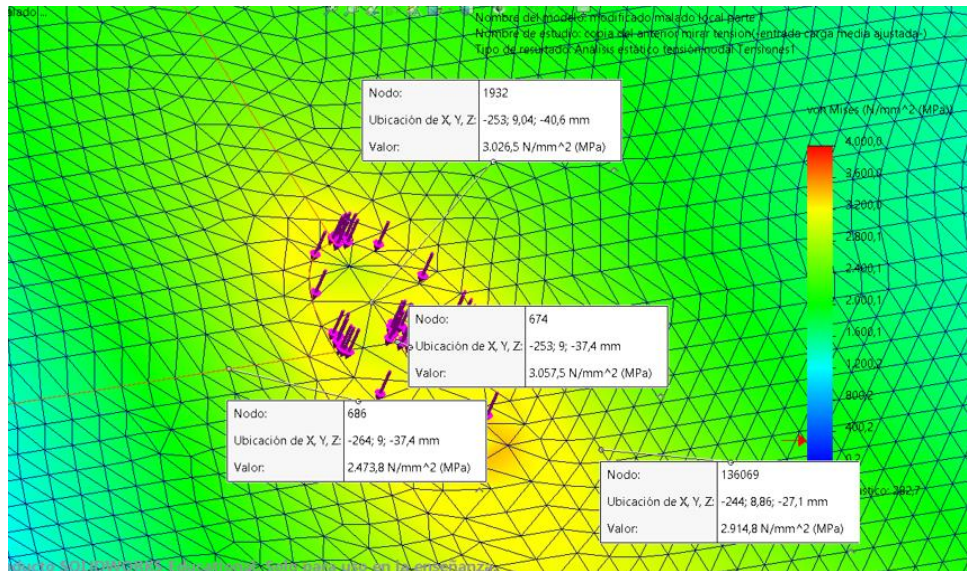


Figura 55. Resultados tercer mallado

8.4 Iteración

A continuación, se comienza el proceso de iteración no solamente con el espesor sino ajustando además el valor del soporte elástico, cuyo fin será buscar la convergencia de las tensiones y, por ende, el de los desplazamientos. Esta iteración con diversos espesores tiene como objetivo conseguir que las tensiones producidas trabajen dentro del rango de la zona elástica hasta el límite de rotura.

Se añade una línea más de apoyos con soporte elástico con valor de $2 \cdot 10^6$ N/m, Figura 56, mientras que el resto se quedan con el mismo valor anteriormente comentado. Esto aporta un poco más de rigidez en comparación con el resto, ya que la entrada de la rueda en el dispositivo generará más sujeción.

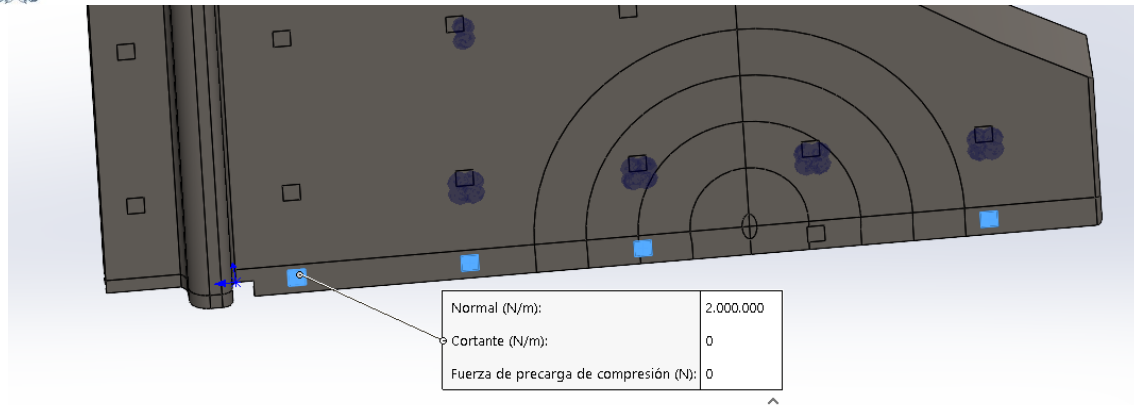


Figura 56. Apoyos soporte elástico

A modo de resumen se añade los valores más representativos del estudio de la iteración de espesores, ya que en cada uno ellos se ha realizado el proceso de convergencia de la malla, así dar fiabilidad a los valores obtenidos, tabla 6.

Tabla 5. Iteración de espesores

| Iteración | Espesor (mm) | Mallado Tamaño del elemento (mm) | Tensión (MPa) | Desplazamiento global (mm) |
|------------------|-------------------------|---|--------------------------|---|
| 1 | 15 | 36.5 | 1547.3 | 74.8 |
| 2 | 25 | 40.75 | 817.8 | 74.8 |
| 3 | 33 | 43.7 | 545.6 | 62.5 |
| 4 | 40 | 45.9 | 639.9 | 69.9 |

Después de la iteración realizada, se aprecia que con un espesor de 40 mm la zona de la huella trabaja a unos valores de tensiones entorno al limite tanto elástico como de rotura, sin salirse de los valores últimos del acero. El ajuste de mallado para los desplazamientos se realiza a partir de la elección del espesor de la chapa, siendo ésta de 40 mm.

El objetivo es llegar a valores de desplazamientos globales por debajo de 1 mm, para ello se realiza una iteración de estudios modificando el valor de los soportes elásticos, dando los siguientes resultados de la tabla 7:

Tabla 6. Iteración de desplazamientos

| Iteración | Soporte Elástico 1 (N/m) | Soporte Elástico 2 (N/m) | Desplazamiento global (mm) |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | $200 \cdot 10^6$ | $100 \cdot 10^6$ | 1.2 |
| 2 | $400 \cdot 10^6$ | $200 \cdot 10^6$ | 0.79 |

La búsqueda de la convergencia de los desplazamientos es más rápida, debido a que previamente se ha realizado el proceso de convergencia de las tensiones. Al ser éstas de segundo orden, implica intrínsecamente que los desplazamientos ya hayan convergido a un valor constante.

Los dos valores pueden darse como válidos, pero pesa más la limitación computacional que se tiene disponible.

8.5 Mallado

Una vez obtenido el espesor adecuado para el trabajo de las tensiones y unas sujeciones que proporcionan un campo de global de desplazamientos mínimo, se trabaja en la búsqueda de encontrar la malla adecuada. Para ello se fijan unos puntos de control, Figura 57, donde se recogerán los datos y aplicar el proceso de convergencia.

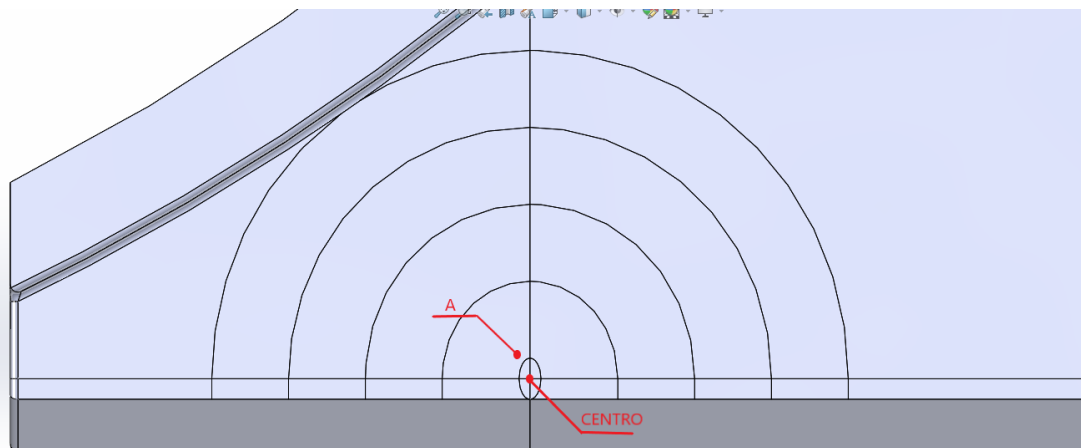


Figura 57. Puntos de control

Se comienza por un tamaño máximo de elemento el cual admite el programa sin que se produzcan errores. Mientras que el tamaño se irá reduciendo hasta un tamaño mínimo de elementos, de manera que los puntos de control establecidos den valores coherentes hasta llegar a la convergencia.

Atendiendo a los resultados obtenidos en la tabla 9, se visualiza que en el control de malla 5 es el momento en el cual el error de convergencia llega por debajo 3% en los dos puntos de interés, se da por válido este mallado. Aunque se haya llegado a una convergencia adecuada, el tamaño de los elementos son irregulares y no lo suficientemente pequeños, tanto en la superficie como en la zona interna para que de una información correcta.

8.6 Ajuste del mallado local

El modelo adecuado para obtener una buena representación del campo de tensiones requiere una malla más fina que el resto del sistema y localizada en la zona de interés. Por ello, invita a modificar la malla para obtener valores más refinados con geometrías más complejas mediante la malla basada en curvatura.

Primero, se precisa conocer el tamaño global del modelo y después realizar un modelo de transición para el estudio en la zona local, en Solidworks Simulation lo llama Control local de malla. Este consiste en combinar diferentes tamaños de elementos de manera progresiva, es decir, localizar los elementos pequeños en la zona de interés para obtener resultados fiables y que estos evolucionen su tamaño hasta el tamaño global de la malla.

Se realiza una configuración geométrica basada en un franjeado, en los cuales se establecen por capas desde la zona interna hasta la más externa para conseguir un adecuado control de mallado local. Como se observa en la Figura 58, se ha adecuado la configuración de la geometría a las conclusiones anteriormente comentadas sobre la forma de propagación de las tensiones, así poder recoger unos datos más fiables.

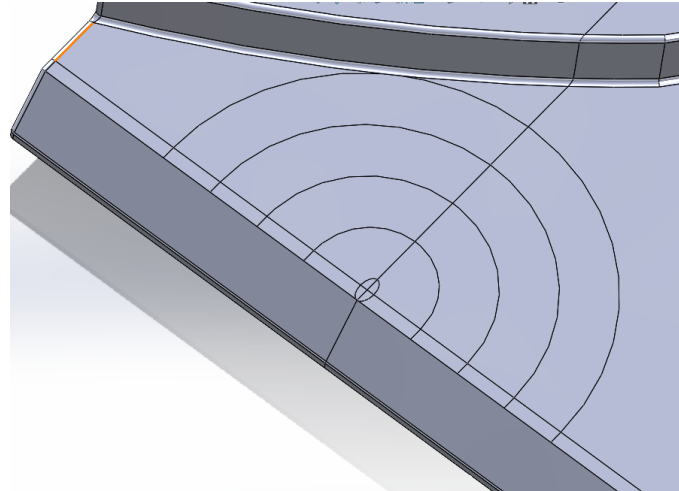


Figura 58. Configuración para control de malla local

El programa activa la malla basada en curvatura para crear el comentado ajuste local. Los parámetros de control local de malla están definidos por el tamaño mínimo del elemento y el cociente de crecimiento para una progresión incremental coherente.

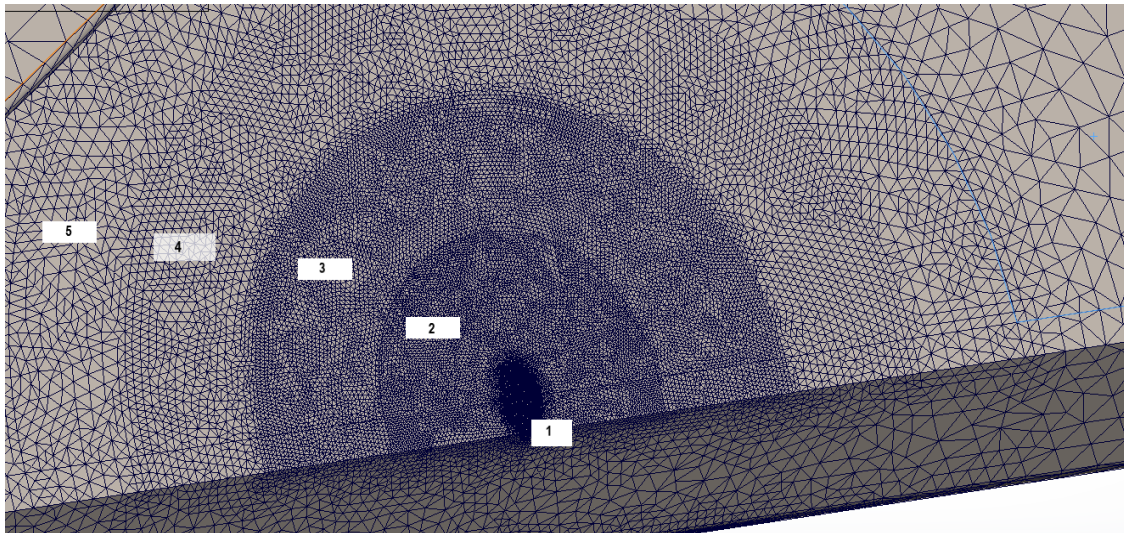


Figura 59. Progresión del tamaño de malla

Se ha establecido en la Figura 59 los siguientes valores de la tabla 8 por capas con una ratio común a/b de 1.1.

Tabla 7. Control de malla local

| Control local | Tamaño del elemento (mm) |
|---------------|--------------------------|
| 1 | 0.3 |
| 2 | 0.8 |
| 3 | 1 |
| 4 | 2 |
| 5 | 3 |

Tabla 8. Estudio de la malla

| Malla | Tamaño del elemento (mm) | Gdl | σ [central] (MPa) | Ec[central] | σ [A] (MPa) | Ec[A] |
|-----------|--------------------------|-------|--------------------------|-------------|--------------------|-------|
| 1 | 45.9211 | 8793 | 638.2 | 35.355 | 341.7 | 3.954 |
| 2 | 41.5690 | 9533 | 471.5 | 3.533 | 328.7 | 5.563 |
| 3 | 37.6769 | 10373 | 455.4 | 2.796 | 311.4 | 5.263 |
| 4 | 33.9235 | 12126 | 468.5 | 1.100 | 328.7 | 2.837 |
| 5 | 30.7652 | 13839 | 463.4 | | 338.3 | |
| curvatura | 45.9211-0.3 | | 458.7 | | 392.2 | |

9. Resultados

En este capítulo se incluye todos los resultados arrojados por Solidworks después de encontrar la malla adecuada estudiada anteriormente. En primer lugar, se justificará la calidad de la malla seleccionada y posteriormente, se comentará los resultados obtenidos.

Los elementos de la malla producen una distorsión debido al cambio de forma, a mayor distorsión poseerá mayor diferencia con el valor ideal de los elementos. La relación de aspecto es la medida del cambio de forma entre diferentes tetraedros, este parámetro mide cómo afecta a esta relación del normalizado al ideal. [12]

El cociente jacobiano se usa como medida de la distorsión en elementos de segundo orden, a mayor distorsión del elemento mayor variación de los elementos de jacobianos. Debe cumplirse además que el cociente jacobiano sea menor a 10 en la zona de interés y mayor a cero en toda la malla. Como se observa, Figura 60, tiene valor 1 en toda la malla.

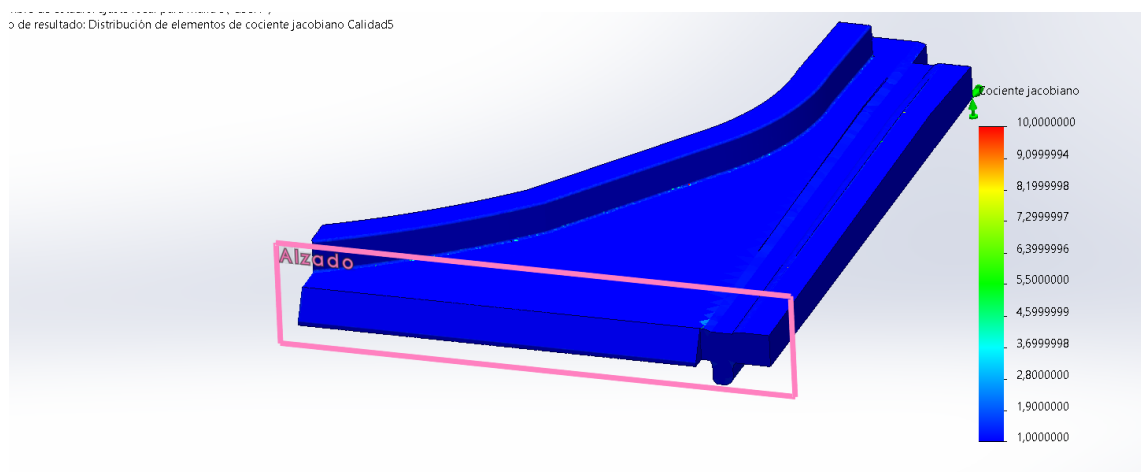


Figura 60. Resultado cociente jacobiano

Mientras que el cociente de aspecto es inferior a 5 y mayor a 3 por tanto, se trata de una malla de buena calidad en toda la zona de interés, implica un 98% del resultado, y el resto de los elementos fuera de la zona es inferior a 10, Figura 61.

Tipo de resultado: Diagnóstico de calidad de malla Diagnóstico3
Criterio de calidad de malla: Cociente de aspecto
Criterio de error: Mayor que 5,0
Número total de elementos de baja calidad: 518

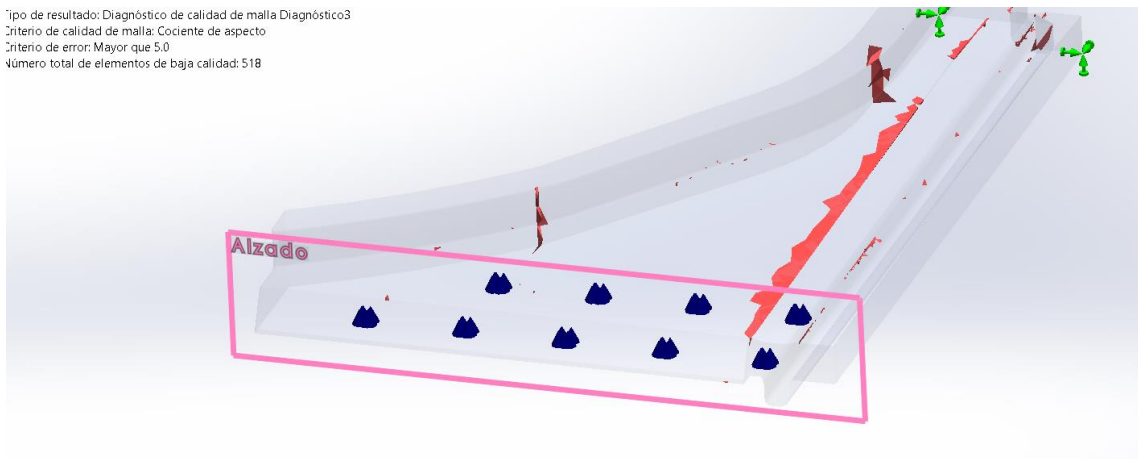


Figura 61. Resultado cociente de aspecto

Se configura el factor de seguridad para que zona que supera el límite de ruptura basado el criterio de Von Mises, como se ve en la Figura 62, solamente está fallando la zona local de la huella e internamente, es decir, zona de color rojo, mientras que zona azul queda del lado de la seguridad.

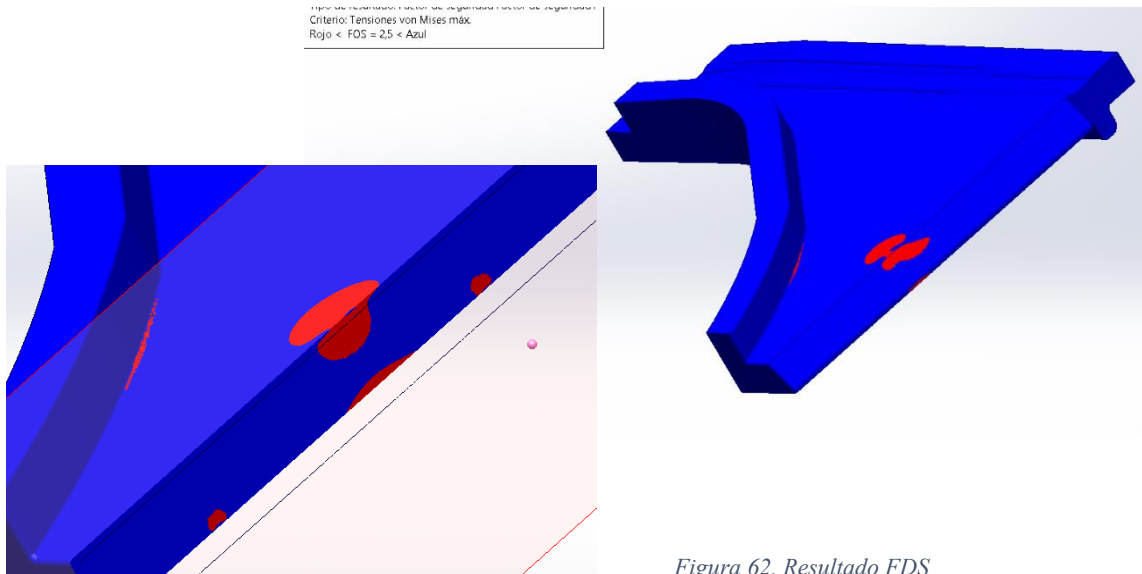


Figura 62. Resultado FDS

El volumen de material que supera el criterio de seguridad y, por tanto, superará el límite de rotura será un volumen en torno al 2,3%, como se puede observar en la Figura 63.

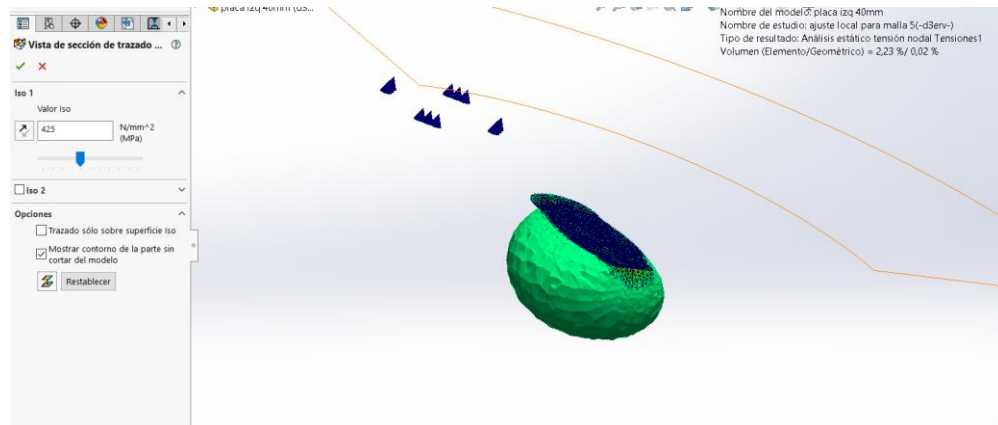


Figura 63. Volumen supera límite de ruptura

A continuación, el resultado de la deformada donde se aprecia que trabaja a flexocompresión, Figura 64.

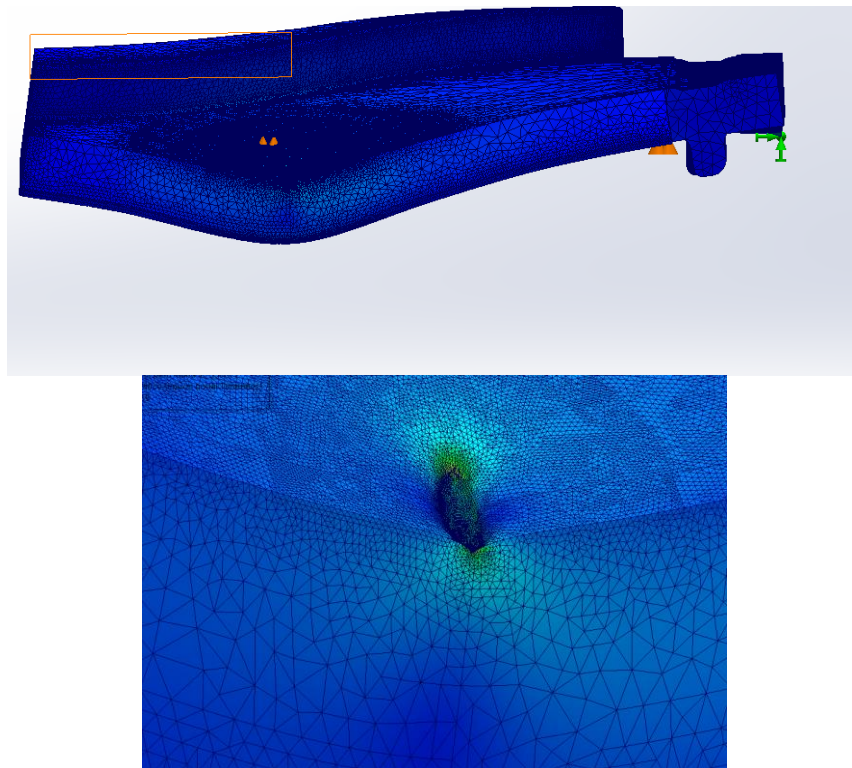


Figura 64. Resultado de la deformada

Seguidamente se coteja que el campo de desplazamientos está por debajo de 1mm, Figura 64.

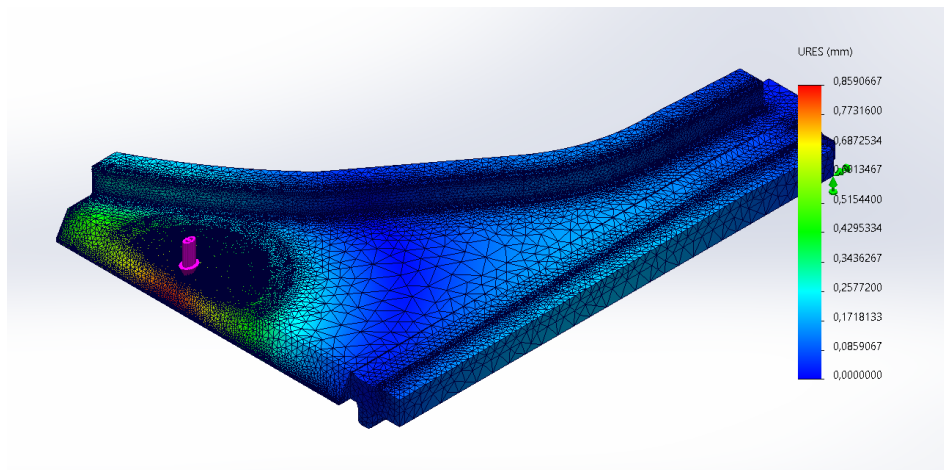


Figura 65. Desplazamientos globales

Los resultados de las tensiones en la zona de interés se ven reflejado que trabaja desde el límite elástico hasta el límite de ruptura, Figura 66.

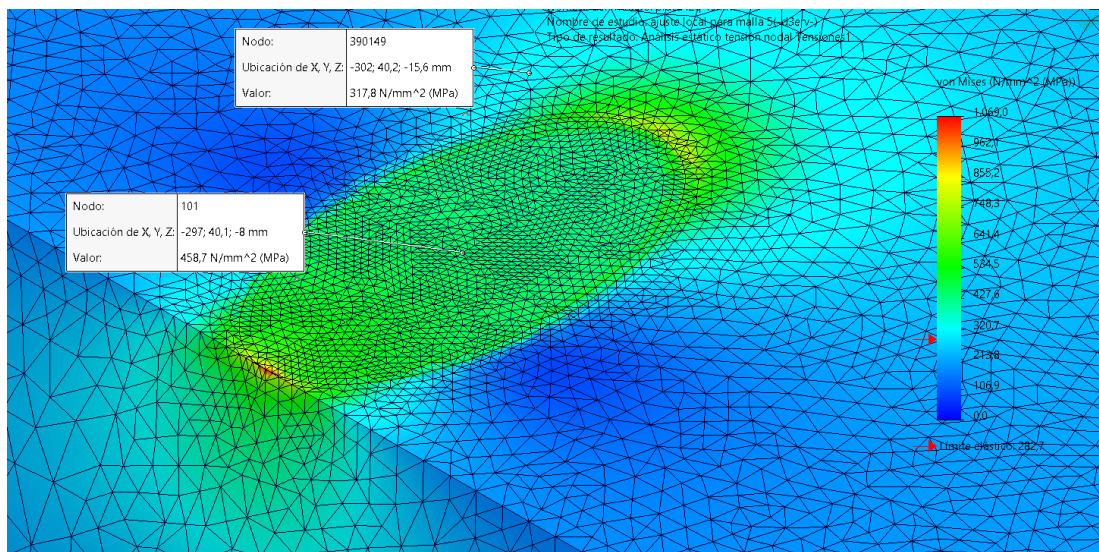


Figura 66. Resultado tensiones zona de la huella

Se analiza el resultado la zona interior del dispositivo, Figura 67 y 68, se observa que la zona verde y amarilla supera el límite elástico. Aunque está salvaguardada por una región más extensa de color azul, el cual no le afectan las sollicitaciones. Ésta actúa como alma o línea neutra, manteniéndose firme e impidiendo la rotura del dispositivo al paso de la carga, donde la carga actúa con efectos locales.

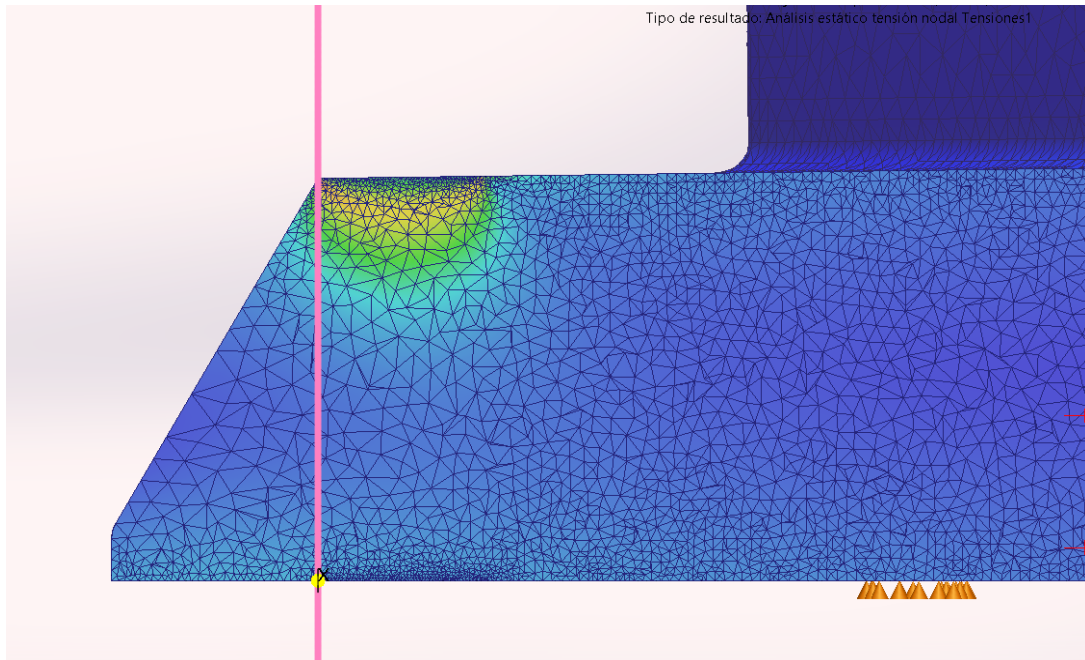


Figura 67. Corte vista lateral

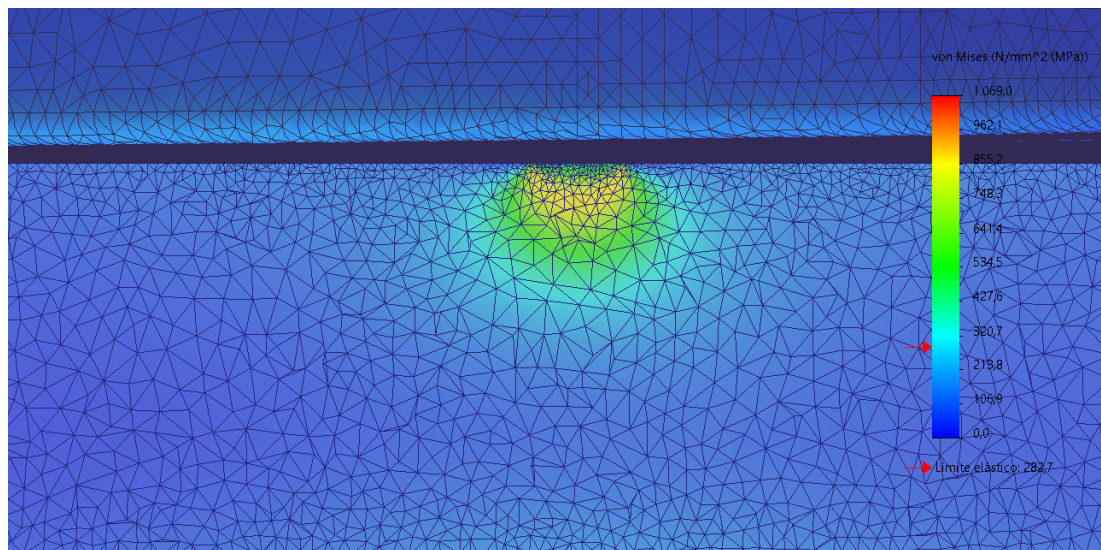


Figura 68. Corte vista frontal

10. Conclusiones

Durante este proyecto se ha conseguido diseñar un encarrilador capaz de cumplir los objetivos establecidos. Entre las ventajas más destacadas se encuentra la facilidad de transportar por el operario, se ha obtenido un dispositivo liviano de manera que cumple satisfactoriamente los requisitos iniciales. Siendo ésta una baza importante de cara al mercado ya que da una solución a un problema donde actualmente no existe ningún medio alternativo a éste. Se ha satisfecho uno de los propósitos más importantes para el funcionamiento adecuado del encarrilador puesto que se ha realizado de tal forma que se adapta tanto a la plataforma como al carril embebido.

En este punto se ha de señalar, que, aún se cuestiona y hay ciertas dudas sobre si se moverá o no la placa transversalmente tras el primer impacto. Es probable que ocurra, pero en el momento en el cual la rueda aplique esa fuerza vertical sobre el encarrilador, será tan sumamente mayor que no podrá moverse en otra dirección. Esto se suma a que los adoquines se encuentran a diferentes niveles de altura y al ser de un acabado rugoso favorecerá el aumento de la fuerza de rozamiento entre el encarrilador y la plataforma. En caso de necesitar algo fijo para que la placa no se mueva tras el primer impacto, una posibilidad es diseñar en los alrededores del dispositivo un saliente con un orificio para que el operario fije un tornillo al suelo en el momento de su utilización y así conseguir frenar la placa.

Aunque el material escogido se ha realizado desde la perspectiva de la seguridad, es decir, el dispositivo presenta una resistencia que garantiza los supuestos de cálculo establecidos. Pero no sería el más indicado para su fabricación porque en algunas zonas particulares del diseño requiere de un fresado. Este proceso agravaría los costes de fabricación. No obstante, gracias a esta elección y conociendo así los resultados de los cálculos, se dispondrán como punto de partida en caso de querer cambiar el tipo de acero a otro de mejor calidad o si se desea incluir cualquier acabado que mejore sustancialmente la resistencia a las sollicitaciones producidas. Por ello, una modificación del tipo del material también implica intrínsecamente la posibilidad de una alternativa en el proceso de fabricación como puede ser mediante colada del acero.



Como última conclusión, sería interesante una revisión más detenida del diseño en cuanto a su geometría. Sobre todo, después de realizar un estudio pormenorizado del paso por ambos dispositivos y cómo afecta la posición de ambas ruedas. Así se ha de destacar los puntos clave donde se puede obtener un recorrido óptimo y además de ayudar a conocer el peralte adecuado para la rectificación de la posición u otras variantes que impliquen la mejora del movimiento. Una consecuencia crucial en el conocimiento del estudio del recorrido es adecuar o disminuir el escalón en forma de triángulo situado en la placa *corazón*. Se trata de un factor importante ya que su modificación no restringiría el paso de la rueda en cualquier situación que se encuentre.

En definitiva, el diseño propuesto logra los objetivos marcados en cuanto a resistencia, una adecuada rigidez, así como demás características comentadas, proporcionando un encarrilador que cubre las necesidades ideales para afrontar un descarrilamiento.

11. Bibliografía

- [1] Álvarez, A. G. (2021). *Manual de ferrocarriles. El sistema ferroviario español. Separata Convocatoria Operador Comercial de Ingreso N2 2022*. España: IBERGARCETA PUBLICACIONES, S.L.
- [2] David Orden, U. d. (23 de 1 de 2014). *Cifras y teclas*. Obtenido de Cifras y teclas: <https://cifrasyteclas.com/2014/01/23/clotoide-la-curva-que-vela-por-tu-seguridad-en-carreteras-y-ferrocarriles/>
- [3] Fernández, F. J. (s.f.). *Ingeniería ferroviaria (2a. ed.)*. Uned Universidad Navional de Educación a distancia.
- [4] Fernández, C. J. (Septiembre 2013). *Estudio de la evolución de los desvíos ferroviarios*. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza.
- [5] Ferrocarril, M. d. (1 de 7 de 2015). *Museo del Ferrocarril*. Obtenido de https://www.museodelferrocarril.org/coleccion/pieza_destacada.asp?item=5
- [6] Insa Franco, R. (s.f.). *Una introduccion al ferrocarril. Volumen I: elementos constituyentes de la superestructura*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] Insa Franco, R., & Real Herraiz, J. (2008). *Estado del Arte y Análisis de la tecnología de sistemas de "Carril Embebido" en el año 2008*. Universidad Politécnica de Madrid; Universidad Politécnica de Valencia.
- [8] Insa Franco, Ricardo. (s.f.). *Una introducción al ferrocarril. Volumen II: elementos constituyentes de la infraestructura*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- [9] Kecko from Eastern Switzerland, h. (20 de April de 2016). *Wikimedia Commns*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SBB_-_Derailment_while_track_maintenance_\(25979876903\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SBB_-_Derailment_while_track_maintenance_(25979876903).jpg)



- [10] Kurowski, P. (s.f.). *Finite element análisis for design engineers (Second Edition)*. Sae international.
- [11] Metropolitan Transportation Authority of the State. (19 de July de 2013). *Wikimedia Commons*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metro-North_Freight_Derailment_Recovery_\(9323678660\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metro-North_Freight_Derailment_Recovery_(9323678660).jpg)
- [12] Pérez de la Blanca, A. (s.f.). *Apuntes de clase mef: Cuaderno de prácticas de Simulación Mecánica mediante MEF con Solidworks*.
- [13] Pi.1415926535, h. (30 de Octubre de 2016). *Wikimedia Commons*. Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydraulic_cylinders_under_MBTA_3837_after_derailment,_October_2016.JPG
- [14] Rovira Cardete, A., Roda Buch, A., Lewis, R., & Marshall, M. (2012). Application of Fastsim with variable coefficient of friction using twin disc experimental measurements.
- [15] Talbot, A. (1912). *The Railway Transition Spiral*. New York: ENGINEERING NEWS PUBLISHING CO.
- [16] terrestre, D. d. (Febrero 2022). *Términos ferroviarios*. Departamento de transporte terrestre. Programa de Desarrollo logístico. Subsecretaría de transportes.
- [17] Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia La enciclopedia libre*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>
- [18] Z*Desconocido. (26 de 4 de 2020). *Listado tren*. Obtenido de Listado tren: <https://www.listadotren.es/carac/fichadatos.php?id=274>
- [19] Zienkiewicz, O., & Taylor , R. (1994). *El método de los elementos finitos. Volumen 1. Formulación básica y problemas lineales*. McGraw-Hill, CIMNE.
- [20] Norma Adif Vía (2021). *Diseño y montaje de vía sin balasto para obra nueva (NAV 7-1-0.7)*
- [21] Norma Adif Vía (1991). *Desvíos. Descripción general (NAV 3-6-0.0)*
- [22] Norma Adif Vía (1992). *Desvíos. Características de los tipos y modelos (NAV 3-6-0.1)*



[23] Una Norma Española (2019). *Aplicaciones ferroviarias. Vía. Carriles para fines especiales. Construcción asociada y acanalada.* (UNE-EN 14811)

[24] Reglamento UE (2013). *Sobre la especificación técnica de interoperabilidad relativa al subsistema material rodante - vagones de mercancías» del sistema ferroviario de la Unión Europea.* (Reglamento (UE) N° 321/2013 de la comisión de 13 de marzo de 2013)

ANEXOS

Anexo 1

Las ecuaciones de compatibilidad:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)\end{aligned}\tag{6}$$

Las ecuaciones constitutivas del material, la relación tensión y deformación

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2\mu\varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2\mu\varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2\mu\varepsilon_{zz} \\ \sigma_{xy} &= 2\mu\varepsilon_{xy} \\ \sigma_{yz} &= 2\mu\varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zx} &= 2\mu\varepsilon_{zx}\end{aligned}\tag{7}$$



Las ecuaciones de equilibrio del sistema

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + b_x = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + b_y = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + b_z = 0$$

Anexo 2

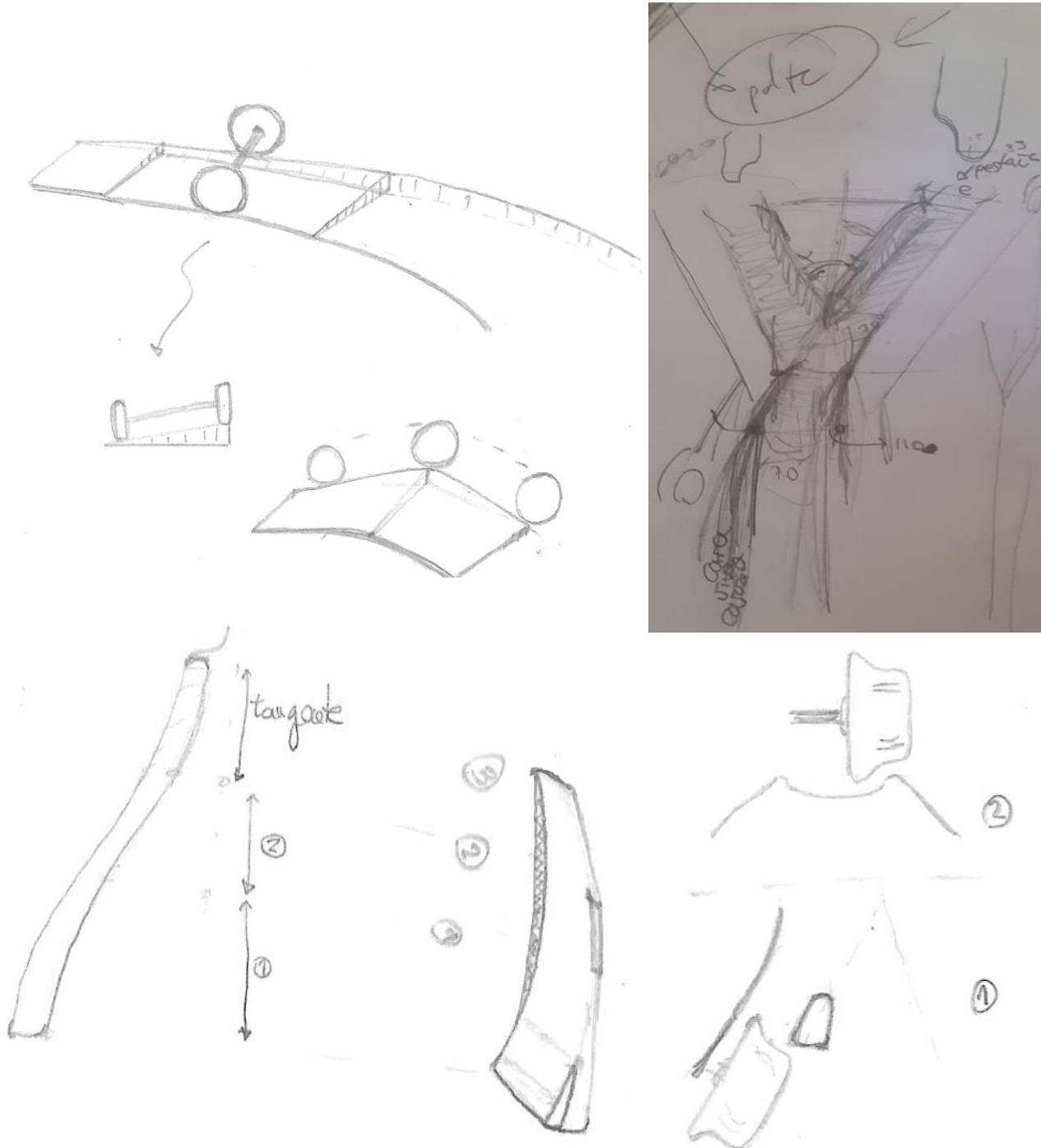


Figura 69. Varios bocetos del desarrollo del diseño

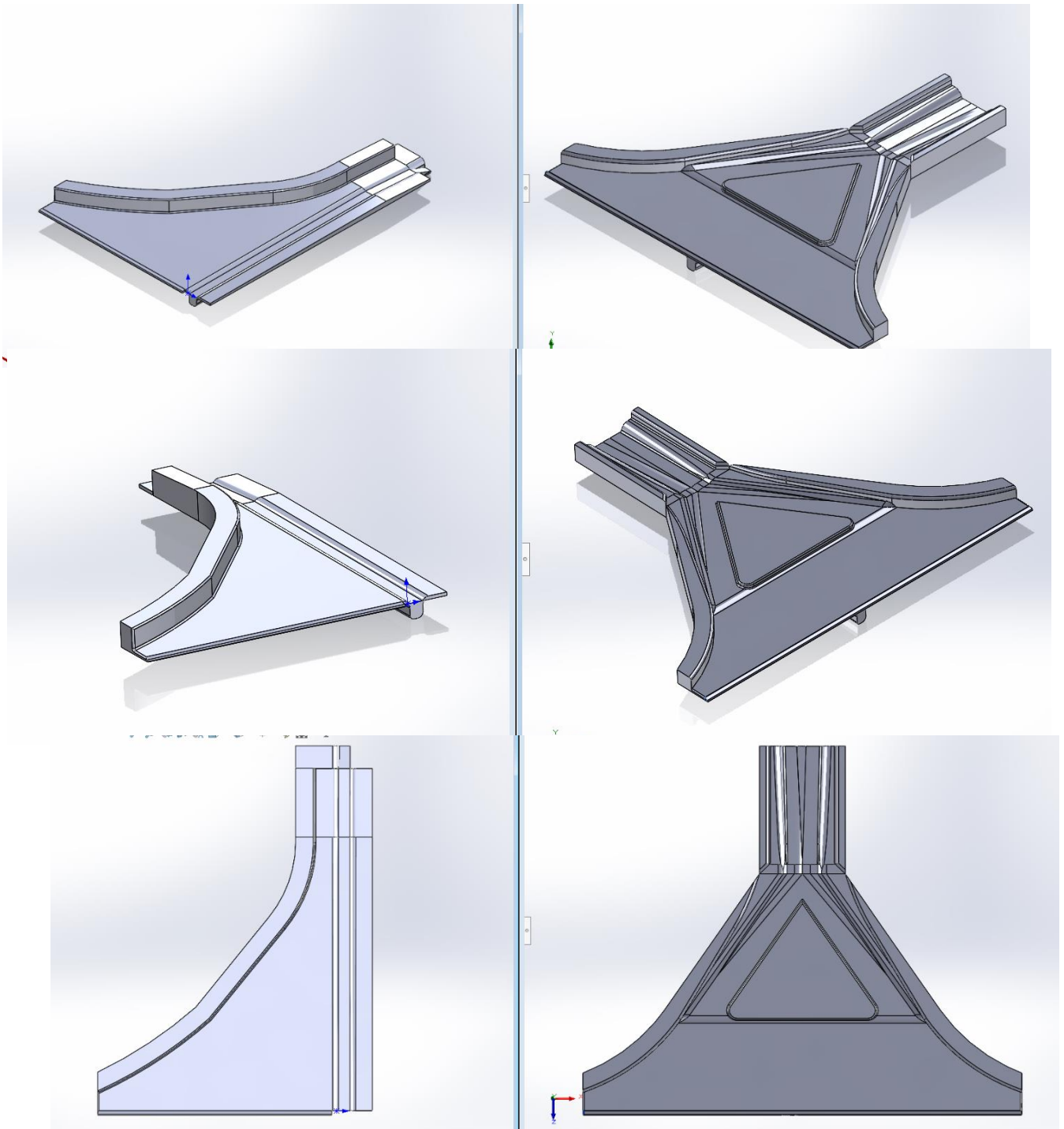


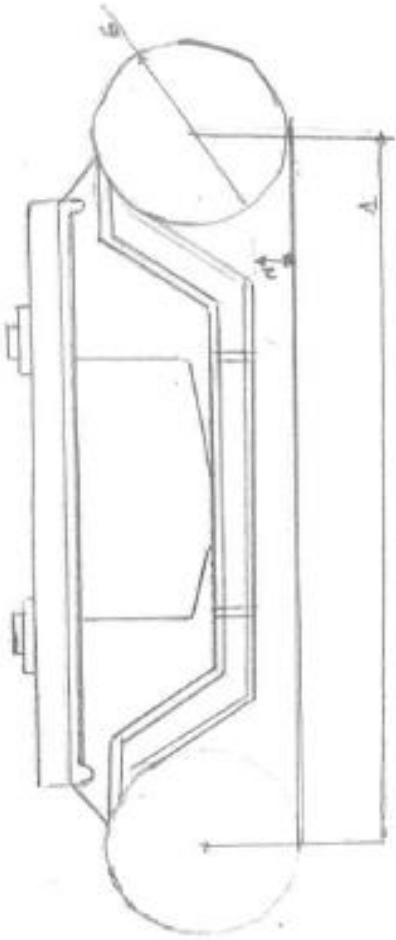
Figura 70. Diseño final

PLANOS

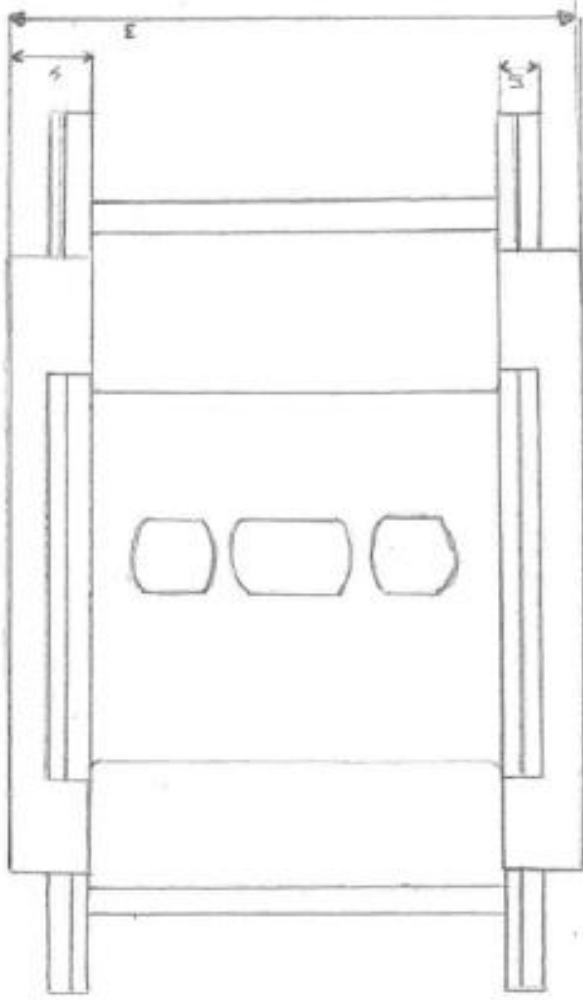


Planos

1. Croquis del bogie motor.
2. Conjunto del dispositivo encarrilador.



| Nº | | (MM) |
|----|------------------------|------|
| 1 | DISTANCIA ENTRE EJE | 1500 |
| 2 | DISTANCIA PATÍN-CARRIL | 13 |
| 3 | ANCHO BOSQUE | 2310 |
| 4 | ANCHO LATERAL | 460 |
| 5 | ANCHO RUEDA | 110 |
| 6 | DIÁMETRO RUEDA | 520 |



Departamento de Expresión
Gráfica, Dibujo y Proyectos

Universidad de Málaga

Curso: 20.../...

Asignatura:

Subgrupo:

Fecha:

Apellidos y nombre:

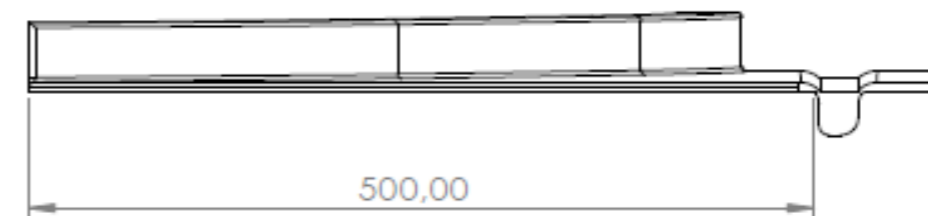
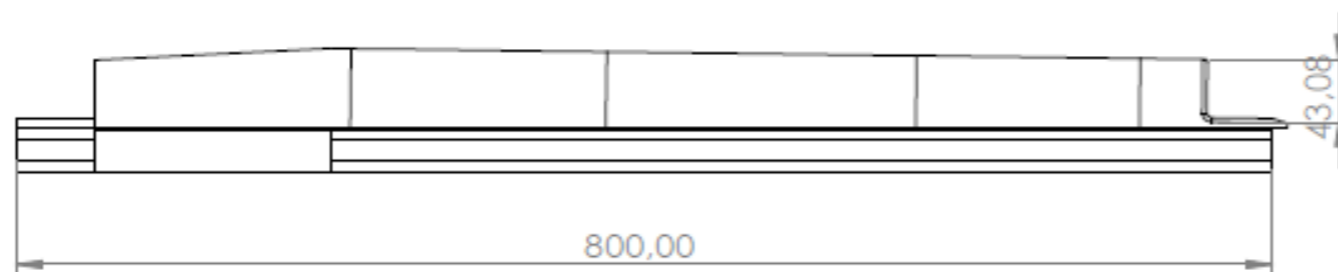
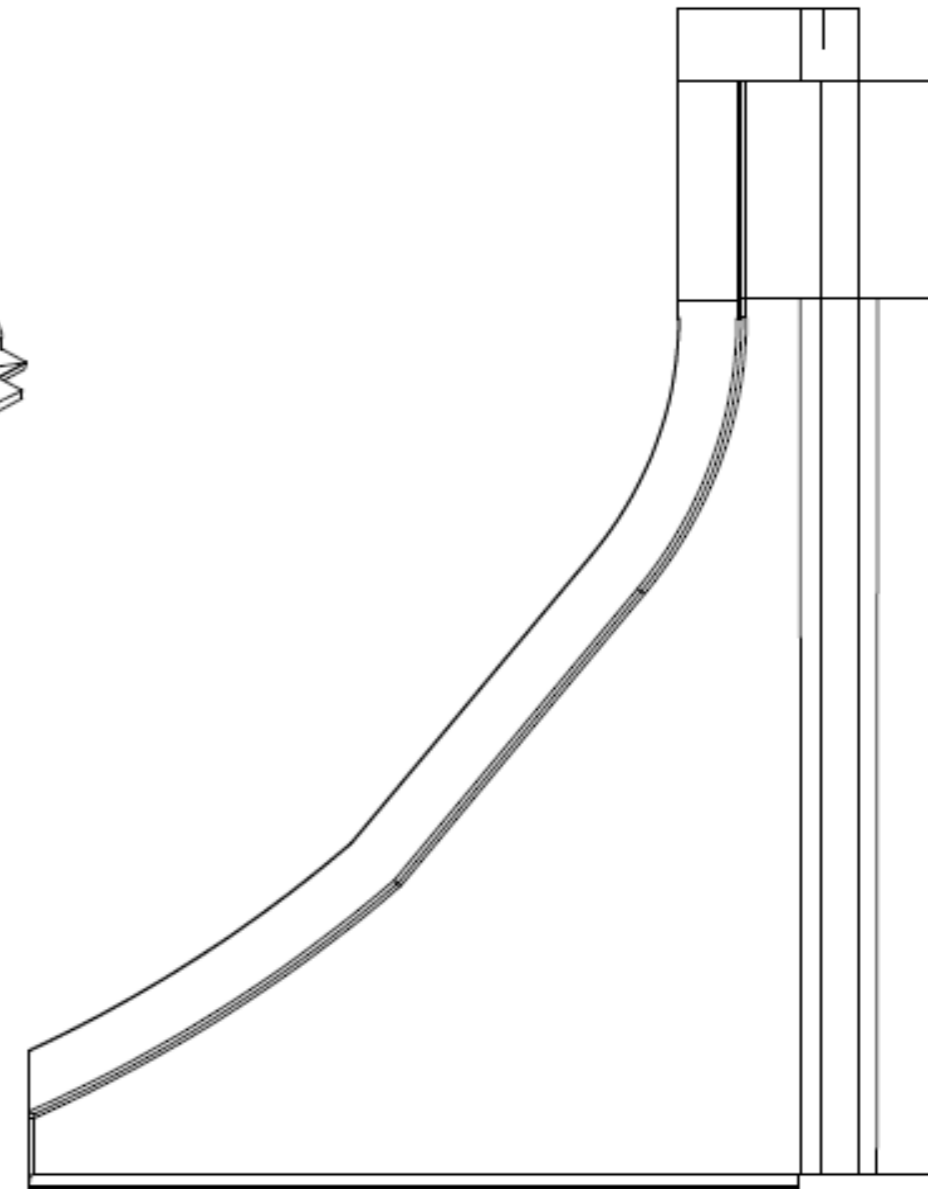
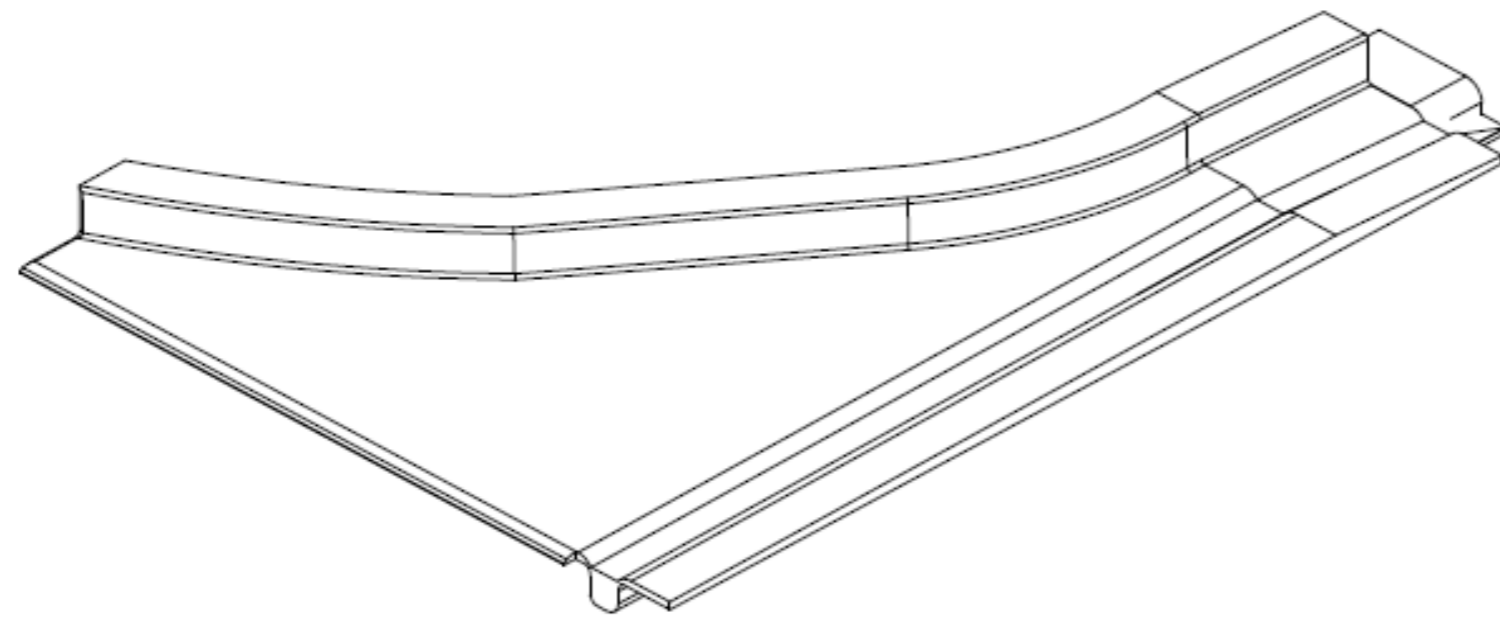
D.N.I.:


TÍTULO: CROQUIS
REMOLQUE MOTOR +
PATÍN

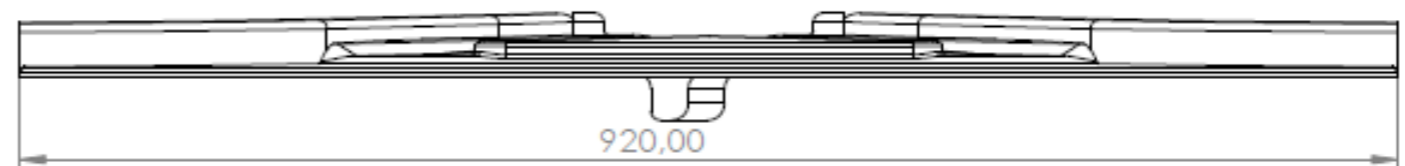
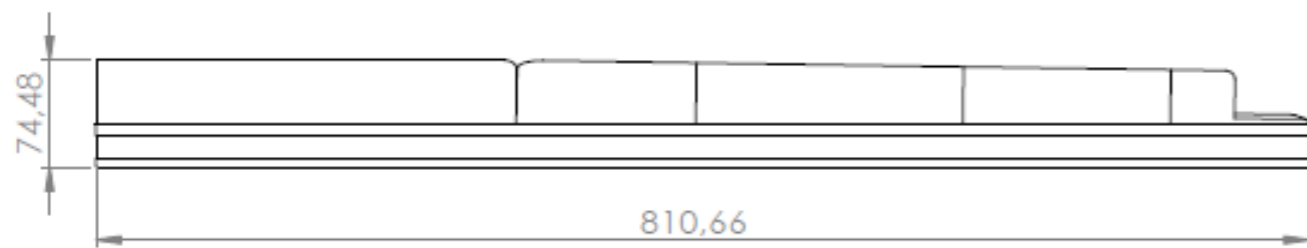
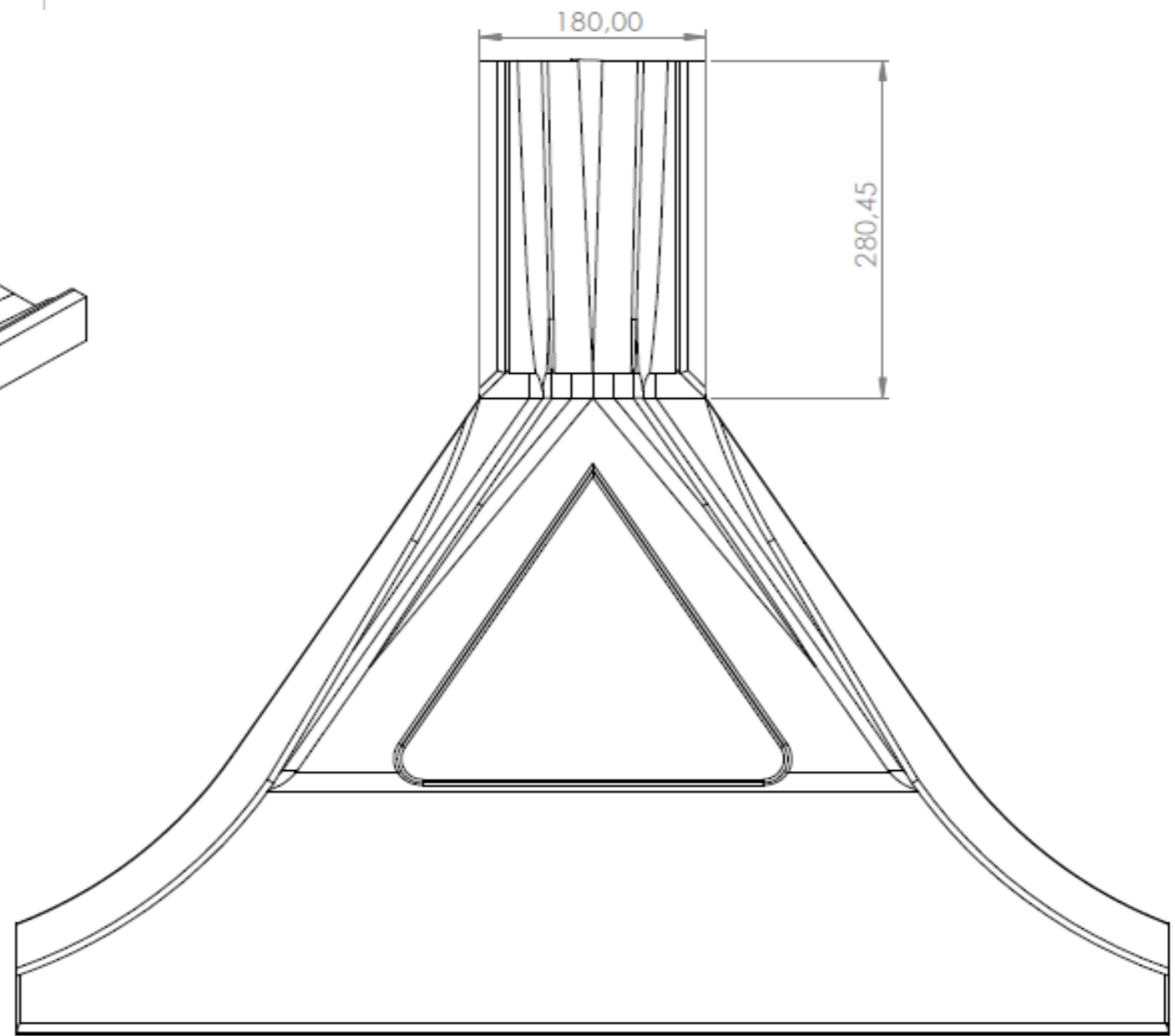
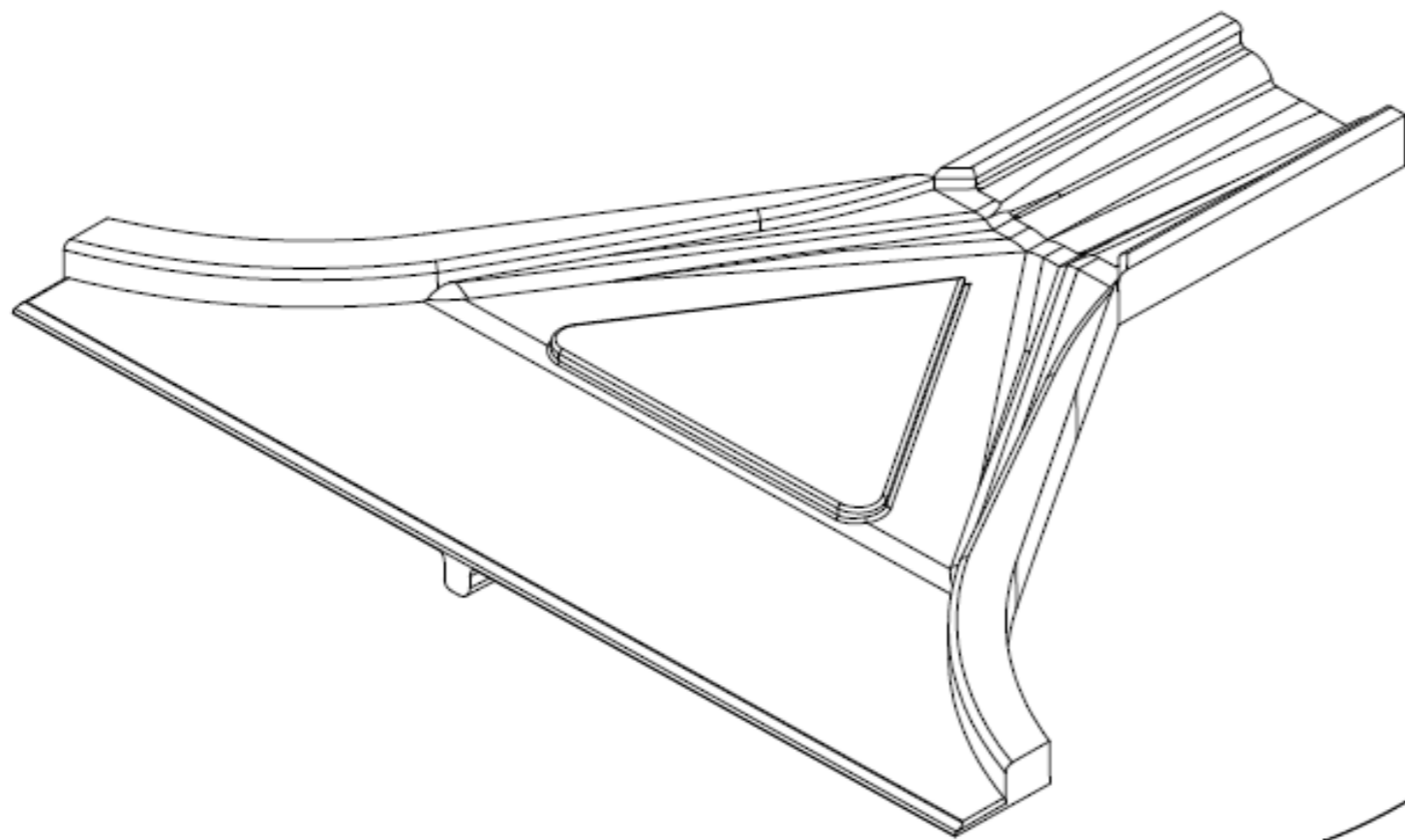
Ejercicio/s nº:


Escala:

Firma:



| | NOMBRE | FECHA | FRMA |  | |
|----------------|---|-------|------|---|---|
| DIBUJADO | AIDA ROMERO QUINTANA | | | | |
| COMPROBADO | SERGIO POSTIGO POZO M BELÉN ESTÉBANEZ CAMPOS | | | | |
| ESCALA 1:50 | TÍTULO: Dispositivo encarrilador | | | N.º DE DIBUJO | 1 |



| | NOMBRE | FECHA | FIRMA |  | |
|------------|--|-------|-------|---|--|
| DBUJADO | AIDA ROMERO QUINTANA | | | | |
| COMPROBADO | SERRGIO POSTIGO POZO M BELÉN ESTÉBANEZ CAMPOS | | | | |
| ESCALA | TÍTULO: | | | Nº DE DBUJO | |
| 1:50 | Dispositivo encarrilador | | | 2 | |