



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO

Alumno: Abdul Rehman Muhammad

Tutor: Prof.D. Javier Fernández Aceituno

Cotutor: Prof.D. Jesús Donaire Ávila

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2021



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Campus Científico – Tecnológico de Linares

Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Javier Fernández Aceituno y Don Jesús Donaire Ávila, como tutor y cotutor, respectivamente, del Trabajo Fin de Grado titulado: Diseño y fabricación de una plataforma de guiado ferroviario con ejes a escala para el análisis de movimiento de lazo; autorizan su presentación para la defensa y evaluación en el Campus Científico – Tecnológico de Linares.

Jaén, noviembre de 2021.

El alumno:

Los tutores:

Muhammad Abdul Rehman

Resumen

A lo largo del siglo pasado se ha estudiado el contacto rueda-carril en la industria ferroviaria ya que es el que más caracteriza la dinámica ferroviaria. Tiene una influencia esencial en la dinámica de estos vehículos y es un componente condicionante en las limitaciones de los sistemas ferroviarios.

Este trabajo fin de grado es resultado del proyecto de innovación docente de la Universidad de Jaén de referencia PIDE002_201920 y titulado *Diseño de una plataforma de guiado ferroviario a escala para el análisis de movimiento de lazo*.

El trabajo se divide en los siguientes puntos:

- Exponer los principales objetivos del proyecto.
- Desarrollar una amplia introducción a la ingeniería ferroviaria.
- Realizar el estudio del contacto rueda-carril.
- Diseñar una plataforma de guiado ferroviario, así como unas ruedas ferroviarias de distintas conicidades para demostrar el comportamiento teórico.
- Plantear un guion de prácticas de laboratorio para ser utilizado en asignaturas relacionadas con la ingeniería ferroviaria.

Abstract

Throughout the last century the wheel-rail contact in the railway industry has been studied since it is the one that most characterizes railway dynamics. It has an essential influence on the dynamics of these vehicles and is a conditioning component in the limitations of rail systems.

This final project is the result of the innovation project of the University of Jaén with reference PIDE002_201920 and entitled *Diseño de una plataforma de guiado ferroviario a escala para el análisis de movimiento de lazo*.

The project is divided into following points:

- Present the main objectives of the project.
- Develop a broad introduction to railway engineering.
- Carry out the study of the wheel-rail contact.
- Design a railway guiding platform, as well as railway wheel with different conicity to demonstrate the theoretical behavior.
- Propose a laboratory practice guide to be used in subjects related to railway engineering.

ÍNDICE

1. Introducción y Objetivos.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	2
2. Introducción a la Vía Ferroviaria.....	3
2.1. Explicación general del ferrocarril	4
2.1.1. La infraestructura	4
2.1.2. Superestructura.....	5
2.1.3. Material móvil.....	6
2.1.4. Electrificación	7
2.1.5. Sistema de control de tráfico	7
2.2. La Vía Ferroviaria.....	8
2.2.1. Características de la vía.....	8
2.2.2. La vía convencional	9
2.2.3. La vía en placa.....	9
2.3. El carril	11
2.3.1. Funciones de Carril	11
2.3.2. Material del carril	12
2.3.3. Tipos de carriles	13
2.3.3.1. Carriles de vientre de pez	14
2.3.3.2. Carril de doble cabeza	14
2.3.3.3. Carril Brunel.....	15
2.3.3.4. Carril de Garganta	15
2.3.3.5. Carril Vignole.....	16
2.4. Rail Pad.....	18
2.5. Las Traviesas	19
2.5.1. Funciones	19
2.5.2. Tipos de Traviesas.....	19
2.5.2.1. Traviesas de madera	19
2.5.2.2. Traviesas metálicas	21
2.5.2.3. Traviesa de hormigón.....	21
2.6. Sujeciones.....	24

2.6.1. Tipos de sujeciones	25
2.7. La Plataforma.....	27
2.8. Las capas de asiento.....	29
2.8.1. Balasto.....	30
2.8.2. Subbalasto	32
2.9. Material Rodante	33
2.9.1. Bogie	34
2.9.1.1. Componentes de un Bogie.....	35
2.9.1.1.1. Chasis	35
2.9.1.1.2. Ejes montados	36
2.9.1.1.3. Rueda	37
2.9.1.1.4. Cajas de grasa.....	40
2.9.1.1.5. Suspensión	41
2.9.1.2. Clasificación de bogie	43
3. Conceptos Teóricos	46
3.1. Conicidad.....	47
3.2. Oscilación Cinemática.....	48
3.2.1. Teoría de Klingel.....	52
3.3. Contacto Rueda-Carril	53
3.3.1. Contacto normal. Teoría de Hertz	54
3.3.2. Contacto tangencial. Teoría de Kalker	55
4. Diseño y Fabricación.....	58
4.1. Introducción.....	59
4.2. El material empleado	59
4.3. Características de la estructura diseñada en este TFG	61
4.4. Cálculos previos.....	62
4.5. Diseño del TFG.....	65
4.5.1. Carril	65
4.5.2. Traviesa	69
4.5.3. Pieza de sujeción	69
4.5.4. Ruedas	70
4.5.5. Eje	72
4.5.6. Pieza de unión para dos ejes.....	73
4.5.7. Ensamblaje	76

4.5.8. Diseño de útiles	77
4.6. Proceso de fabricación	77
4.6.1. Ruedas	78
4.6.2. Eje	86
4.6.3. Traviesas.....	88
4.6.4. Piezas de unión para dos ejes	90
4.6.5. Sujeciones.....	93
4.6.6. Carril	94
4.7. Montaje del proyecto	99
5. Valoración Económica.....	103
6. Resultados.....	105
7. Conclusiones	109
8. Bibliografía	110
9. Anexos.....	111
9.1. Anexos Planos	112
9.2. Anexos Planos de Útiles	125
9.3. Anexo Guion de Prácticas	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Viaducto de Ulla, Boqueixón. Fuente: El Mundo	4
Figura 2.2. Superestructura. [1].....	5
Figura 2.3. Material Remolcado R-594. Fuente: Renfe.....	6
Figura 2.4. Material motor. Fuente: Renfe	6
Figura 2.5. Electrificación y sistema de control de tráfico. Fuente: Itransporte	7
Figura 2.6. Vía convencional. Fuente: Inse Rail	9
Figura 2.7. Vía en placa. Fuente: Mafex	10
Figura 2.8. Túnel el Bolón (Zamora).	10
Figura 2.9. Tipos de carril. [2]	11
Figura 2.10. Interacción del carril y rueda. [3].....	12
Figura 2.11. Resistencia a tracción. [4]	13
Figura 2.12. Carril con vientre de pez. Fuente: Ferrocarriles, Universidad de Cantabria.....	14
Figura 2.13. Carril de doble cabeza.....	14
Figura 2.14. Carril brunel. Fuente: A. Tamayo (2005).....	15
Figura 2.15. Carril de garganta. Fuente: VF Systems.....	15
Figura 2.16. Zonas del perfil de un carril. [4].....	16
Figura 2.17. Carril UCI 60. Fuente: Acelor Mittal	17
Figura 2.18. Placas de Neoprenos. Fuente: Internet	18
Figura 2.19. Vida útil de las traviesas de madera. [5]	20
Figura 2.20. Traviesa Metálica. Fuente: Museo de Ferrocarril de Madrid	21
Figura 2.21. Traviesa de hormigón armado bibloque. [1]	22
Figura 2.22. Traviesa AI04. [2].....	23
Figura 2.23. Traviesa AI04 (Vista superior). [2]	23
Figura 2.24. Traviesa AI04 (Vista alzado). [2].....	24
Figura 2.25. Tipos de Sujeciones. [6].....	25
Figura 2.26. Sujeción Vossloh. [2].....	26
Figura 2.27. Partes de sujeción Vossloh. [2]	26
Figura 2.28. Perfil y plata de sujeción Vossloh. [2]	27
Figura 2.29. Diferentes tipos de capas. [7].....	29

Figura 2.30. Huso Granulométrico del Balasto. [8]	31
Figura 2.31. Máquina de bateo. [1]	31
Figura 2.32. Huso Granulométrico del Subbalasto. [8]	33
Figura 2.33. Bogie de dos ejes. [12]	35
Figura 2.34. Tipos de ejes montado. [9]	37
Figura 2.35. Principales elementos del perfil de una rueda. [9]	38
Figura 2.36. Perfil común en Europa. [9]	38
Figura 2.37. Ruedas monobloque. [9]	39
Figura 2.38. Ruedas con llantas. [9]	39
Figura 2.39. Ruedas ensambladas. [9]	39
Figura 2.40. (a) Rodamiento de dos filas cilíndricas (b) Rodamiento de una fila auto lineada (c) Rodamiento de dos filas cónicas. [9]	40
Figura 2.41. Efecto de la suspensión primaria. [9]	41
Figura 2.42. Suspensión primaria de un bogie. Fuente: Internet	42
Figura 2.43. Suspensión secundaria. Fuente: Internet	42
Figura 2.44. Bogie según el número de ejes	43
Figura 2.45. Bogie no articuladas	43
Figura 2.46. Bogie articulada	44
Figura 2.47. Bogie de barra de suspensión oscilante	44
Figura 2.48. Bogie de resorte.	45
Figura 2.49. Bogie con refuerzo y sin refuerzo	45
Figura 3.2. Eje montado en una curva	47
Figura 3.1. Rueda cónica. Fuente: CAF	47
Figura 3.3. Posición de equilibrio de un eje montado. [12]	48
Figura 3.4. Eje montado en el movimiento de lazo inestable. [12]	49
Figura 3.5. Diferentes tipos de conicidades respecto a su movimiento lateral. [12]	51
Figura 3.6. El movimiento de Klingel. [13]	52
Figura 3.7. Contacto normal y tangencial. [14]	53
Figura 3.8. Contacto Hertziano	54
Figura 3.9. Dos cuerpos bajo contacto normal	55
Figura 3.10. Velocidades en la zona de contacto	56
Figura 3.11. Área de deslizamiento y adhesión	56

Figura 4.1. Centro de mecanizado. EPSL.....	59
Figura 4.2. Torno. EPSL	60
Figura 4.3. Sierra de cinta. EPSL	60
Figura 4.4. Prensa hidráulica. EPSL.....	61
Figura 4.5. Eje montado en una curva [9].	62
Figura 4.6. Escala de la sección superior del carril	65
Figura 4.7. Tramo inicial y final.	66
Figura 4.8. Carril-1.....	66
Figura 4.9. Carril 2.....	67
Figura 4.10. Angulo y radio del carril 2.	67
Figura 4.11. Carril 3.....	68
Figura 4.12. Angulo y radio del carril 3.	68
Figura 4.13. Traviesa.	69
Figura 4.14. Pieza de sujeción.....	70
Figura 4.15. Rueda cilíndrica	70
Figura 4.16. Rueda cónica (1/3).....	71
Figura 4.17. Rueda cónica (1/5).....	71
Figura 4.18. Eje.....	72
Figura 4.19. Eje y rueda posicionado con conicidad positiva	73
Figura 4.20. Eje y rueda posicionado con conicidad negativa.....	73
Figura 4.21. Pieza de unión para dos ejes	74
Figura 4.22. Primera pieza de unión.....	74
Figura 4.23. Segunda pieza de unión	75
Figura 4.24. Tercera pieza de unión	75
Figura 4.25. Ensamblaje-1	76
Figura 4.26. Ensamblaje-2	76
Figura 4.27. Diseño de útiles.....	77
Figura 4.28. Corte de material.....	78
Figura 4.29. Proceso de torneado	79
Figura 4.30. Proceso de simulación de la rueda cilíndrica	80
Figura 4.31. Proceso de simulación finalizada	80

Figura 4.32. Proceso de simulación para la rueda cónica de 1/5	81
Figura 4.33. Simulación de la rueda final de conicidad 1/5	81
Figura 4.294. Proceso de simulación para la rueda cónica de 1/3	82
Figura 4.35. Proceso de corte	83
Figura 4.36. Proceso de taladrado para el eje	83
Figura 4.37. Proceso de desbaste	84
Figura 4.38. Proceso de acabado	84
Figura 4.39. Proceso de taladrado para el ajuste con el eje	85
Figura 4.40. Proceso finalizado para las ruedas cónicas	85
Figura 4.41. Proceso finalizado para la rueda cilíndrica	86
Figura 4.42. Proceso de eliminación del material en la superficie	87
Figura 4.43. Proceso de taladrado	87
Figura 4.44. Eje.....	87
Figura 4.45. Eje con ajuste de dos anillos	88
Figura 4.46. Eje con anillo de retención.....	88
Figura 4.47. Varilla roscada	89
Figura 4.48. Traviesa colocada	89
Figura 4.49. Primera pieza de unión.....	91
Figura 4.50. Segunda pieza de unión	91
Figura 4.51. Tercera pieza de unión	91
Figura 30. Retención de la pieza segunda mediante anilla de retención.....	92
Figura 4.53. Unión de la primera y tercera pieza	92
Figura 4.54. Pieza de unión de dos ejes	92
Figura 4.55. Pieza de sujeción: pendiente a la vía.....	93
Figura 4.56. Pieza de sujeción.....	93
Figura 4.57. Simulación del mecanizado recto de la parte superior del carril	94
Figura 4.58. Simulación del mecanizado recto.....	95
Figura 4.59. Pletina sujeta por los útiles.....	95
Figura 4.60. Proceso de taladrado	96
Figura 4.61. Sistema de plegado	97
Figura 4.62. Sistema de plegado	97

Figura 4.63. Proceso de plegado con prensa hidráulica.....	98
Figura 4.64. Proceso de plegado con prensa hidráulica, vista lateral	99
Figura 4.65. Unión entre traviesa y carril.....	100
Figura 4.66. Unión de dos carriles	100
Figura 4.67. Pendiente al sistema.....	100
Figura 4.68. Unión entre la rueda y carril	101
Figura 4.69. Eje montado	101
Figura 4.70. Pieza de unión para dos ejes montados	101
Figura 4.71. Montaje final del sistema de guiado.....	102
Figura 4.72. Sistema de guiado con eje montado	102
Figura 6.1. Código Matlab del archivo “Klingel movement.m”	105
Figura 6.2. Código Matlab del archivo “ecDAE.m”	106
Figura 6.3. Movimiento de lazo para conicidad 1/3	106
Figura 6.4. Movimiento de lazo para conicidad 1/5	107
Figura 6.5. Movimiento de lazo para conicidad nula	107
Figura 6.6. Movimiento de lazo para conicidad negativa.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Dimensiones de UCI 60. Fuente: Acelor Mittal	18
Tabla 2.2. Categoría de la plataforma y espesor de las capas. [7]	28
Tabla 2.4. Espesor del balasto. [2].....	32
Tabla 4.1. Movimiento (y) de diferentes conicidades.	64
Tabla 5.1. Mano de obra de CNC.....	103
Tabla 5.2. Valoración Económica	104

CAPÍTULO 1

1. Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

El presente proyecto compone el diseño y fabricación de una plataforma de guiado para su análisis de movimiento de lazo, que a su vez ha sido un proyecto de innovación y mejora docente de la Universidad de Jaén, titulado *Diseño de una plataforma de guiado ferroviario a escala para análisis de movimiento de lazo en asignaturas de varios grados y másteres de ingeniería (PMED02_201921)*.

Se verán a modo de introducción los diferentes componentes que está formada la vía ferroviaria, como carriles, traviesas, ejes, etc., así como los componentes que conforman las ruedas del vehículo, que es donde entra en juego el elemento principal para el estudio del movimiento de lazo.

Seguidamente se describe el proceso de fabricación de los distintos componentes que forma la vía ferrocarril.

También se analizan las diferentes teorías del contacto rueda-carril y las teorías del movimiento de lazo, para comprobar los resultados obtenidos con los proporcionados por la teoría de Klingel.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- El estudio del comportamiento dinámico de los ejes ferroviarios rígidos. Base teórica en la actualidad, análisis de conicidad de rueda y mecánica de contacto de rueda-carril.
- Diseño de la plataforma de guiado ferroviario y de los ejes ferroviario a escala, utilizando diferentes tipos de conicidades de ruedas. Es el objetivo principal de este TFG.
- Mecanizar las piezas diseñadas para poder analizar el comportamiento de las diferentes conicidades de ruedas frente a la solución cinemática teórica.
- Por último, proponer un guion de prácticas de laboratorio que pueda utilizarse en asignaturas relacionadas con la ingeniería ferroviaria propias de los grados de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Civil e incluso del Máster en Ingeniería del Transporte Terrestre y Logística.

CAPÍTULO 2

2. Introducción a la Vía Ferroviaria

2.1. Explicación general del ferrocarril

El ferrocarril es un sistema de transporte de viajeros y grandes mercancías, en la cual la interacción del vehículo-vía se realiza a través de elementos metálicos formado por rueda-carril. Se necesitan unas variedades de conjuntos de subsistemas para su funcionamiento. A parte de que el ferrocarril está formado por una carretera, camino y vehículo consta de los siguientes subsistemas:

- La infraestructura.
- La superestructura.
- El material móvil.
- La electrificación.
- El sistema de control de tráfico y señalización.

2.1.1. La infraestructura

Es el conjunto de obras civiles como los túneles, pasos, puentes o terraplenes necesario para la construcción de la plataforma sobre la que va a situarse la vía. Dichas obras se construyen de la misma manera que las carreteras, sin embargo, estas construcciones tienen unas normas específicas. Por ejemplo, la IAPF-11 para puentes de ferrocarril.



Figura 2.1. Viaducto de Ulla, Boqueixón. Fuente: El Mundo

2.1.2. Superestructura

Es el componente que establece el sistema de soporte y guiado del vehículo. Está formado por el carril, las traviesas, sujeciones, balasto y subbalasto.

- El carril es el elemento de guiado del tren.
- Las traviesas tienen como función mantener el ancho de la vía y dividen las cargas en las capas de asiento.
- Las sujeciones mantienen unidos el carril y las traviesas.
- El balasto se encarga de absorber los esfuerzos dinámicos, facilita el drenaje y trasmite las cargas al subbalasto.
- El subbalasto es el material que se constituye la capa de asiento o subbase, sobre la cual se asienta la banqueta de balasto.

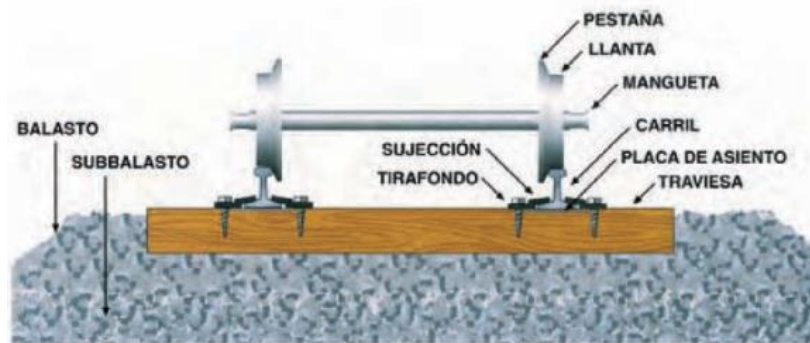


Figura 2.2. Superestructura. [1]

2.1.3. Material móvil

Está formado por el conjunto de vehículos que circulan sobre una vía. Se pueden distinguir el material motor y remolcado.

El material motor son los encargados de tirar el material remolcado. Dentro de este apartado encontramos las locomotoras y los automotores o bogie, que son unidades de tren autopropulsadas. Los automotores realizan conjuntamente la función de tracción y transporte. Están formados por coches, que transportan pasajeros o vagones con tracción propia, aunque actualmente se utiliza más a menudo en los fines del transporte de viajeros.

El material remolcado son los vehículos que se encargan de transportar la carga. En el caso que transporten pasajeros se denominan coches y vagones para transportar mercancías.



Figura 2.3. Material Remolcado R-594. Fuente: Renfe



Figura 2.4. Material motor. Fuente: Renfe

2.1.4. Electrificación

Aunque existen sistemas de tracción a vapor y diésel, lo cuales no necesitan el subsistema de electrificación lo más común son las líneas electrificadas que transportan y distribuyen la corriente eléctrica de tracción. Los elementos básicos son la catenaria, postes de soporte y las subestaciones.

2.1.5. Sistema de control de tráfico

Engloban un conjunto de elementos (señalización, enclavamientos, sistema de ayuda para la conducción, etc.) con el fin de asegurar la circulación de los trenes y evitar el riesgo de accidentes.



Figura 2.5. Electrificación y sistema de control de tráfico. Fuente: Itransporte

2.2. La Vía Ferroviaria

2.2.1. Características de la vía

La vía es el camino del ferrocarril, en la que van a situarse la infraestructura y superestructura. La vía ferrocarril tiene unas ciertas características que son el resultado de la interacción del comportamiento de materiales y de su comportamiento geométrico. Las más importante son:

- Contacto rueda-carril. Con el contacto rueda-carril se concede unas series de características muy peculiares. Algunas ventajas que podemos encontrar son las siguiente:
 - La resistencia al avance es muy pequeña, por lo que no hace falta una gran fuerza para moverlos.
 - La dureza del acero permite cargar elevadas cargas por eje y tienen débil desgaste entre la rueda-carril.

Como desventajas podemos encontrar:

- El bajo coeficiente de rozamiento entre rueda-carril, dan lugar a patinajes o deslizamientos. Para que las ruedas no patinen, se produce una deformación en la superficie del carril y en las propias ruedas, debido a la alta carga normal transmitida entre rueda-carril, se produce una deformación en la superficie, permitiendo la tracción.
- La dureza del acero provoca que el contacto rueda-carril sea muy rígido, provocando grandes choques. Estos choques ocasionan deterioros de la vía y empeoran el confort de las circulaciones.
- El propio peso del ferrocarril es muy elevado. Por lo tanto, a la hora de transportar mayores cargas tendrá que tener en cuenta su propio peso.
- Elasticidad. Pese a la rigidez de los elementos que componen la vía, considerar su flexibilidad es importante para contabilizar las vibraciones inducidas por el paso de los vehículos.
- Continuidad en la geometría. Los fallos en la geometría provocan aceleraciones verticales y horizontales. Así, empeorando las condiciones de circulación, provocando el deterioro de las suspensiones y ocasionan el deterioro mucho antes que una vía con una geometría perfecta. Para garantizar una buena geometría de la vía hay que tener en cuenta unos parámetros: nivelación longitudinal, alabeo de la vía, ancho de la vía, nivelación transversal y alineación.

2.2.2. La vía convencional

La vía convencional está formada por los carriles, las travessías, las sujeciones, el balasto y subbalasto, En los siguientes apartados se incorporan las respectivas descripciones de estas partes. Las funciones fundamentales de estas partes son el soporte a la continuidad geométrica y el guiado del ferrocarril.



Figura 2.6. Vía convencional. Fuente: Inse Rail

2.2.3. La vía en placa

El desarrollo de las líneas de altas velocidades y la utilización de los sistemas de vía en placa ha sido paralela. La vía en placa es una alternativa al balasto respecto al mantenimiento geométrico de una vía de alta velocidad con balasto.

La vía en placa se caracteriza por la sustitución del balasto por un material más rígido (hormigón). Para la utilización de la vía en placa se necesitan unos requisitos necesarios para su diseño e implementación. Por ejemplo, deben realizarse estudios de vibraciones y ruidos, las sujeciones deben ofrecer una elasticidad extra, se deben de utilizar en superficies con asientos mínimos, etc.

La vía en placa presenta una serie de ventajas y desventajas respecto a la vía de balasto. La principal ventaja es la disminución de los gastos de mantenimiento y su mayor inconveniente es su elevado precio de ejecución. Uno de los lugares donde se aplica la vía en placa es en los túneles, donde se tiene una menor altura de la superestructura, en la cual facilita el mantenimiento y optimiza los costes. También se aplica en viaductos en donde disminuye las cargas, en túneles y estaciones.

En una vía de altas de velocidades se pueden aplicar sistemas de vía en placa o balasto, o utilizar una combinación de ambas (figura 2.8). Se deben de realizar estudios económicos donde tengan en cuenta la velocidad de la línea, el tráfico circulante, la calidad del balasto y se estimen el costo de mantenimiento e implantación esperados.

Cada sistema tiene sus particularidades y deben realizarse análisis comparativos para la elección de un sistema en función de las características que se requieran.



Figura 2.7. Vía en placa. Fuente: Mafex



Figura 2.8. Túnel el Bolón (Zamora).

2.3. El carril

El carril es uno de los componentes de la superestructura que llega a soportar directamente el peso de los vehículos, en la cual, surgen acciones dinámicas ocasionadas por la velocidad y el estado de la vía y vehículo. Tienen la función esencial de guiado del vehículo ferroviario, evitando su descarrilamiento o vuelco mediante las pestañas de las ruedas.

Una de las características del carril es su forma y el peso, de la cual da una idea de la calidad de la robustez y la capacidad de resistencia ante las cargas que va a ser sometido a la hora del contacto de rueda-carril. Normalmente el carril está designado por unas características normalizadas por la UIC (Union Internationale des Chemins de Fer). La UIC es una asociación que coopera entre los principales sectores del ferrocarril. Las dimensiones de los tres carriles más habituales de UIC se representan en la figura 2.9.

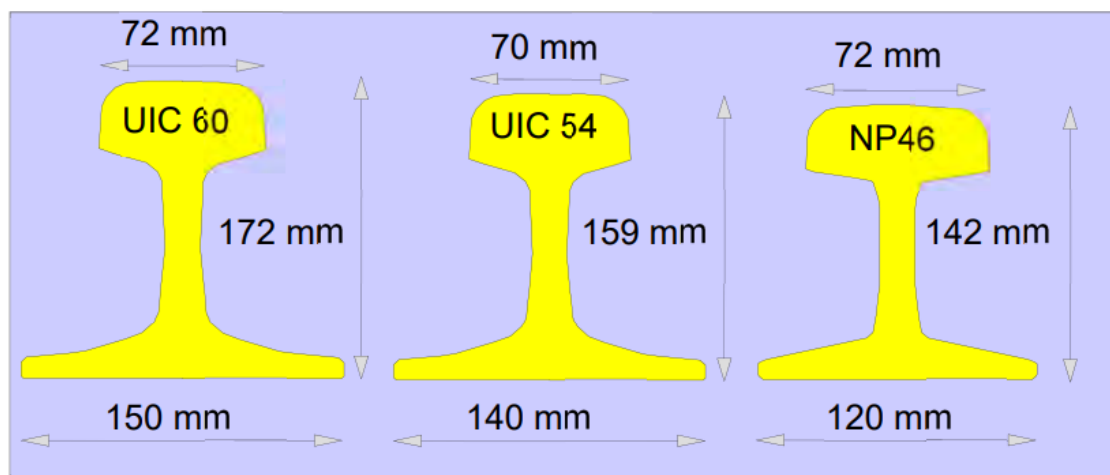


Figura 2.9. Tipos de carril. [2]

Los diferentes tipos de carriles se reconocen por su distinto peso por metro lineal. Para UIC 60, el valor de referencia es 60 kg/m. En general, en España para las líneas de altas velocidades se utiliza el carril UIC 60. Este perfil se montó en la línea de alta velocidad de Madrid-Valencia.

2.3.1. Funciones de Carril

Los diferentes tipos de funciones del carril se describen a continuación:

- El carril resiste, absorbe y transmite los esfuerzos térmicos y esfuerzos recibidos por el material móvil a las traviesas. Los diferentes tipos de esfuerzos que podemos encontrar son los siguientes:

- Las cargas estáticas (producidas por el peso del material), cargas cuasi-estáticas (son cargas producidas por el efecto de la fuerza centrífuga) y las cargas dinámicas (producidas por el movimiento del vehículo o irregularidades de la vía y del material móvil) producen esfuerzos verticales.
 - También pueden aparecer esfuerzos transversales producidos por la fuerza centrífuga y el movimiento de lazo.
 - Los esfuerzos térmicos, debidos al arranque y frenado del vehículo producen esfuerzos longitudinales.
- Unas de las más importantes funciones del carril es el guiado del material. La interacción de la cara y de las pestañas de las ruedas hacen posible el guiado del material.

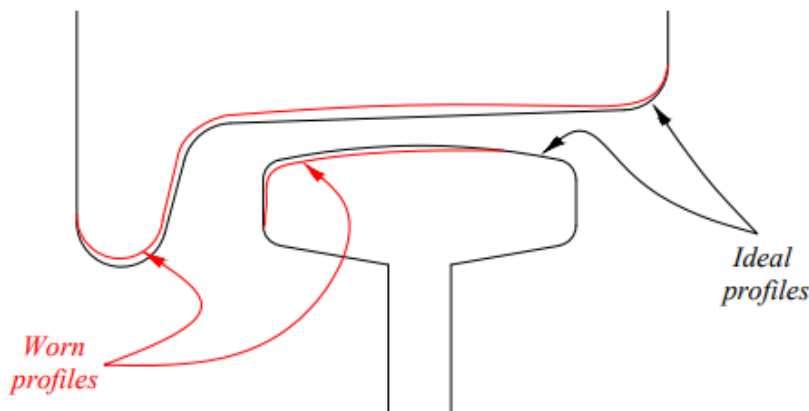


Figura 2.10. Interacción del carril y rueda. [3]

2.3.2. Material del carril

En los inicios del ferrocarril se utilizaba el hierro para la fabricación del carril, pero sufrían gran desgaste y deformaciones. A finales del siglo XIX pasaron a fabricarse con acero que es un material con menor deformación y desgastes, además de comportarse mejor respecto a la corrosión.

El acero es una aleación de hierro y diversos elementos (C, Mn, Si, P, S, Cr), habitualmente el carbono. En la cual, la proporción de estos elementos es importante para obtener una alta resistencia a la abrasión, ausencia de fragilidad, facilitar la soldadura y

un coste aceptable. Un alto contenido del carbono dificulta la soldadura y causa la fragilidad. Por ello se ha limitado el contenido de estos elementos a menos de 0,9%.

- El carbono aumenta la dureza, la resistencia al desgaste y la resistencia a la tracción, pero incrementa la fragilidad.
- El manganeso aumenta la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la tensión y la tenacidad, pero dificulta la soldadura.
- El silicio aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.
- El azufre y el fósforo aumentan la fragilidad, por lo tanto, se limita su contenido, ya que son muy difíciles de eliminar.
- El cromo aumenta la dureza, la resistencia al desgaste y la tenacidad, pero disminuye la resistencia a partir de un cierto porcentaje.

La calidad del carril no solo depende de una buena proporción de aleación, sino también del proceso de fabricación y el cuidado que se haya tenido. La fabricación del carril pretende conseguir aceros tipo perlita-ferrita, para obtener una buena dureza y resistencia a los golpes y desgastes. Normalmente, se verifican la calidad llevando a cabo unos ensayos relacionados a sus características geométricas, composición, peso, resistencia etc.

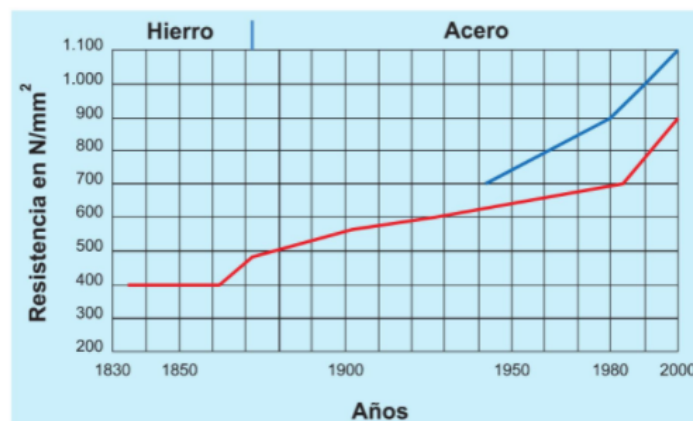


Figura 2.11. Resistencia a tracción. [4]

Podemos observar que durante los años la resistencia a tracción ha aumentado, debido a la composición química del acero (figura 2.11).

2.3.3. Tipos de carriles

El carril a lo largo de su historia ha sufrido variaciones de veces en cuanto a su forma y materiales. A continuación, se describe los diferentes tipos de carriles que han evolucionado durante la época.

2.3.3.1. Carriles de vientre de pez

Los primeros diseños se denominan carriles de vientre de pez, se caracterizan por tener una sección variable. Su sección trataba de ajustar los esfuerzos a los que estaba sometido el carril. La complicidad de su fabricación dio lugar su sustitución por otro tipo de sección.

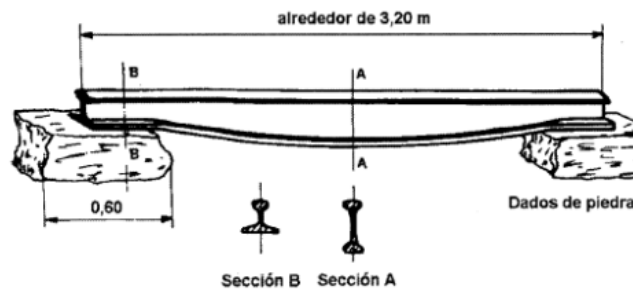


Figura 2.12. Carril con vientre de pez. Fuente: Ferrocarriles, Universidad de Cantabria

2.3.3.2. Carril de doble cabeza

El carril de doble cabeza se ha utilizado en bastantes lugares, se pretendía aprovechar la cabeza inferior, tras el desgaste de la cabeza superior. Pero las deformaciones y desgastes provocados por el contacto con las sujeciones no permitieron la reutilización.



Figura 2.13. Carril de doble cabeza.

2.3.3.3. Carril Brunel

Estos tipos de carriles también se denominan carriles en U. Estos carriles se utilizan en grúas móviles, ya que pueden soportar grandes cargas debido a su sección y se mueven a una velocidad baja.

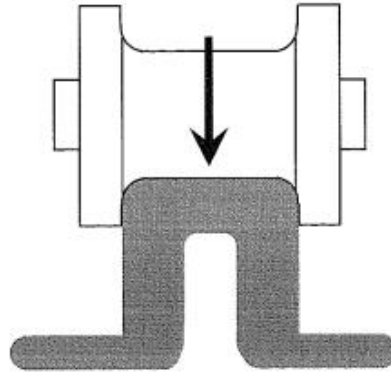


Figura 2.14. Carril brunel. Fuente: A. Tamayo (2005)

2.3.3.4. Carril de Garganta

Es un tipo de carril embebido en el pavimento, por ello es utilizado para los sistemas ferroviarios de tranvías.

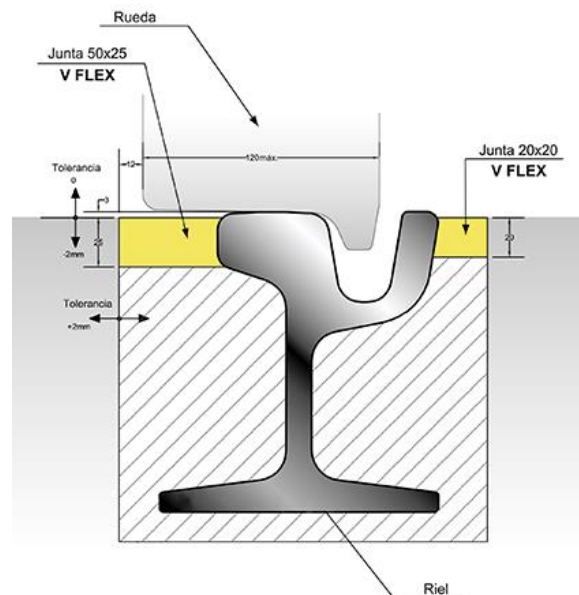


Figura 2.15. Carril de garganta. Fuente: VF Systems

2.3.3.5. Carril Vignole

En la actualidad se utilizan carriles derivados del carril Vignole, el cual está constituido por tres partes, cabeza, alma y patín.



Figura 2.16. Zonas del perfil de un carril. [4]

- Cabeza

Es la parte del carril que está destinada a interactuar directamente con las ruedas del material rodante. Por lo tanto, va a ser la que soporte los esfuerzos producidos por el dicho contacto. La cabeza debe de tener suficientes dimensiones para que el contacto rueda-carril permita el adecuado reparto de cargas, pueda transmitir los esfuerzos al alma y mantenga un margen de desgaste lateral producido en las curvas y un margen de desgaste vertical producido por el efecto del rozamiento.

La anchura de la cabeza debe de estar entre 65 y 72 mm para que el reparto de cargas sea el adecuado. Con unas anchuras inferiores, se tendría una cabeza débil y frágil, mientras que si fuesen mayores se podría provocar desequilibrio de masas.

La altura es aproximadamente de 50 mm, el cual permite un equilibrio adecuado entre la masa del patín y cabeza.

El radio superior de la curvatura, también denominado el bombeo de la parte superior de la cabeza, varía entre 200 y 500 mm. En la figura 2.17 se puede observar que este radio tiene un valor de 300 mm, ya que con este valor se logra un mejor reparto de las tensiones superficiales.

Para que las pestañas de la rueda del material rodante no entren en contacto con las caras laterales de la cabeza, la inclinación de ésta debe ser adecuada. Suele ser de 1:20 evitando de esta forma el desgaste lateral de la pestaña que se produce por el paso de curvas.

La inclinación de las caras inferiores varía entre 1:4 y 1:3, para la facilitación de los radios de acuerdo con el alma.

- Alma

El alma se caracteriza por su espesor, para que sea capaz de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el apoyo de las ruedas. También hay que tener en cuenta que se forman tensiones cercanas a los agujeros realizados para los tornillos de las bridas. Las dimensiones para el espesor varían entre 15 y 17 mm. Los radios de uniones entre alma y cabeza así también para el alma y el patín varían entre 15 y 35 mm.

- Patín

El patín se caracteriza por el ancho, forma y espesor de las alas. Deben de reunir las condiciones de ancho suficientes para el reparto de carga, para evitar el vuelco. La relación óptima que debe cumplir alto/ancho esta entre 1,1 a 1,2.

En la figura 2.17 podemos observar todas las relaciones de medidas de la cabeza, alma y patín. Es el carril UCI 60, el mismo carril que se utiliza para las líneas de alta velocidad. La tabla 1 muestra las dimensiones del carril, su sección y el peso.

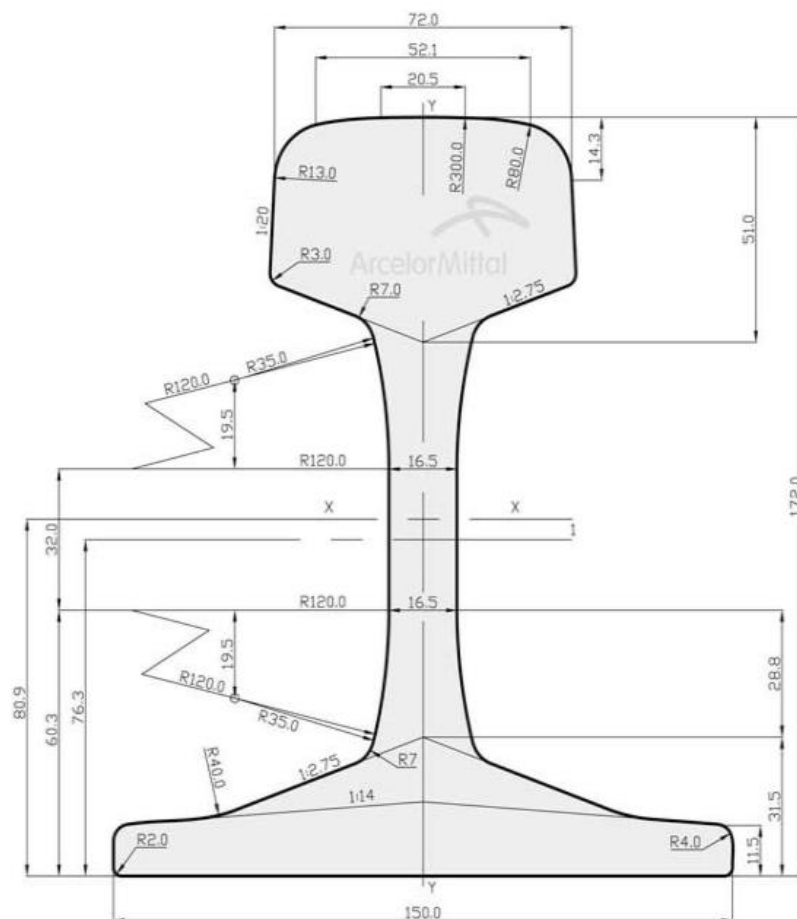


Figura 2.17. Carril UCI 60. Fuente: Acelor Mittal

Tabla 2.1. Dimensiones de UCI 60. Fuente: Acelor Mittal

Tipo de carril	Estándar	Dimensiones mm					Sección S	Masa m
		H	B	C	D	E	cm²	kg/m
European standard EN 13674-1								
60E1 (UIC60)	EN 13674 - 1	172,00	150,00	72,00	51,00	16,50	76,70	60,21

2.4. Rail Pad

Los rail pad son placas de neoprenos que están situados encima de las traviesas y debajo del carril. Se utilizan para aumentar la elasticidad de la superestructura del balasto y reducir golpes y vibraciones en el sistema ferroviario. Las funciones que deben cumplir son las siguientes:

- Reducir el ruido y las vibraciones.
- Iguala las superficies de contacto desiguales entre el carril y traviesa.
- Elimina la concentración de cargas y esfuerzos producidos por la fatiga.
- Distribuye la carga sobre la superficie.
- Reduce el desgaste entre el carril y traviesas.



Figura 2.18. Placas de Neoprenos. Fuente: Internet

2.5. Las Traviesas

Las traviesas son el componente que se colocan en posición transversal a la dirección del eje de la vía, situándose entre el carril y balasto.

La distancia entre las traviesas es regular, pero en el caso de las vías ferroviarias de alta velocidad en España, están a 0,6 m.

2.5.1. Funciones

Las principales funciones de las traviesas son las siguientes:

- Ayuda en el soporte de los carriles, fijando y asegurando su posición, la separación y el mantenimiento de la inclinación 1/20.
- Reciben las cargas horizontales y verticales producidos por el carril, para repartirlas sobre el balasto.
- Conservar la estabilidad de la vía en el plano vertical y horizontal, frente a los esfuerzos estáticos y dinámicos producidos por la circulación de los trenes.
- Evitan la circulación de la corriente eléctrica a la tierra o al entorno debido a la existencia de corrientes parásitas.

2.5.2. Tipos de Traviesas

Las traviesas se agrupan de acuerdo al material de cual están construidas. Encontramos los siguientes tipos de traviesas:

- Traviesas de madera.
- Traviesas metálicas.
- Traviesas de hormigón.

2.5.2.1. Traviesas de madera

Estos tipos de traviesas se han utilizado desde los inicios del ferrocarril. Cada vez se utilizan menos debido a las altas ventajas de las traviesas de hormigón.

Algunas de las ventajas es la flexibilidad que proporciona una rodadura suave y reduce las cargas que se transmiten a la plataforma, debido a su deformación absorbe más energía. Los inconvenientes principales es su envejecimiento durante el tiempo, el deterioro y tiene menor peso con lo que la estabilidad es menor.

En la figura 2.19 se han recogidos datos por Explotaciones Forestales de Renfe de la vida útil de las traviesas de madera instaladas según su especie de madera.

Ningún tipo de madera supera los 20 años de vida útil. A partir de los años 50 para tratar que no se produzcan pudriciones, se ha utilizado la operación de creosota. La creosota es un tratamiento de inyecciones de sustancias antisépticas, evita que se desarrollen los parásitos en la madera. Este método logro alargar la vida útil de la madera. Hay diferentes tipos de especies siendo la más útil la traviesa de roble y de haya.

En la primera mitad del siglo pasado la utilización de las traviesas de maderas era por su facilidad instalación y en aquel momento se desconocía de las propiedades de las traviesas del hormigón. El problema que se encontraba era el cambio de carriles de madera que había que cambiar, debido a su corta vida útil. En la década de los 50 se calculaba un cambio de traviesas de 2 millones al año. Sin embargo, en los años 68 había aumentado la vida útil de las traviesas, por lo que solo había que sustituir 972.000 traviesas al año [5]. Hay que destacar que en los años 68 el número de las traviesas de madera habían reducido y aumentado su vida media.

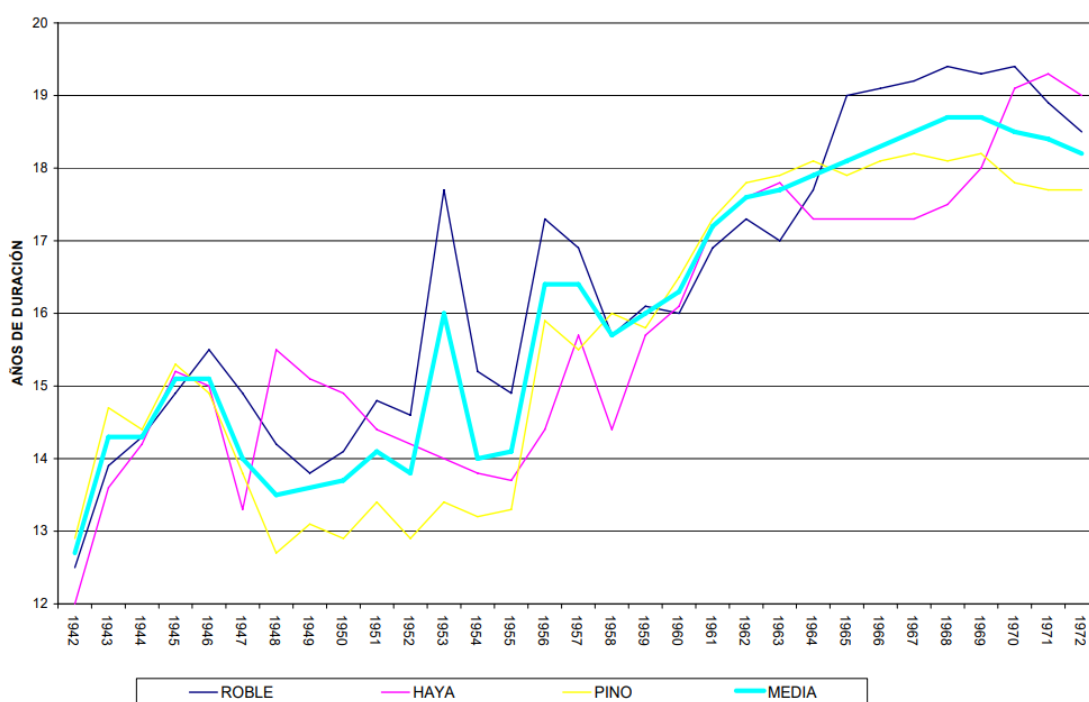


Figura 2.19. Vida útil de las traviesas de madera. [5]

2.5.2.2. Traviesas metálicas

Se pretendía conseguir mayor durabilidad y una vida más resistente que las traviesas de madera, por lo que se ha investigado en nuevos tipos de traviesas. En la cual cambiaba su forma y el material utilizado.

Algunas de las características de las traviesas metálicas es su forma de U invertida, facilita que se claven en el balasto; la instalación es rápida, fácil y barata; el material utilizado para la fabricación es el hierro y el acero; es ligero por lo que aparecen movimientos verticales y aparecen problemas de corrosión.

Este tipo de traviesa no se utilizó de la misma manera que las de madera, debido a su facilidad de corrosión.

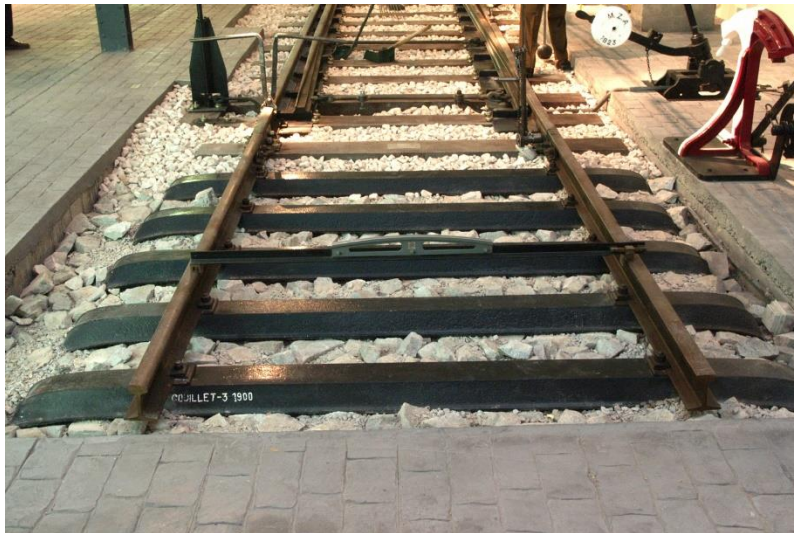


Figura 2.20. Traviesa Metálica. Fuente: Museo de Ferrocarril de Madrid

2.5.2.3. Traviesa de hormigón

Las traviesas de madera y metálicas fueron sustituidas por las traviesas de hormigón, debido a sus mejores propiedades.

Existe varios tipos de traviesas de hormigón, las traviesas de hormigón armado monobloque, traviesas de hormigón armado bibloque y traviesas monobloque de hormigón pretensado.

- Traviesa de hormigón armado monobloque

Estas fueron las primeras traviesas de hormigón, constan de una sola pieza, como unos bloques de gran rigidez. Lo que provoca poca flexibilidad a la vía y hace que no amortigüe con la interacción rueda-carril.

En las zonas del contacto del carril traviesa se compactan con mayor facilidad el balasto, dando lugar a las fisuras en el centro de la traviesa.

- Traviesa de hormigón armado bibloque

Otro tipo de traviesas de hormigón son las de hormigón armado en los extremos, unidos entre sí por un tirante de acero, para evitar tener problemas en el centro de la vía.

Unas de las ventajas es su durabilidad, su fabricación es rápida, fácil y presentan una resistencia lateral aceptable y resistencia longitudinal. En cambio, sus inconvenientes son los siguientes, al tener menor rigidez que las traviesas de monobloque dan lugar a las deformaciones, pueden dar problemas de aislamiento eléctrico, no se pueden utilizar para velocidades mayores de 160 km/h, existe el peligro de corrosión de las riostras, son caras debido a la cantidad de acero empleado y se comportan mal en los descarrilamientos.

Las traviesas de hormigón armado bibloque más utilizadas en España eran el modelo RS. Pero con el aumento de velocidad y de cargas fueron reemplazadas por otros modelos. En la actualidad, se utilizan traviesas BR-94, PB-91 y tipo de Stedef.

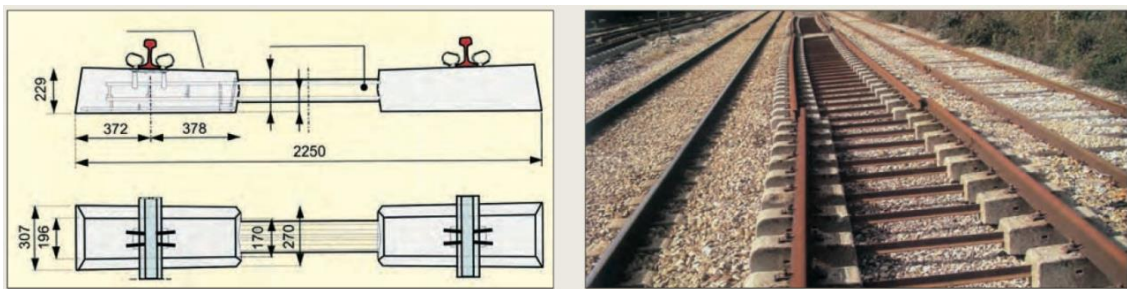


Figura 2.21. Traviesa de hormigón armado bibloque. [1]

- Traviesa monobloque de hormigón pretensado

En este tipo de traviesas consiste tener una superficie de apoyos mayores que en la parte central. De esta forma se consigue menor compactación diferencial del balasto en el centro de la traviesa. Estas dimensiones siempre están dentro de unos límites aconsejables por la normativa. Aparte de tener una disminución del ancho en la parte central, tiene un menor canto estricto. Debido a una acción de pretensado para evitar los problemas de las fisuras.

Las ventajas que encontramos en estas traviesas son las siguientes, proporciona una gran sujeción longitudinal y transversal debido a su peso y dimensiones, mantiene el ancho de la vía correctamente, el pretensado evita las grietas y protege del ataque

húmedo, por lo que, si son útiles de utilizar en ambientes húmedos, se utilizan también en las líneas de altas velocidades y tienen una gran durabilidad, alrededor de 50 años.

Los inconvenientes que presenta es su alto coste de fabricación, requieren de una maquinaria especial para su procedimiento debido a su peso, necesitan mayor espesor de balasto al ser tan rígidas, para tener una flexibilidad adecuada de la vía y disminuir las tensiones y, por último, se utilizan elementos flexibles para los asientos de los carriles y en las sujeciones entre carril y traviesa.

Estos tipos de traviesas se utilizan para las vías convencionales, de alta velocidad, en vía en placa y en ambientes húmedas. Algunos de los modelos que se utilizan en la construcción de líneas nuevas son las traviesas AI-89, MR-93 y PR-90.



Figura 2.22. Traviesa AI04. [2]

La traviesa AI04 son las más utilizadas por el Administrador de Infraestructura Ferroviarias para la utilización en vía de líneas de alta velocidad.

El diseño de esta traviesa se puede mostrar en las siguientes figuras 2.23 y 2.24. Estas traviesas se han utilizado en la línea de alta velocidad de Madrid Valencia.

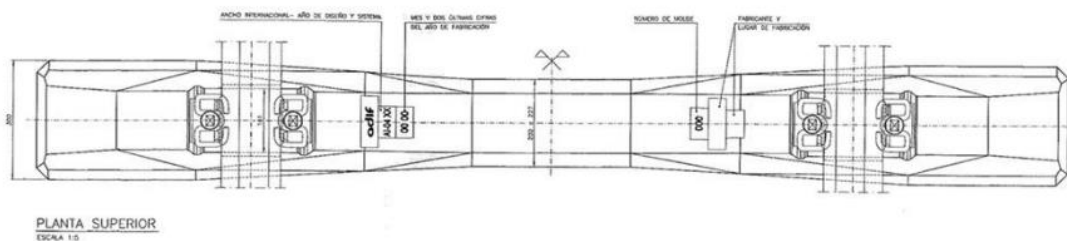


Figura 2.23. Traviesa AI04 (Vista superior). [2]

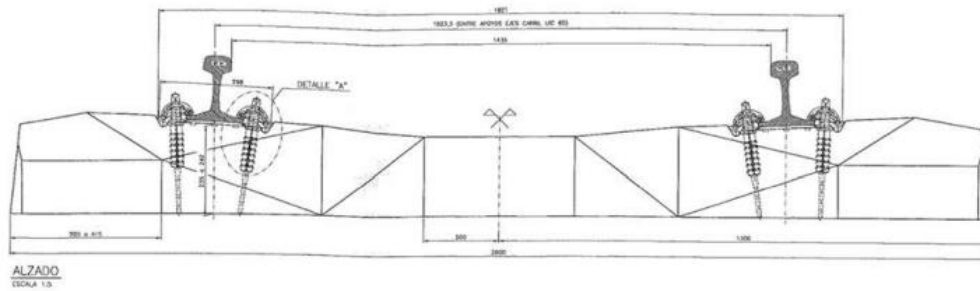


Figura 2.24. Travesía AI04 (Vista alzado). [2]

2.6. Sujeciones

Las sujeciones son el componente que fijan los carriles a las traviesas o al bloque de la vía en placa. Estas presionan el patín del carril para evitar el desplazamiento longitudinal o transversal. En el caso de la vía en placa, las sujeciones deben proporcionar a la vía la elasticidad que proporciona a una traviesa de madera y el balasto, añadiendo un elemento elástico entre traviesa y carril.

Las funciones que deben de cumplir las sujeciones son el impedimento del vuelco del carril, mantener el ancho de la vía, tener la elasticidad adecuada, mantener verticalmente el carril y la traviesa, impedir el desplazamiento de estas, tener el aislamiento necesario para evitar el traspaso de la corriente eléctrica, y, por último, las sujeciones también son responsables de amortiguar vibraciones e impactos.

Las sujeciones según su disposición y elementos existentes se pueden clasificar en tres maneras.

- Directas. Son las sujeciones que proporciona el apriete del carril y en el mismo tiempo el anclaje a la traviesa.
- Indirectas. Estos tipos de sujeciones fijan el carril a una placa de asiento y esta placa se ancla a la traviesa. Para las traviesas de madera estos elementos suelen llamarse cojinetes.
- Mixtas. Se utilizan las dos anteriores maneras. El carril se fija a una placa, y, tanto el carril como la placa se fijan a la traviesa.

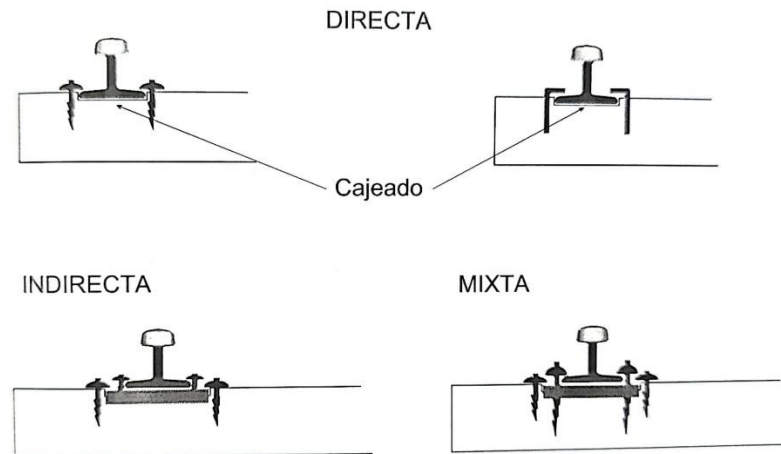


Figura 2.25. Tipos de Sujeciones. [6]

2.6.1. Tipos de sujeciones

Las sujeciones se pueden clasificar en:

- Sujeciones rígidas clásicas.
- Clavos elásticos.
- Sujeciones elásticas de lámina o grapa.
- Sujeciones elásticas de clip.
- Sujeciones de apoyo, con el carril flotante.

Hay que destacar que hoy en día en los ferrocarriles no se utiliza las sujeciones rígidas clásicas ni los clavos elásticos, debido al uso de la vía en placa con barras largas unidas por soldaduras. Para reducir las vibraciones y ruidos se utilizan solamente sujeciones elásticas, como las de clip. Existen muchísimas variedades de sujeciones elásticas de clip, que han ido evolucionando y mejorando durante el tiempo.

Unas de las sujeciones de clip más importante son la sujeción Vossloh (Figura 2.26) y las más utilizadas en España. Es un sistema de sujeción que proporciona elasticidad a la vía. En este sistema el apriete del carril se debe al trabajo de flexión o torsión del clip, se diferencia de otros sistemas por el apriete del tirafondo para obtener la tensión adecuada.



Figura 2.26. Sujeción Vossloh. [2]

En las figuras 2.27 y 2.28 se muestran las partes de una sujeción de clip, en este caso de Vossloh.

El carril se coloca sobre la placa base, para que la distribución de la carga se pueda repartir sobre la traviesa, el método de sujeción se basa en el apriete con unos tirafondos que se introducen en las traviesas, estos trabajan solamente a tracción. Las placas acodadas y la placa intermedia son una separación entre los componentes metálicos y hormigón.

Una de las características de este tipo de fijación es la posibilidad de regular la nivelación y la alineación de la vía, utilizando los espesores de las placas respetando el rango de compensación.

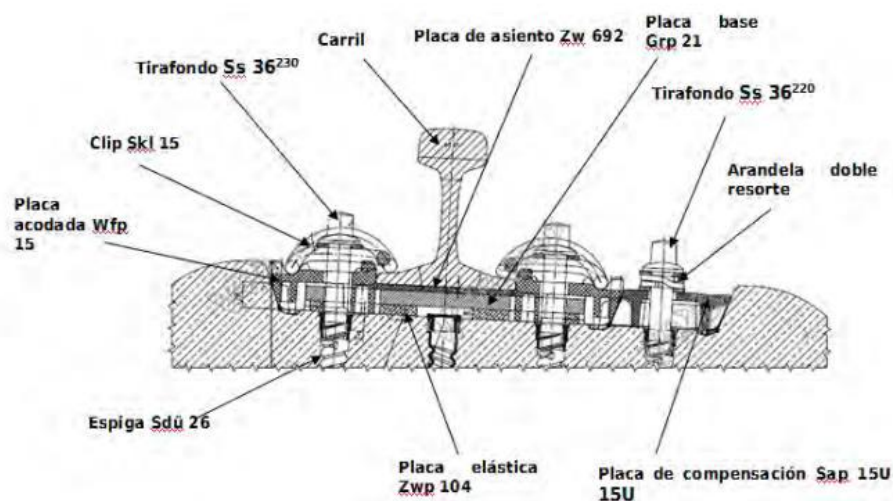


Figura 2.27. Partes de sujeción Vossloh. [2]

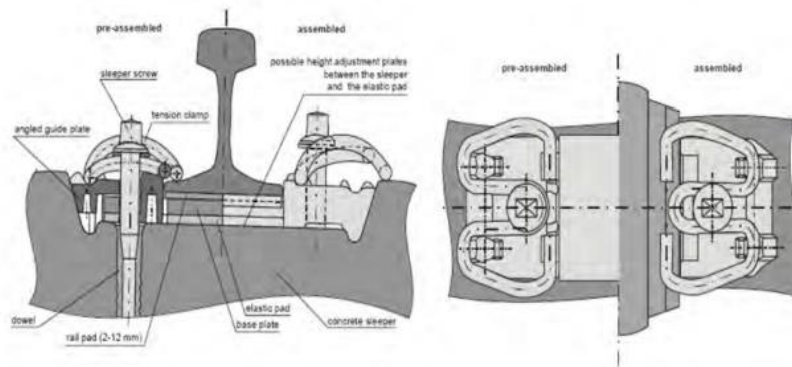


Figura 2.28. Perfil y plata de sujeción Vossloh. [2]

2.7. La Plataforma

La plataforma es el sistema construido sobre el terreno que soporta la vía, capas de asiento y los diferentes dispositivos utilizados para los fines del ferrocarril. Dicha plataforma debe soportar todos tipos de esfuerzos producidos, tanto estáticos o dinámicos. Debe asegurar la evacuación de las aguas pluviales mediante las pendientes transversales.

La plataforma puede estar formada por el propio terreno o se necesitan de unos suelos de aportación. Para los túneles, puentes, viaductos, etc., se utilizan plataformas rígidas construidas por obras de fábrica. La última capa de la plataforma se apoda capa de forma, es la que va a soportar mayores esfuerzos. Por lo tanto, está formada por un grado mayor de capacidad portante a la plataforma. La capa de forma siempre debe tener un espesor mínimo de 30cm y su correcta ejecución, debido a que su comportamiento es fundamental para el conjunto de la vía.

En la tabla 2.2 se muestran los diferentes tipos de categorías que el suelo puede clasificarse según su funcion de calidad, dichas categorías vienen dadas por UIC. Hay que destacar que estas calidades tienen en cuenta la naturaleza geotécnica del suelo y las condiciones hidrogelógicas locales.

- QS0

Suelos inadecuados y difícilmente mejorables para facilitar el terreno de las capas de asiento, lo cual son eliminados.

- QS1

Son suelos malos, pero mejores que QS0, tienen un 40% de arcilla o limos. Se pueden aprovechar cuando se tiene un buen drenaje, añadiendo aditivos.

- QS2

Son suelos favorables, con un contenido del 5 al 15% de finos. Estos suelos pueden contener rocas de menor dureza.

- QS3

Suelos buenos, con una capacidad inferior del 5% de finos y rocas duras.

Tabla 2.2. Categoría de la plataforma y espesor de las capas. [7]

Explanada (superficie del terraplén o excavación)		Clase de plataforma por su capacidad portante	Requisitos de la capa de forma		
Clase de calidad de suelos	CBR ^a (mín) ⁽¹⁾		Clase de calidad de suelos	CBR ^b (mín)	Mínimo espesor: "e _f " (m)
QS 1	2	P 1	QS 1	2	⁽²⁾
		P 2	QS 2	5	0,50
		P 2	QS 3	17	0,35
		P 3	QS 3	17	0,50
QS 2	5	P 2	QS 2	5	⁽³⁾
		P 3	QS 3	17	0,35
QS 3	17	P 3	QS 3	17	⁽⁴⁾

La capacidad de la plataforma viene reconocida por la calidad y espesores de los suelos que la componen. Los diferentes tipos de clases son los siguientes:

- P1

Plataforma de mala capacidad portante.

- P2

Plataforma de capacidad portada media.

- P3

Plataforma de capacidad portada buena.

Para nuevas obras, se pretenderá disponer de una plataforma con capacidad alta. Como objetivo de tener un menor espesor de balasto y subbalasto. En algunas condiciones se podrá admitir la capacidad de plataforma P1 y P2, teniendo en cuenta los estudios justificativos de la tabla anterior (tabla 2.2).

2.8. Las capas de asiento

Las capas de asiento son un conjunto de capas que se establecen entre la traviesa y la última capa, denominada capa de forma.

La organización de esta capa es la siguiente:

- Banqueta de balasto

En esta parte se va a disponer la estructura principal, en la cual van a situarse las traviesas, carriles y sujeciones.

- Subbalasto

Es la capa colocada debajo de la capa de balasto, por lo tanto, las exigencias son menores que la capa de balasto.

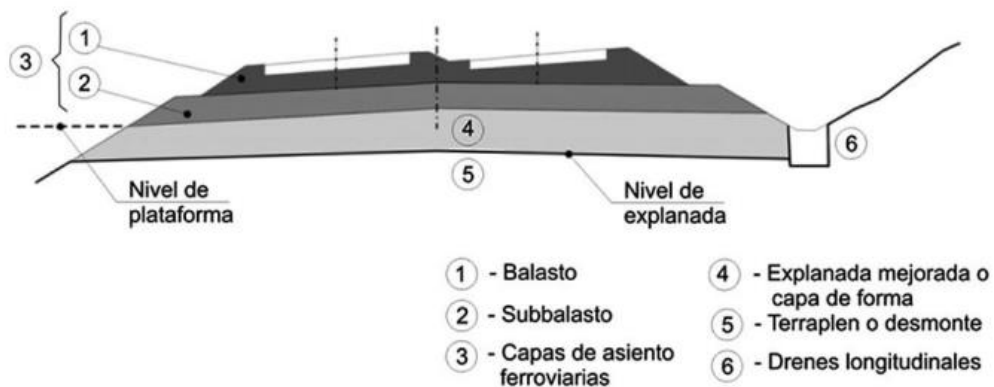


Figura 2.29. Diferentes tipos de capas. [7]

Las funciones de las capas de asiento son:

- Repartir y ceder las cargas obtenidas de la traviesa a la plataforma.
- Amortiguar el movimiento de los trenes sobre el armado de la vía.
- Facilitar la evacuación del agua y proteger a la plataforma de las heladas.
- Impedir movimientos longitudinales y transversales de la vía.

2.8.1. Balasto

Es una de las capas de asiento que está colocada bajo las traviesas. Fomenta un papel importante en el comportamiento de una vía bajo acciones verticales y transversales, aparte frente a las acciones climáticas.

Las funciones que debe cumplir el balasto son las siguientes:

- Proporcionar la elasticidad y amortiguamiento a la vía. La energía de vibración se disipa con el rozamiento de las partículas que forma el balasto.
- Repartir uniformemente sobre la plataforma las cargas recibidas y disminuir el nivel de presiones para evitar que supere su capacidad resistente.
- Facilitar la evacuación del agua de las lluvias.
- Permitir mantener la calidad de la vía y la estabilidad, para una rodadura suave de vehículos.

Para el cumplimiento de estas funciones, es necesario poseer unas ciertas características del material utilizado para el balasto.

- Naturaleza del balasto

Las rocas que se utilizan para el balasto deben de ser homogéneas y no tengan la facilidad de descomponerse como las pizarras o rocas areniscas. Estas rocas deben de presentar buen comportamiento ante la oxidación y de los ataques químicos del agua. Por ello las rocas utilizadas para fabricación del balasto deben de ser rocas duras y tenaces para soportar elásticamente las cargas de impacto transmitida por las traviesas. Estos tipos de rocas son rocas ígneas y metamórficas, como el granito, cuarcita, basalto etc.

- Granulometría

La curva de granulométrica del balasto debe estar comprendida entre 20 mm y 60 mm. En la figura 2.30 se muestra el huso granulométrico del balasto de categoría A según la normativa europea. Una buena granulometría logra que las partículas pequeñas ocupen los huecos que quedan entre las partículas grandes. Para esto se utiliza el método de bateo, que consiste un proceso de compactación del balasto mediante vibraciones (figura 2.31).

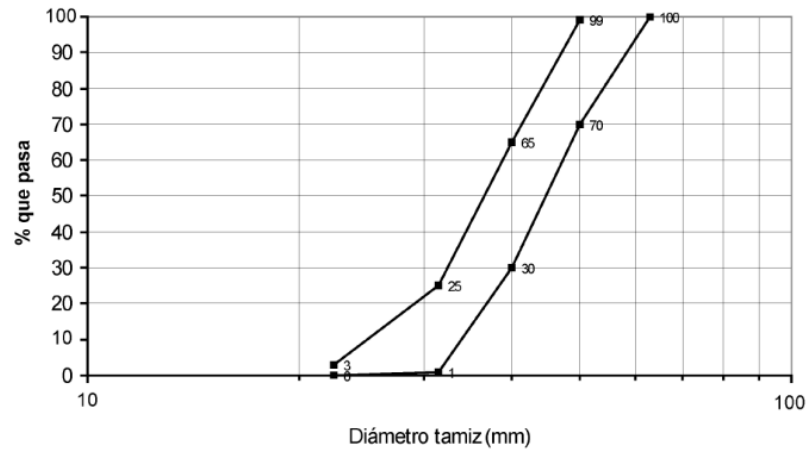


Figura 2.30. Huso Granulométrico del Balasto. [8]



Figura 2.31. Máquina de bateo. [1]

- Forma geométrica

Las partículas del balasto tienen que tener una sección transversal trapezoidal, para tener mayor rozamiento y que exista una buena trabazón entre las partículas, que garanticen la estabilidad de la vía.

- Dureza y resistencia

En los elementos del balasto existen aristas vivas, para que perduren estas aristas se exige que los áridos poseen una determinada dureza a compresión y una gran resistencia al desgaste. Esta resistencia al desgaste viene dada por el coeficiente de desgaste de Los Ángeles, suele ser inferior a 19.

El espesor mínimo que debe tener la capa de balasto, varía dependiendo de la velocidad máxima de circulación en la línea ferroviaria. Hay que destacar, que existen vehículos ferrocarriles que no alcanzan las velocidades que aparecen en la tabla 2.3, por lo tanto, el mínimo espesor del balasto es 30 cm.

Tabla 2.4. *Espesor del balasto.* [2]

REDES	Velocidad de explotación km/h	Espesor mínimo de balasto bajo travesía
TGV SUDESTE SNCF FRANCIA	300	35 cm
TGV ATLÁNTICO	300	35 cm
TGV NORTE DE EUROPA	300	35 cm
LYON – VALENCE	300	35 cm
INTERJUNCTION	300	35 cm
TGV MEDITERRÁNEO	300 / 350 / +	35 cm
ICE HANNOVER-WÜRZBURG DGAB ALEMANIA	250 / 280	35 / 40 cm
ICE MANNHEIM STTUTGART DGAB	250 / 280	35 / 40 cm
EUROSTAR LONDRES-TÚNEL BAJO LA MANCHA-BRETAÑA (parte EBBSFLEET-LONDRES-WATERLOO)	270	35 cm
SHINKANSEN TOKYO-OSAKA JR CENTRAL JAPÓN	250	30 cm
DIRETÍSSIMA FS ITALIA	250	35 cm

2.8.2. Subbalasto

Es la capa que se sitúa entre el balasto y la plataforma, presenta unas exigencias menores que el balasto. Está formada por una grava de arena graduada, con algunos componentes finos que sean fácilmente compactible.

Las funciones que desempeña esta capa son las siguientes:

- El subbalasto protege a la plataforma del punzonamiento, producido por el balasto.
- Protege a la plataforma de los efectos de las heladas y de la erosión del agua.
- Repartición mejor de las cargas transmitidas sobre la plataforma.

Por último, el espesor del subbalasto depende de las características del suelo, características geológicas del lugar y de las condiciones climáticas.

La figura 2.32 muestra el huso granulométrico del subbalasto. Se puede ver que es bastante pequeño que el huso granulométrico del balasto.

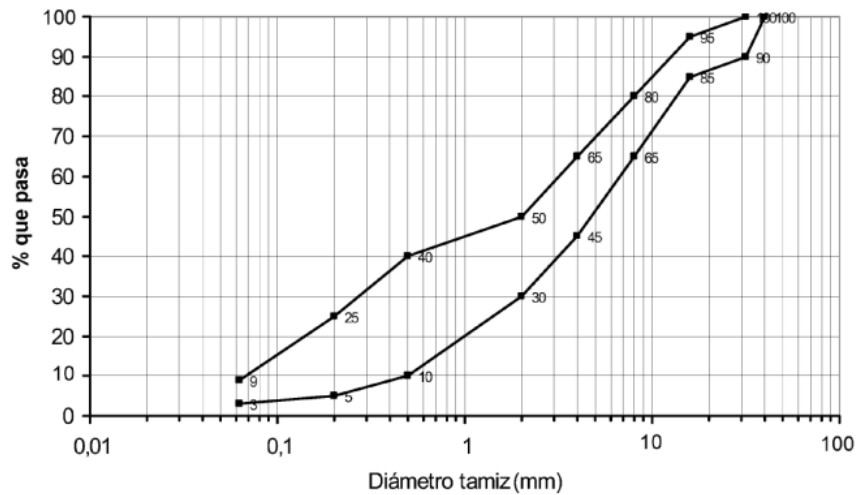


Figura 2.32. Huso Granulométrico del Subbalasto. [8]

2.9. Material Rodante

El material rodante es el sistema que facilita al vehículo un movimiento seguro durante su viaje a lo largo de las vías de tren.

Los diferentes tipos de componentes del material rodantes son el juego de ruedas con cajas de grasa, la suspensión elástica, los frenos, la unidad de tracción y los dispositivos de transmitir las fuerzas de tracción y frenado a la carrocería del automóvil.

Los vehículos ferroviarios dependiendo del material rodante pueden estar compuestos por bogies o no. Los componentes como las suspensiones, frenos y el equipo de tracción en vehículos sin bogie están montados en la carrocería del vehículo. La fuerza de tracción y frenado se transmiten a partir de las cajas de ejes guías.

Una de las diferencias más importante entre los vehículos ferroviarios con bogies y sin ellas, es que las fuerzas que se generan en curvas cerradas son mayores para vehículos convencionales de dos ejes o vehículos sin bogie, por lo tanto, su longitud es limitada. En la actualidad, la mayoría de los vehículos ferroviarios incorporan bogie.

2.9.1. Bogie

El bogie es un material rodante montado en un bastidor independiente que puede girar en relación con la carrocería del vehículo. Los tipos de bogies más comunes son de dos ejes, pero también se encuentran de tres y cuatros ejes, utilizados a menudo en locomotoras.

Anteriormente, los bogies simplemente permitían que el material rodante girara en un plano horizontal relativo a la carrocería. Esto daba la posibilidad de algunos ataques en las ruedas. Es decir, al no tener un giro en el eje transversal, en determinadas curvas se producían desgaste entre la ruedas y carril. En los bogies modernos, el bastidor transmite todas las fuerzas longitudinales, horizontales y verticales entre el cuerpo del vehículo y ejes montados.

Las funciones principales son las siguientes:

- Transmitir los esfuerzos producidos por las cargas verticales de las ruedas del vehículo a la vía del carril.
- El guiado del vehículo a lo largo del camino.
- Asegurar el control del trayecto mediante la absorción de las vibraciones generadas por las irregularidades de la vía y disminuir los impactos de las fuerzas generadas por la fuerza centrífuga cuando el tren circula en curvas a alta velocidad.
- Minimizar las oscilaciones excesivas a partir de los sistemas de amortiguadores.
- Aplicación de fuerzas de tracción y frenado.

Los vehículos con bogie son normalmente más pesados que los vehículos de dos ejes, en cambio, el diseño del vehículo ferroviario con bogies es más simple que el de los vehículos de dos ejes, proporcionando mayor fiabilidad y un mejor mantenimiento.

Los diferentes componentes de un bogie se muestran en la figura 2.33.

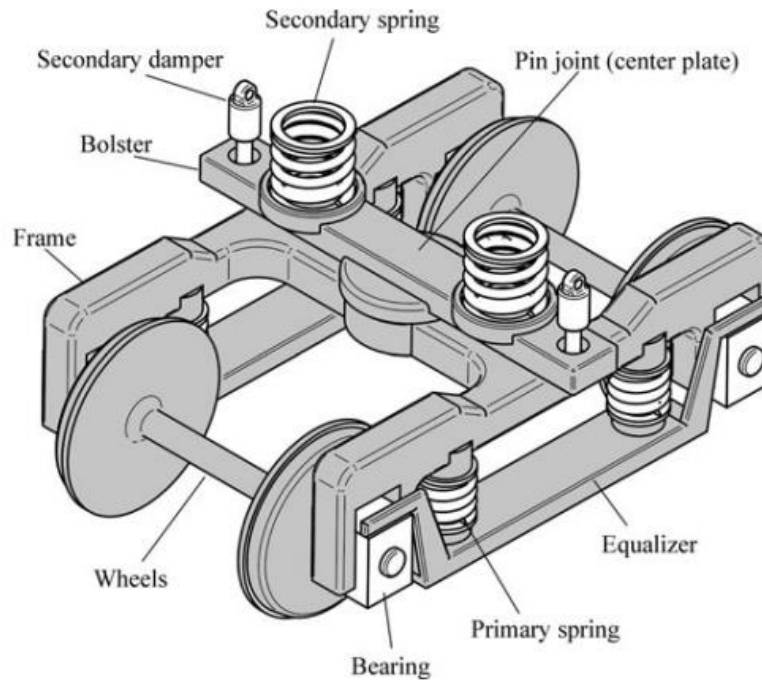


Figura 2.33. Bogie de dos ejes. [12]

2.9.1.1. Componentes de un Bogie

2.9.1.1.1. Chasis

El chasis o bastidor tiene la función de acoplar distintos equipos de bogie, como pueden ser los ejes montados, equipo de suspensión, caja de grasas, la transmisión, dispositivos de frenado y las ruedas.

Existen chasis de bogies con doble etapa de suspensión, que son utilizados para el transporte de personas. Pero la mayoría de los chasis poseen una sola etapa de suspensión, situada entre la caja de grasas y entre el chasis y el cuerpo del vagón. Tanto para el primer método o el segundo, se pretende conseguir un aislamiento del exceso de las vibraciones que se producen durante el movimiento.

El bastidor de un bogie consiste de dos chasis laterales que están unidos mediante muelles helicoidales y un sistema de suspensión central. El cuerpo del vagón está unido al chasis mediante un plato central plano y soportes laterales rígidos. El chasis lateral está apoyado en los ejes montados.

2.9.1.1.2. Ejes montados

Se denomina eje montado al conjunto de un eje y sus dos ruedas. El eje montado es soportado por los rodamientos del eje.

El eje montado concede:

- La distancia necesaria entre el vehículo y la vía.
- La orientación que determina el movimiento dentro del ancho de la vía, incluso durante la curvas y cambio de vía.
- Los medios para transmitir la tracción y la fuerza de frenado a los carriles para acelerar y decelerar el vehículo.

El diseño del eje montado depende de unas ciertas características:

- Por el tipo de vehículo, puede ser motor o remolque.
- Por el diferente tipo de sistema de frenado (zapata de freno, disco de freno en el eje o disco de freno en la rueda).
- La construcción del centro de la rueda y la posición de los rodamientos en el eje, que pueden estar dentro o fuera.
- La necesidad de recortar las fuerzas de alta frecuencia utilizando elementos elásticos entre el centro de la rueda y el perfil de rodadura.

Los principales tipos de diseño de los ejes montados se muestran en la figura 2.34. A pesar de tener muchas variedades de diseño, todos los ejes montados tienen unas características en común, la unión rígida entre las ruedas y el eje, y el perfil de la selección transversal.

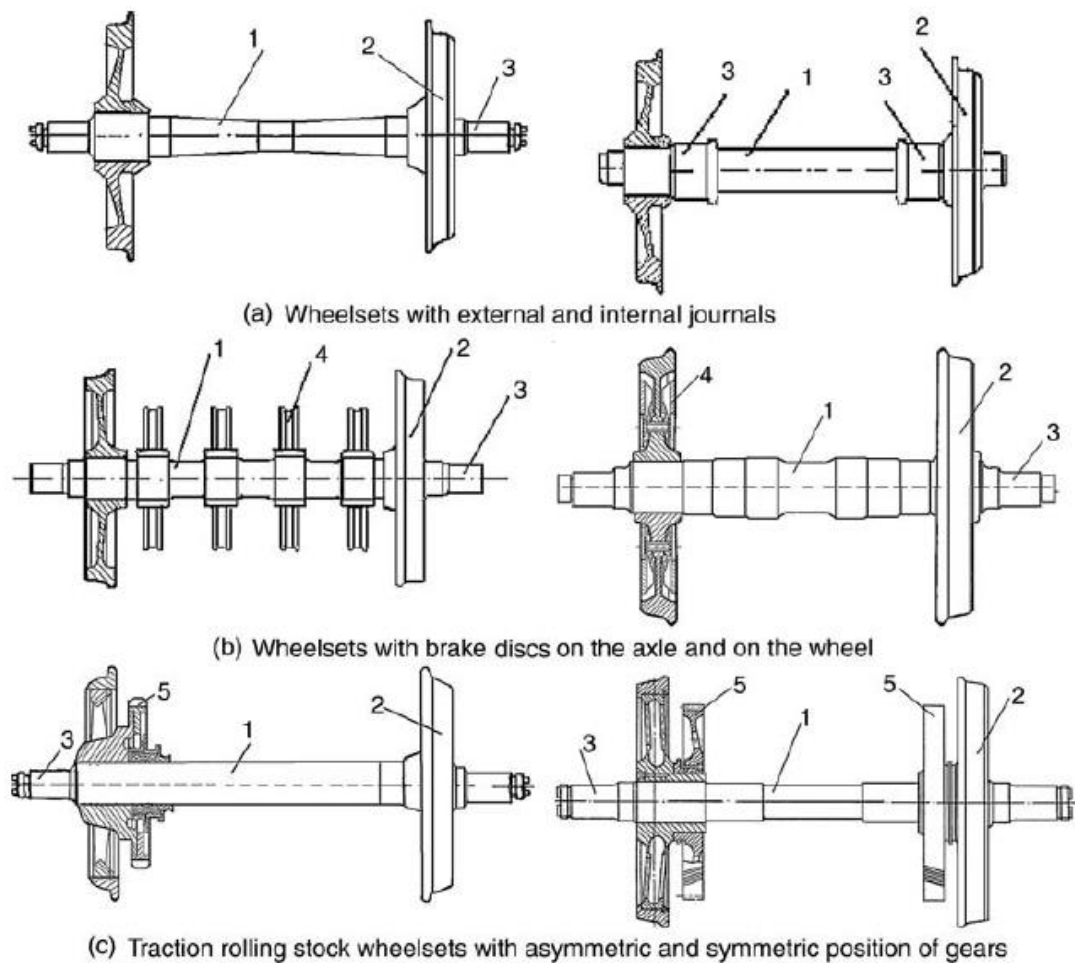


Figura 2.34. Tipos de ejes montado. [9]

Principales tipos de ejes montados:

- a) Ejes montados con manguetas externas e internas.
- b) Ejes montados con discos de freno en el eje y en la rueda.
- c) Ejes montados para material rodante de tracción con posición asimétrica y simétrica de los engranajes.

2.9.1.1.3. Rueda

La rueda es uno de los componentes principales del material rodante, debido a que va estar sometido a sollicitaciones mecánicas y térmicas. Deben de estar perfectamente equilibradas e inspeccionadas periódicamente para determinar algún defecto en la superficie o la existencia de fisuras.

En una curva el carril exterior tiene un radio mayor que en el interior. Esto significa que el cilindro de una rueda tiene que recorrer una distancia mayor en el carril exterior que en el carril interior. Mientras que el movimiento de las ruedas en el carril interior y exterior debe tener el mismo número de rotaciones por unidad de tiempo. Para igualar estas rotaciones, una o las dos ruedas deben de deslizarse, por lo tanto, la superficie de las ruedas es un perfil cónico. Tiene un ángulo de inclinación variable respecto al eje. Las ruedas cónicas tienen una pestaña que evita el descarrilamiento y guía al vehículo por la vía (Figura 2.35). Mas adelante se estudiará sobre la conicidad.

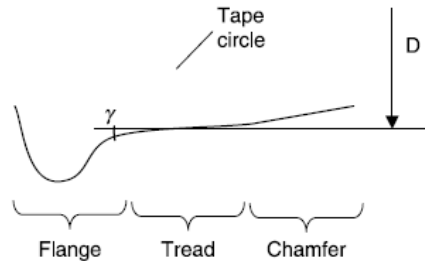


Figura 2.35. Principales elementos del perfil de una rueda. [9]

Existen una gran variedad de perfiles de ruedas, pero tienen unas características similares:

- El ancho del perfil varía entre 125 y 135mm.
- La altura de la pestaña ronda entre 28 y 30mm.
- El ángulo de inclinación γ es normalmente entre 65° y 70° .

El perfil más común en Europa se muestra en la figura 2.36.

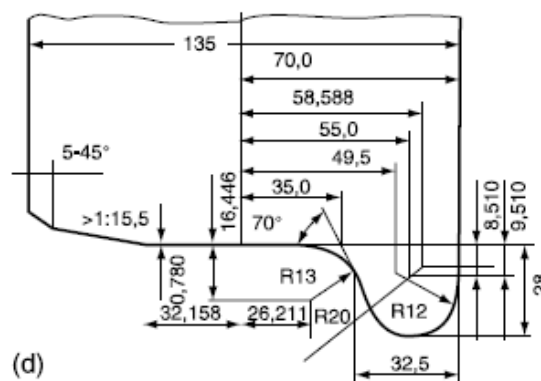


Figura 2.36. Perfil común en Europa. [9]

Las ruedas se clasifican en:

- Ruedas monobloque

Estas ruedas solidas tienen tres elementos llanta, velo y cubo.

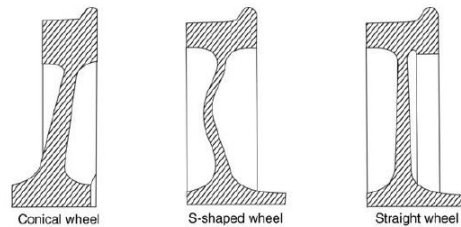


Figura 2.37. Ruedas monobloque. [9]

- Ruedas con llantas

La llanta se une al velo, con un aro metálico. La principal ventaja de este tipo de ruedas es la posibilidad de cambiar la llanta conservando el velo y el cubo.

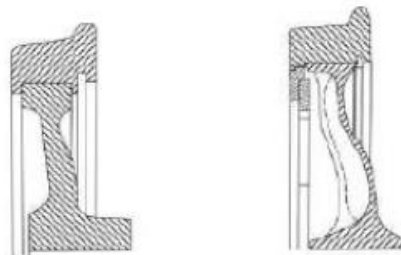


Figura 2.38. Ruedas con llantas. [9]

- Ruedas ensambladas

Igual que las ruedas con llanta, las ruedas ensambladas permiten el cambio de la llanta conservando el velo y el cubo. En este caso la llanta está unida al velo a través de una banda de goma. Esta banda absorbe las vibraciones, golpes y ruidos. Aparte ayudan a facilitar las fuerzas de alta frecuencia que actúan en el interfaz rueda-carril.



Figura 2.39. Ruedas ensambladas. [9]

2.9.1.1.4. Cajas de grasa

La caja de grasa es el mecanismo que permite al eje montado a girar, aparte, acoge los rodamientos y los soportes de la suspensión primaria sujetando el eje montado al bogie. Esta caja transmite fuerzas longitudinales, laterales y verticales del eje montado a los otros componentes del bogie.

La clasificación de la caja de grasa es de la siguiente forma:

- Su posición en el eje depende si son exteriores o interiores.
- Tipo de rodamiento utilizado, ya sea plano o liso.

El objetivo que tienen la caja de grasa es obtener una distribución uniforme de las fuerzas en los rodamientos. La forma de la caja de grasas está determinada por el método de conexión entre la caja de grasa y el chasis del bogie.

Los rodamientos planos se dejaron de usar en las cajas de grasa debido a que presentan graves desventajas:

- Alto coeficiente de fricción en el arranque.
- Poca estabilidad.
- Mantenimiento excesivo.
- Contaminación ambiental.

Los diferentes tipos de rodamientos que se utilizan son cilíndricos, cónicos o esféricos, y el método de ajuste que se utiliza para estos rodamientos es por presión o por contracción. Los rodamientos cilíndricos tienen una alta capacidad dinámica en el sentido radial pero no transmiten fuerzas axiales. Los rodamientos cónicos al estar inclinados al eje de rotación presentan fuerzas axiales a través de la superficie cilíndrica. Los rodamientos esféricos son muy costosos y su capacidad de peso es poca, por lo que no se han usado de manera excesiva.

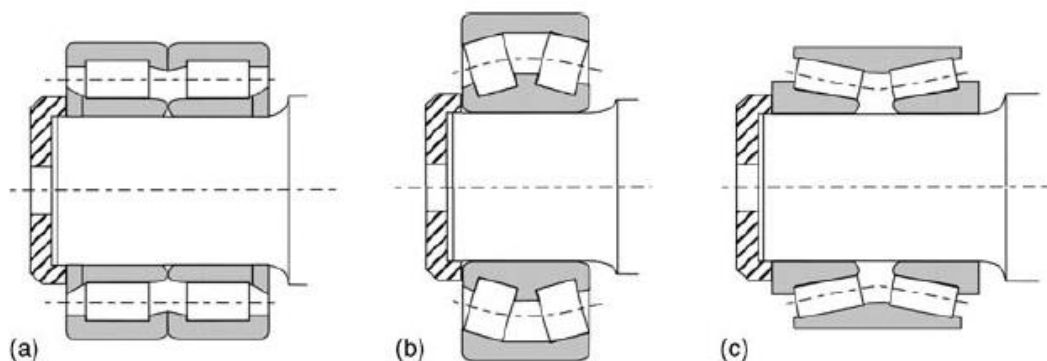


Figura 2.40. (a) Rodamiento de dos filas cilíndricas (b) Rodamiento de una fila auto lineada (c) Rodamiento de dos filas cónicas. [9]

2.9.1.1.5. Suspensión

La suspensión es uno de los elementos más importante del material rodante, tiene la función de soportar el cuerpo del vagón, facilitando al bogie la rotación de forma relativa al cuerpo en las curvas y aislar las vibraciones producidas por el bogie. Aparte, transmite la fuerza de tracción desde el bogie al cuerpo.

La suspensión está compuesta por los elementos elásticos, amortiguadores y componentes que conectan los ejes montados a la carrocería del vehículo.

Existen dos tipos de suspensión:

- Suspensión primaria

La suspensión primaria está conectada entre el conjunto de eje y ruedas y el chasis del bogie. Cumple con dos funciones, por una parte, minimiza las vibraciones que aguanta el chasis del bogie y los elementos montados sobre él. Por otra parte, asegura una distribución homogénea de cargas sobre las ruedas. Lo cual evita el riesgo de descarrilamiento.

Aparte de asegurar la suspensión vertical, la suspensión primaria está relacionada con el guiado de los ejes en direcciones longitudinales, verticales y laterales.

Como se muestra en la figura 2.41 el efecto de la suspensión primaria en el que las rigideces de guiado resultan determinantes para definir la estabilidad del vehículo y los esfuerzos rueda-carril que se producen al paso de la curva.

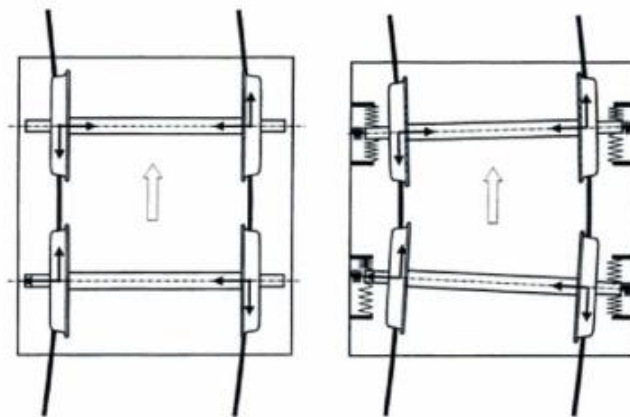


Figura 2.41. Efecto de la suspensión primaria. [9]

La figura 2.42 muestra el montaje de la suspensión primaria de un bogie.



Figura 2.42. *Suspensión primaria de un bogie. Fuente: Internet*

- Suspensión secundaria

Es la suspensión que está conectada entre el chasis del bogie y la carrocería del vehículo ferroviario. La suspensión del vehículo es la encargada de asegurar el filtrado de las vibraciones, no solo en dirección vertical, sino también en dirección lateral. Por lo tanto, presentan una alta flexibilidad en ambas direcciones, vertical y lateral.

La suspensión secundaria puede ser de muelle o mediante gomas llenos de aire comprimido, conocidas como *airspring*. En la figura 2.43 se muestra la suspensión secundaria mediante gomas de aires. Unas de las ventajas que presenta esta suspensión es su mínimo mantenimiento, debido a la facilidad de regulación del aire a presión, según la carga del vehículo.

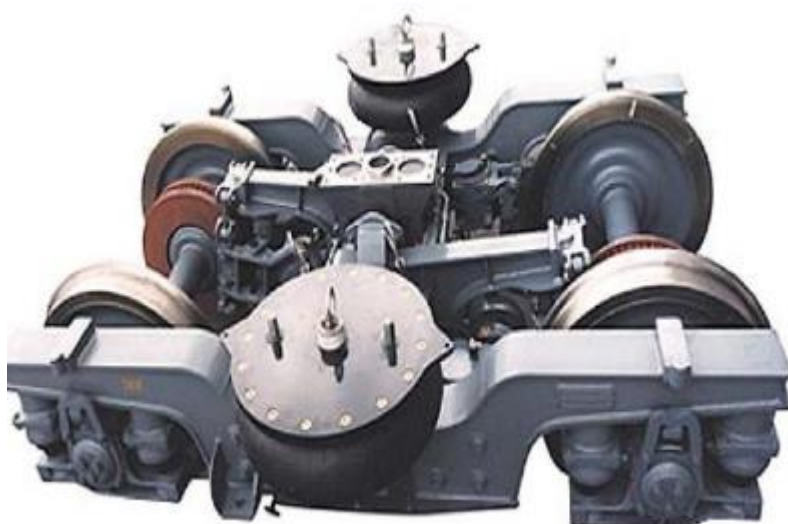


Figura 2.43. *Suspensión secundaria. Fuente: Internet*

2.9.1.2. Clasificación de bogie

Se pueden distinguir diferentes tipos de bogies según el número de ejes montados, diseño y la estructura de la suspensión.

- Clasificación de los bogies según el número de ejes

El bogie puede estar constituido por un eje montado, por dos ejes montados o por tres. Lo más habitual es la utilización de bogie con dos ejes montados. Como se ha dicho anteriormente los bogies que están formados por más de dos ejes montados se utilizan para las locomotoras.

En la figura 2.44 se puede ver una comparación de los bogies de uno y de dos ejes montados.

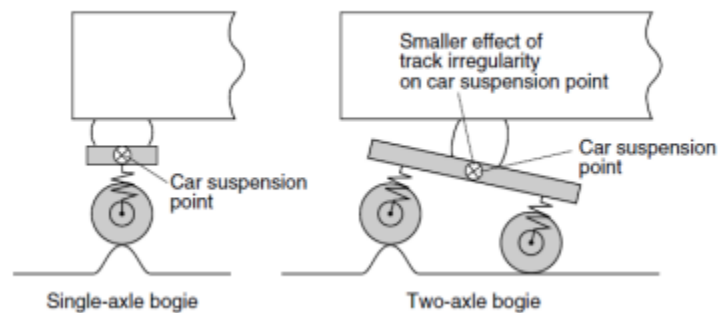


Figura 2.44. Bogie según el número de ejes

- Bogie articulado y no articulado

De acuerdo a la suspensión los bogies pueden clasificarse en articulados y no articulados. Los bogies no articulados aguantan solo el cuerpo de un vagón, se colocan en cada extremo (figura 2.45). En cuanto a los bogies articulados, soportan la parte posterior del vagón procedente y la parte delantera del vagón anterior. Las ventajas que presentan este tipo de bogie es el mejor confort en el viaje y el menor ruido ya que los asientos no están sobre los bogie. Las desventajas que presenta enfrente a los no articulados, tienen una estructura compleja y un aumento de la carga sobre el eje.

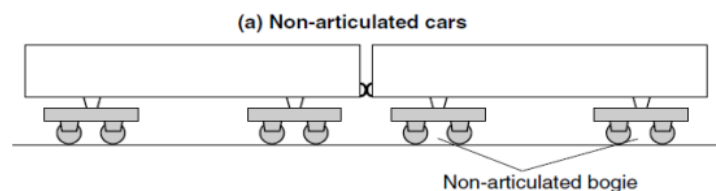


Figura 2.45. Bogie no articuladas

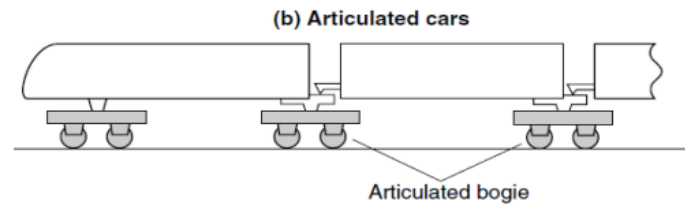


Figura 2.46. Bogie articulada

- Clasificación de los bogie según la estructura de la suspensión

Dependiendo de la estructura del equipo de suspensión, los bogies pueden clasificarse en dos tipos:

- Bogies de barra de suspensión oscilante.

El diseño convencional de los bogies de barra de suspensión oscilante soportan el vagón utilizando vigas de soporte de balance bajo, lo cual se encuentran suspendidas del chasis por medio de eslabones. Consigue un buen confort al minimizar la rigidez horizontal del sistema, pero su estructura es compleja y un gran número de desgaste.

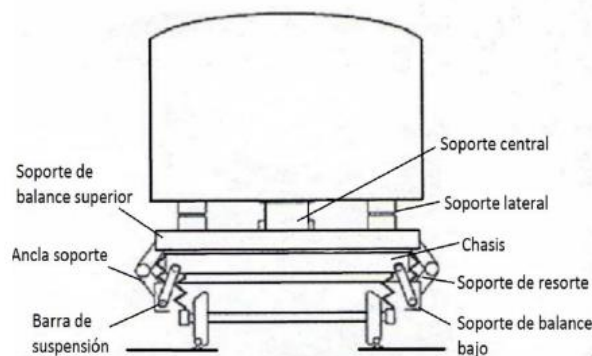


Figura 2.47. Bogie de barra de suspensión oscilante

- Bogies de resorte soportado por pequeña rigidez lateral.

En este tipo de bogie se utiliza un resorte de suspensión de aire para absorber vibraciones causadas por la rigidez lateral. Aparte, tiene una estructura sencilla por lo tanto son los más utilizados. En la figura 2.48 se muestra el esquema de un bogie de resorte soportado por pequeña rigidez lateral.

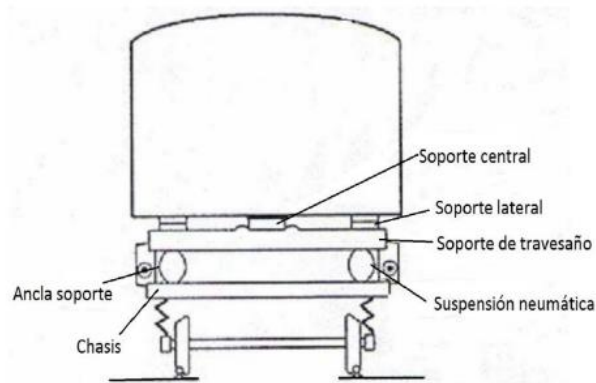


Figura 2.48. Bogie de resorte.

- Bogie con refuerzo y sin refuerzo

El bogie con refuerzo fueron los primeros que se desarrollaron. Una característica fundamental de los bogies es la rotación relativa al cuerpo del vagón en las curvas, mientras que mantienen una alta resistencia a la rotación durante los tramos rectos. Para lograr estas características, el bogie con refuerzo sostiene un pivote central que sirve como centro de rotación y soportes laterales que resisten la rotación.

En cuanto a los bogies sin refuerzo, permiten desplazamientos rotaciones en curvas, a través de la suspensión secundaria, situada en ambos lados. Esto conlleva una mejor resistencia rotacional que los soportes laterales, por lo que mejoran sus cualidades reduciendo el número de partes y el peso del bogie.

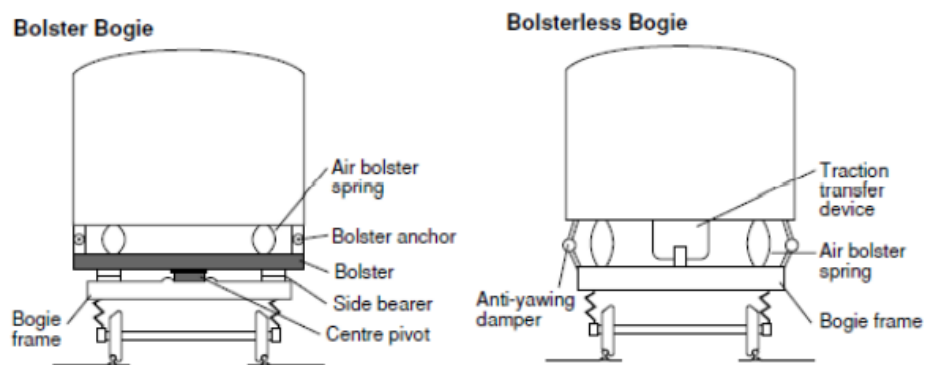


Figura 2.49. Bogie con refuerzo y sin refuerzo

CAPÍTULO 3

3. Conceptos Teóricos

3.1. Conicidad

La conicidad en la rueda ferroviaria se introduce para reducir el roce de la pestaña y del carril, y en parte para facilitar el movimiento del vehículo en una curva. Se pretende obtener una curva suave con la relación de la conicidad y la pestaña de la rueda.

Las ruedas del ferrocarril son cónicas, es decir el exterior es bastante menor que el diámetro interior, como se muestra en la figura 3.1. Por lo tanto, las ruedas pueden desplazarse un mínimamente a la derecha o a la izquierda.

En una curva, cuando el eje montado se mueve hacia la derecha, el diámetro de la rueda derecha expondrá un radio mayor y el de la izquierda tendrá un diámetro menor (figura 3.2). Este fenómeno se conoce como el movimiento oscilatorio que se estudiara en el siguiente apartado. Cabe destacar que, por motivos de desgaste, los perfiles de rueda utilizados en la realidad no son claramente cónicos, sino que están formados por consecución de arcos de distinto radio, tal y como puede verse en la figura 2.34, por lo que, en lugar de hablar de conicidad en términos absolutos, se utiliza el término de conicidad equivalente.



Figura 3.1. Rueda cónica. Fuente: CAF



Figura 3.2. Eje montado en una curva.

Normalmente para los perfiles de ruedas cónicas se utiliza una relación de conicidad equivalente de 1:20. Para el carril UIC 54 se utiliza una conicidad equivalente de 1:40, que es la más habitual en Europa.

3.2. Oscilación Cinemática

Unas de las características más importantes para el movimiento ferroviario de los vehículos es su movimiento de lazo. En Klingel el movimiento de lazo tiene una amplitud constante, por lo tanto, no estable. Se hace inestable cuando hay deslizamientos (lo que ocurre en la realidad) y por eso tenemos lo que se llama hunting. La definición correcta de este movimiento es la siguiente: es el movimiento lateral de los ejes montados respecto a su posición inicial de equilibrio. En general las ruedas son cónicas como se ha mostrado anteriormente, con el diámetro mayor de la rueda cercano a la cara interior del carril. De esta manera los ejes montados tienden a centrarse durante el movimiento ante pequeñas desalineaciones de la vía o tramos curvos de ésta.

Para entender este análisis, podemos suponer que un eje montado se encuentra por alguna irregularidad del terreno y provoca algún tipo de desviación, por la cual el eje se desplaza lateralmente un cierto valor (y). En el inicio, el eje montado se encuentra en su posición inicial, por lo tanto, los radios de las dos ruedas son el mismo. La conicidad de la rueda es la pendiente del perfil de la rueda, se muestra en la figura 3.3 con el símbolo γ .

La ecuación de los radios en la posición inicial es la siguiente:

$$R_r = R_l = R_0 \quad (3.1)$$

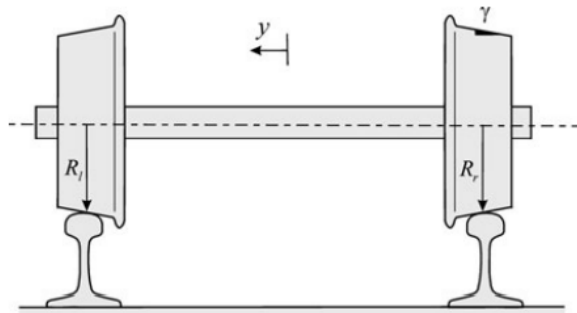


Figura 3.3. Posición de equilibrio de un eje montado. [12]

Si el eje se mueve lateralmente, la diferencia de radios ΔR se puede obtener por la hipótesis de ángulos pequeños:

$$\Delta R = y\gamma \quad (3.2)$$

De ello podemos deducir los radios de las diferentes ruedas en cualquier instante:

$$R_r = R_0 - y\gamma \quad (3.3)$$

$$R_l = R_0 + y\gamma \quad (3.4)$$

Como el eje es rígido y la velocidad angular es constante, las respectivas velocidades de las ruedas se pueden calcular como:

$$V_r = R_r \omega \quad (3.5)$$

$$V_l = R_l \omega \quad (3.6)$$

La velocidad del eje ferroviario será la media de las dos velocidades anteriores.

$$V = \frac{V_r + V_l}{2} = \frac{R_r \omega - R_l \omega}{2} = \frac{(R_0 - y\gamma + R_0 + y\gamma)\omega}{2} = R_0 \omega \quad (3.7)$$

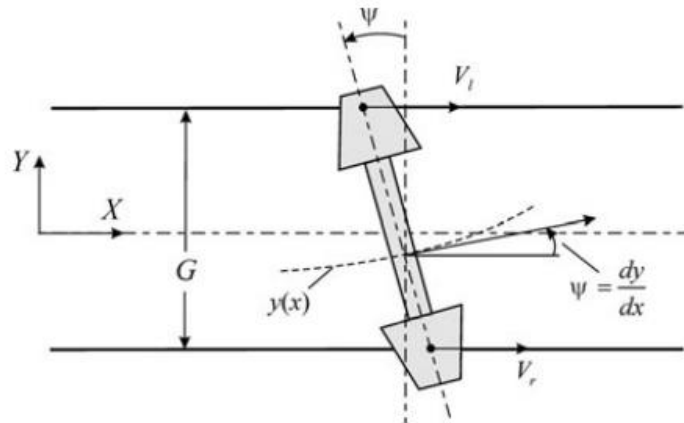


Figura 3.4. Eje montado en el movimiento de lazo inestable. [12]

Si el ángulo de yaw (o de guiñada) girado en planta es muy pequeño (figura 3.4), podemos asumir que el $\tan \psi \approx \psi$, por lo tanto, la velocidad de desplazamiento lateral se puede calcular de la siguiente manera:

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = \psi V = \psi R_0 \omega \quad (3.8)$$

Se puede obtener la velocidad del ángulo yaw con el cociente de las velocidades de las ruedas entre el ancho de la vía.

$$\dot{\psi} = \frac{V_r - V_l}{G} = \frac{(R_0 - y\gamma - R_0 - y\gamma)\omega}{G} = \frac{-2y\gamma\omega}{G} \quad (3.9)$$

Derivando la ecuación 3.8 respecto al tiempo y sustituyendo la ecuación 3.9, se obtiene la ecuación que se puede utilizar para el movimiento lateral del eje montado.

$$\ddot{y} = \frac{d\dot{y}}{dt} = \frac{d\dot{y}}{d\psi} \frac{d\psi}{dt} = R_0\omega\dot{\psi}$$

$$\ddot{y} = R_0\omega\left(\frac{-2y\gamma\omega}{G}\right)$$

$$\ddot{y} + \frac{2R_0\omega^2\gamma}{G}y = 0 \quad (3.10)$$

Si el coeficiente (y) es positivo, la solución de esta ecuación puede ser de la siguiente forma:

$$\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} > 0$$

$$y = A \sin(\omega_n t + C) \quad (3.11)$$

Siendo A y C constantes que se pueden obtener usando las condiciones iniciales. La frecuencia natural se puede obtener por:

$$\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} = \omega_n^2$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} \frac{R_0}{R_0}} = \sqrt{\frac{2V^2\gamma}{GR_0}} \quad (3.12)$$

La solución de la ecuación 3.11, se obtiene suponiendo que γ es positivo, lo cual presenta una oscilación con amplitud constante. Si la conicidad es positiva, el coeficiente (γ) también lo será. El periodo de oscilación se obtiene de la siguiente manera:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{V} \sqrt{\frac{GR_0}{2\gamma}} \quad (3.13)$$

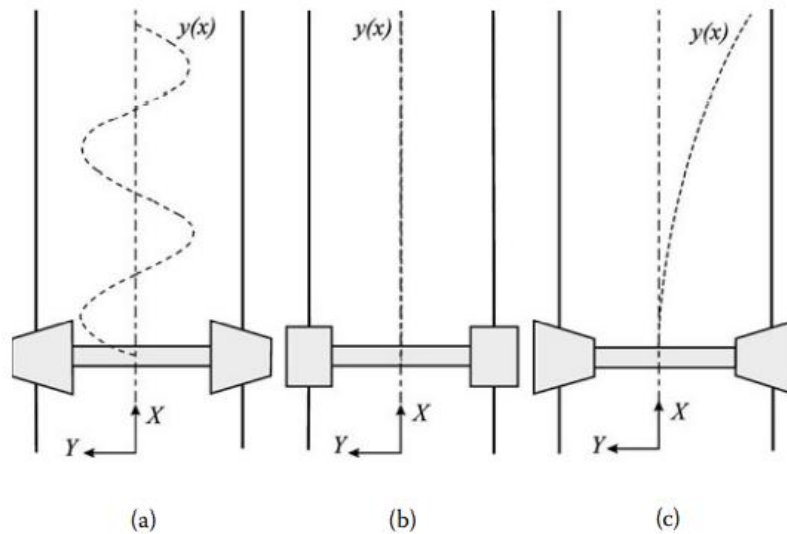


Figura 3.5. Diferentes tipos de conicidades respecto a su movimiento lateral. [12]

En la figura 3.5 se muestran tres ejes montados con diferentes conicidades.

- (a) Es un eje montado con una conicidad positiva, por lo tanto, la frecuencia va a ser positiva y también el movimiento de lazo. En ese caso la solución que se va a obtener es un movimiento oscilatorio estable.
- (b) Es un eje con ruedas cilíndricas, lo cual la conicidad es 0 y el resultado de la ecuación 3.11 es la ecuación de una recta. De tal manera que no presenta oscilaciones solo muestra un movimiento recto.
- (c) En este caso la conicidad es negativa, el coeficiente de la ecuación 3.11 es negativo, lo cual presenta una solución en función del tiempo que aumenta exponencialmente.

Hay que destacar que este sistema de análisis está basado en consideraciones cinemáticas y no tienen en cuenta ninguna otra fuerza que actúe sobre la rueda y el carril. En realidad, el eje montado presenta fuerzas de fricción debido a las diferencias de velocidades de la rueda y carril en el punto de contacto. Debido a estas fuerzas, el movimiento lateral del eje montado puede oscilar alrededor de la posición de equilibrio

con amplitud que aumenta o disminuye con el tiempo, aun así, teniendo una conicidad positiva.

Por lo otro lado, observando las ecuaciones 3.8 y 3.9 en el caso del movimiento oscilatorio, si $\dot{\psi} = 0$ y el movimiento lateral es cero, el ángulo girado está en su posición máximo de giro. Esto implica un desfase de $\frac{\pi}{2}$ entre el desplazamiento lateral y el ángulo yaw.

3.2.1. Teoría de Klingel

La fórmula de Klingel muestra que a medida que aumenta la velocidad para un eje montado, también lo hará la frecuencia de la oscilación cinemática [9].

Si un eje montado con un perfil de rueda cónica se desplaza lateralmente de la posición central, este desplazamiento se contrarresta debido a los diferentes radios de rodadura de las ruedas. Con este movimiento se presentará una diferencia de radios y el desplazamiento lateral mostrará un correspondiente radio R como se ha demostrado en el apartado anterior.

Las ecuaciones 3.12 y 3.13 son fórmulas de Klingel, de tal manera podemos obtener la ecuación de la longitud de onda de la oscilación cinemática:

$$L_k = T V$$

$$L_k = 2\pi \sqrt{\frac{R_0 G}{2\gamma}} \quad (3.14)$$

En la figura 3.6 se muestra el movimiento de Klinger, en el que no afectan fuerzas de fricción. Por lo tanto, teniendo la velocidad y la longitud de onda, podemos calcular la frecuencia del movimiento de Klingel de la siguiente manera:

$$f = \frac{v}{L_k} \quad (3.15)$$

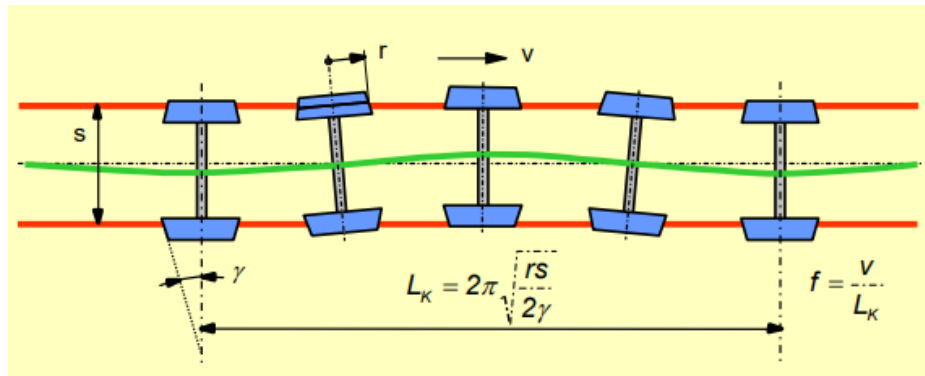


Figura 3.6. El movimiento de Klingel. [13]

Y por último la aceleración máxima puede calcularse como:

$$\ddot{y} = 4\pi^2 y_0 \frac{v^2}{L_k^2} \quad (3.16)$$

3.3. Contacto Rueda-Carril

Desde los inicios del ferrocarril se han ido desarrollando diferentes teorías para entender el contacto de la rueda-carril. Para conocer el comportamiento dinámico del ferrocarril es necesario entender a fondo todos los fenómenos que tienen en el lugar de la zona del contacto.

Estas teorías se basan en el contacto de dos cuerpos elásticos, como puede ser en un plano inclinado con una masa que se desliza hacia abajo, lo cual está sometida a unos esfuerzos normales y tangenciales.

La zona del contacto entre la rueda y el carril forman una pequeña área, en la cual se deberán transmitir las fuerzas verticales, y los esfuerzos transversales y longitudinales. Dicha zona se divide en dos partes:

- Adhesión rueda-carril

Permite la tracción y frenado del vehículo.

- Zona de deslizamiento

Debido a la elasticidad de la rueda-carril y la carga normal aplicada externamente, en algunos puntos de la superficie de contacto crean deslizamientos.

La figura 3.7 muestra el contacto la localización de las fuerzas normales y tangenciales de contacto.

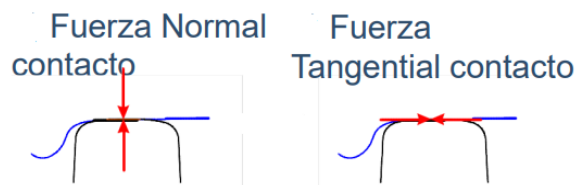


Figura 3.7. Contacto normal y tangencial. [14]

3.3.1. Contacto normal. Teoría de Hertz

Hertz desarrolla una teoría del contacto entre sólidos cuyas superficies de contacto no son conformes [12].

En esta teoría, se supone que el área de contacto, es en general elíptica. Cuando dos superficies de sólidos elásticos están en contacto y tienen grandes radios de curvatura, la superficie de contacto es una elipse plana con una distribución de presiones igual a un elipsoide.

La teoría de Hertz se basa en la suposición de una pequeña deformación de dos cuerpos elásticos debido a la compresión estática, en la cual desprecia el efecto que pueden provocar las fuerzas de fricción. Para el contacto de rueda-carril la teoría de Hertz es la teoría más común y utilizada para determinar la forma del área de contacto y la deformación de las superficies de la rueda y carril.

Por lo tanto, la teoría de Hertz se puede resumir en:

- Las superficies de dos cuerpos son continuos y no conformes.
- Los esfuerzos son pequeños.
- La tensión resultante de la fuerza del contacto desaparece a una distancia lejana del área de contacto.
- Las superficies no tienen fricción.
- Los cuerpos son elásticos y no se produce deformación plástica en el área de contacto.

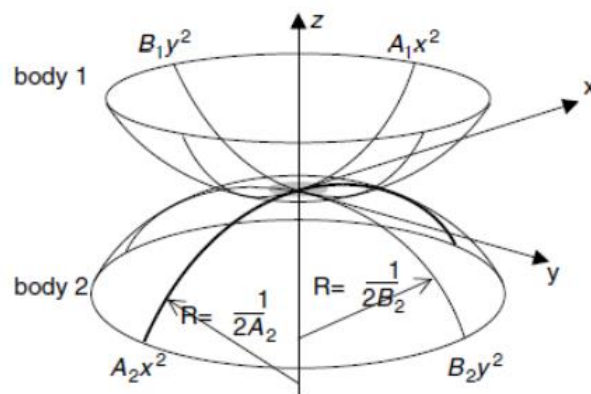


Figura 3.8. Contacto Hertziano

El cálculo de la fuerza normal del contacto es un cálculo que depende de la geometría de las superficies, material y de la indentación o penetración entre ellas.

Por lo tanto, la fuerza de Hertz o la fuerza normal se puede definir de la siguiente manera:

$$F_n = K_h \delta^{3/2} \quad (3.17)$$

En esta ecuación K_h , es una constante de Hertz, que viene dada por la siguiente formula y cuyos términos pueden obtenerse en [12].

$$F_n = \frac{4\beta}{3(K_1 + K_2)\sqrt{A+B}} \delta^{3/2} \quad (3.18)$$

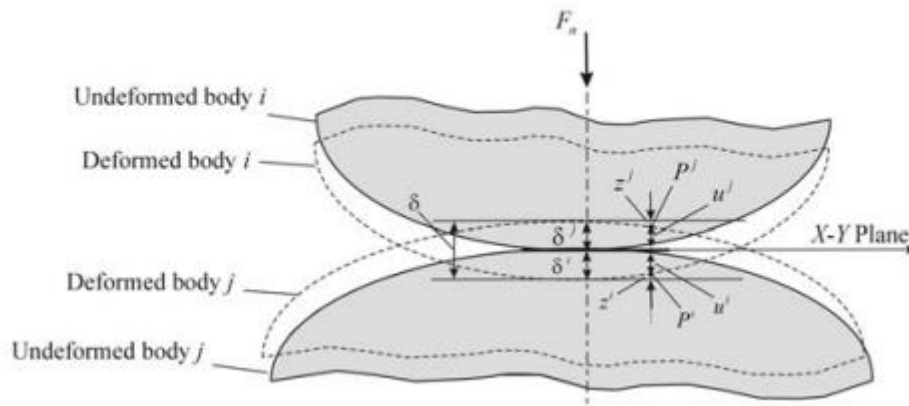


Figura 3.9. Dos cuerpos bajo contacto normal

3.3.2. Contacto tangencial. Teoría de Kalker

El contacto rueda-carril es un contacto de fricción por rodadura, en la que van a presentar dos áreas, un área de adhesión y la otra de deslizamiento, por lo que es necesario determinar qué zona del área de contacto está en adhesión y qué zona está en deslizamiento.

En la zona del contacto tangencial, se presentan varias velocidades, mostradas en la figura 3.10.

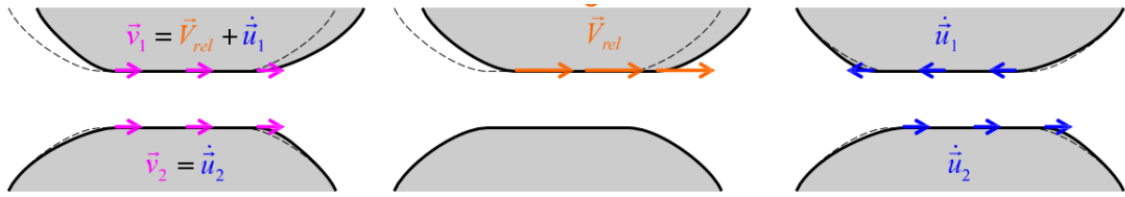


Figura 3.10. Velocidades en la zona de contacto

La velocidad de la deformación en el contacto será la siguiente:

$$\dot{\vec{u}} = \dot{\vec{u}}_1 - \dot{\vec{u}}_2 \quad (2.19)$$

La velocidad relativa en el contacto es:

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 = \vec{V}_{real} + \dot{\vec{u}} \quad (3.20)$$

Teniendo en cuenta estas velocidades, si en una zona existe adhesión, la velocidad relativa es nula y la velocidad de deformación queda en:

$$\Delta \vec{v} = 0; \quad \dot{\vec{u}} = -\vec{V}_{real} \quad (3.21)$$

Para un contacto en el que se produce deslizamiento la velocidad relativa tendrá un valor diferente que cero.

Para el cálculo de las fuerzas tangenciales de contacto dependerán de si el contacto se encuentra en adhesión o deslizamiento. Por lo tanto, se determina si cada punto de esa área de contacto se encuentra en zona de adhesión o deslizamiento tal y como se muestra a modo de ejemplo en la figura 3.11. En el caso de que la zona se encuentre en deslizamiento, la máxima fuerza tangencial es la máxima e iguala a la fricción de Coulomb. Si se da el caso de una zona de adhesión, la fuerza tangencial depende de las velocidades adimensionalizadas de los puntos de contacto, conocidas como *creepages*.

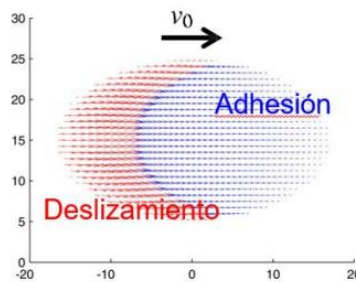


Figura 3.11. Área de deslizamiento y adhesión

Para calcular las fuerzas en función de los creepages se puede aplicar la teoría lineal de Kalker, ya que es una de las más utilizadas por su alta eficiencia computacional.

- La teoría lineal de Kalker

Kalker sugirió que, para creepages muy pequeños, el área de deslizamiento es muy pequeña y su efecto puede pasar por alto. Por lo tanto, el área de adhesión puede ser igual al área de contacto. Kalker describe el comportamiento de la siguiente manera, a lo largo de una línea paralela a la dirección de la rodadura, las partículas empiezan a penetrar, y como el deslizamiento es muy pequeño, la tracción comienza a acumularse [12]. Cuando las partículas abandonan el área del contacto, la tracción se vuelve a cero.

Por lo tanto, el deslizamiento desaparece en todas las partes del contacto, lo cual podemos obtener una relación entre *creepages* y fuerzas de creep y el momento de *spin* para calcular las fuerzas tangenciales. A continuación, se muestra la ecuación de la fuerza tangencial.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = -Gab \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & \sqrt{abc}_{23} \\ 0 & -\sqrt{ab}c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Donde ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 son los creepages longitudinal, lateral y de spin, respectivamente.

CAPÍTULO 4

4. Diseño y Fabricación

4.1. Introducción

Este TFG se basa en el diseño de una plataforma de guiado ferroviario con ejes y ruedas a una determinada escala, dentro de la cual se realiza el cálculo del movimiento de lazo.

El procedimiento seguido consta la etapa del diseño, teniendo en cuenta algunos fundamentos teóricos de la conicidad y la teoría de Klingel. Se realiza el modelo de la plataforma usando la herramienta de diseño Catia V5. Una vez finalizada la etapa del diseño se procede a la fabricación y mecanizado. Para su posterior etapa de ensamblaje.

4.2. El material empleado

Para la etapa de fabricación y mecanizado se han empleado varias máquinas para su realización. Aparte de estas máquinas se han utilizado herramientas de trabajo.

- Centro de mecanizado CNC

Para la mayoría parte del proyecto se ha utilizado el centro de mecanizado CNC.



Figura 4.1. Centro de mecanizado. EPSL

- Torno

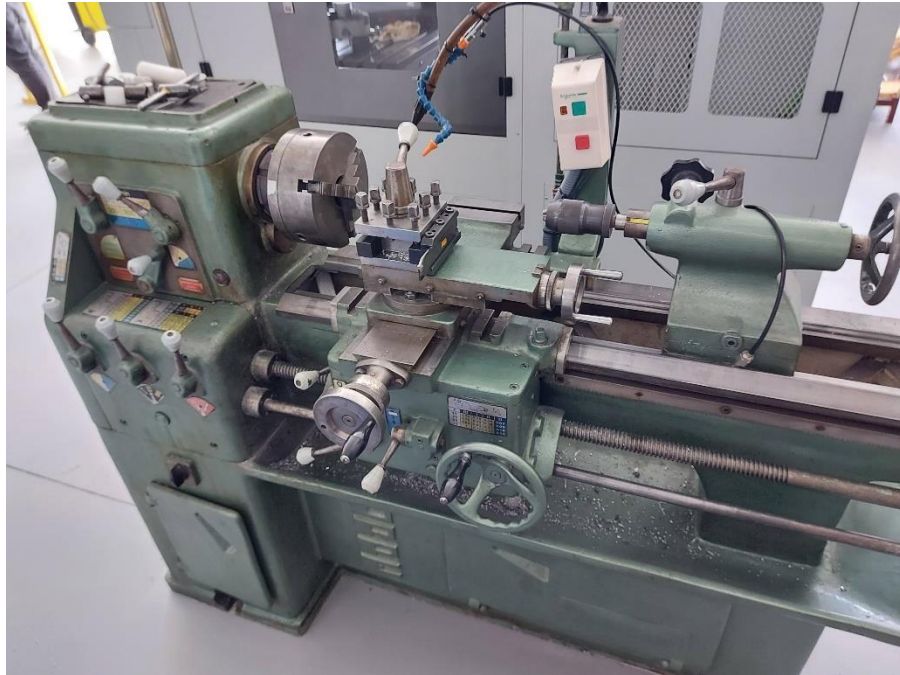


Figura 4.2. Torno. EPSL

- Máquina de sierra de cinta



Figura 4.3. Sierra de cinta. EPSL

- Prensa hidráulica



Figura 4.4. Prensa hidráulica. EPSL

4.3. Características de la estructura diseñada en este TFG

La plataforma se divide en varias partes:

- Carril
- Traviesas
- Pieza de sujeción
- Ruedas
- Eje
- Unión de dos ejes
- Tornillería

El material empleado para estas partes es el aluminio, menos para la unión de dos ejes, que se utiliza PVC.

Antes de empezar con el diseño y cálculos previos, se tiene en cuenta unas ciertas restricciones:

- La plataforma no puede medir más de 4 m de largo y 1,5m de ancho. Por lo tanto, el diseño se ubica dentro de estas medidas.
- Se tiene en cuenta el tiempo limitado del personal de laboratorio, no se han podido mecanizar más ruedas.

4.4. Cálculos previos

Entes de empezar con el diseño se ha tenido en cuenta la teoría fundamental del movimiento oscilatorio de Klingel. Para conseguir el movimiento de lazo, las ruedas deben de tener una cierta conicidad, y, dependiendo de esta conicidad el movimiento de lazo será estable, inestable o recto.

Hay que asegurar que las ruedas y el eje realicen el giro en la curva correctamente sin que se salgan del carril o el choque entre el flanco de la rueda y el carril sea el mínimo.

Por lo tanto, teniendo el eje montado en una cierta curva como se muestra en la figura 4.4, existe una relación geométrica entre el movimiento (y) del eje montado, el radio de la curva R , el radio de la rueda r_0 , la distancia entre los puntos de contacto de la rueda-carril $2l$ y la conicidad de la rueda γ .

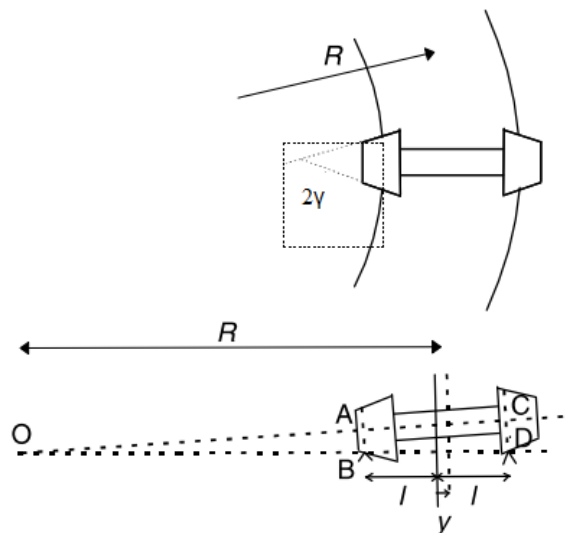


Figura 4.5. Eje montado en una curva [9].

La relación que muestra la figura 4.5 se puede obtener como:

$$\begin{aligned} OAB &= OCD \\ \frac{(r_0 - \gamma y)}{(R - l)} &= \frac{(r_0 + \gamma y)}{(R + l)} \\ y &= \frac{r_0 l}{R \gamma} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Con la ecuación obtenida, podemos calcular el movimiento que tendrán las ruedas y el eje dependiendo de la conicidad en una determinada curva.

Se han realizado cuatro cálculos, es decir cuatro diferentes conicidades. El radio medio de la curvatura y la longitud del contacto entre las dos ruedas es el mismo para los cuatro cálculos. Por otra parte, el radio mínimo de las ruedas cónicas son 25mm, por lo tanto, se ha establecido un intervalo de 25 a 50mm, porque la rueda se desplaza y varia su radio nominal r_0 .

Para realizar estos calculo se ha utilizado el programa Microsoft Excel. A continuación, se expone la dicha tabla de las diferentes conicidades:

Tabla 4.1. *Movimiento (y) de diferentes conicidades.*

Conicidad 1/7		Conicidad 1/5		Conicidad 1/3		Conicidad 1/2	
R	1500,000	R	1500,000	R	1500,000	R	1500,000
I	102,500	I	102,500	I	102,500	I	102,500
λ	0,143	λ	0,200	λ	0,333	λ	0,500
r_0	y	r_0	y	r_0	y	r_0	y
25	11,958	25	8,542	25	5,125	25	3,4167
26	12,437	26	8,883	26	5,330	26	3,5533
27	12,915	27	9,225	27	5,535	27	3,6900
28	13,393	28	9,567	28	5,740	28	3,8267
29	13,872	29	9,908	29	5,945	29	3,9633
30	14,350	30	10,250	30	6,150	30	4,1000
31	14,828	31	10,592	31	6,355	31	4,2367
32	15,307	32	10,933	32	6,560	32	4,3733
33	15,785	33	11,275	33	6,765	33	4,5100
34	16,263	34	11,617	34	6,970	34	4,6467
35	16,742	35	11,958	35	7,175	35	4,7833
36	17,220	36	12,300	36	7,380	36	4,9200
37	17,698	37	12,642	37	7,585	37	5,0567
38	18,177	38	12,983	38	7,790	38	5,1933
39	18,655	39	13,325	39	7,995	39	5,3300
40	19,133	40	13,667	40	8,200	40	5,4667
41	19,612	41	14,008	41	8,405	41	5,6033
42	20,090	42	14,350	42	8,610	42	5,7400
43	20,568	43	14,692	43	8,815	43	5,8767
44	21,047	44	15,033	44	9,020	44	6,0133
45	21,525	45	15,375	45	9,225	45	6,1500
46	22,003	46	15,717	46	9,430	46	6,2867
47	22,482	47	16,058	47	9,635	47	6,4233
48	22,960	48	16,400	48	9,840	48	6,5600
49	23,438	49	16,742	49	10,045	49	6,6967
50	23,917	50	17,083	50	10,250	50	6,8333

En la tabla 4.1 podemos ver las diferencias de movimiento que existe entre las distintas conicidades. Se opta por las conicidades 1/3 y 1/5, debido a que la conicidad 1/7 tiene un mayor movimiento, lo cual podría dar problemas a la hora de realizar el giro en la curvatura. Y la conicidad $\frac{1}{2}$ es muy grande de la realidad, por lo que se ha descartado.

La única diferencia que existe entre las conicidades elegidas, es que la rueda de la conicidad 1/5 llevara consigo flanco de seguridad para asegurar el giro en la curvatura. Ya que el movimiento que va a efectuar es alto y puede dar el caso de que el flanco de la rueda se choque con el carril en el giro.

La otra conicidad efectúa un movimiento apreciable. Por lo tanto, se espera que realice el giro en la curvatura sin diseñar ningún flanco en la rueda.

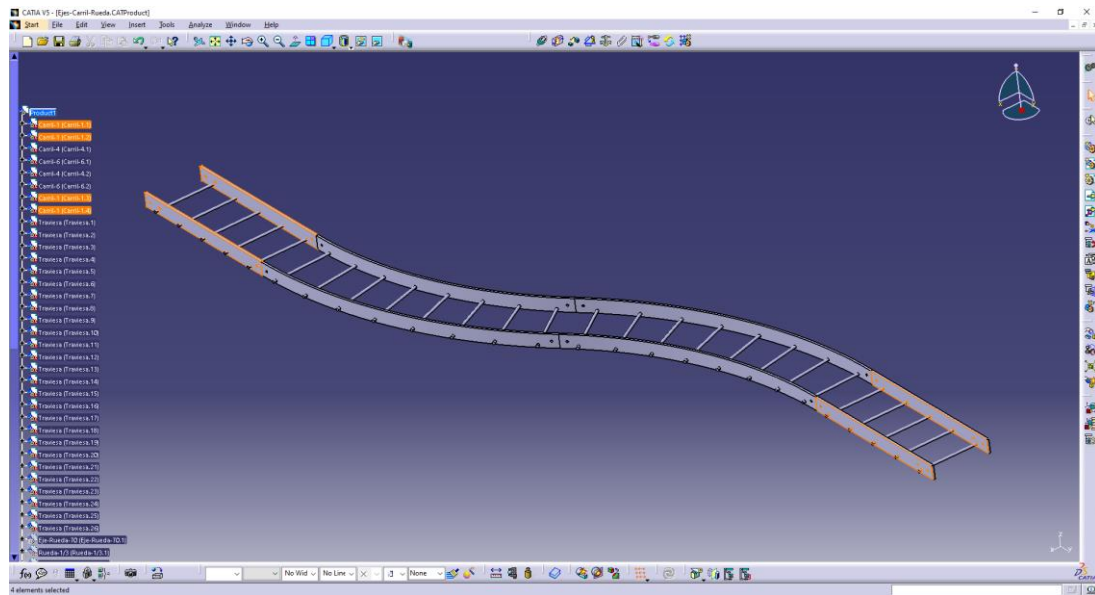


Figura 4.7. Tramo inicial y final.

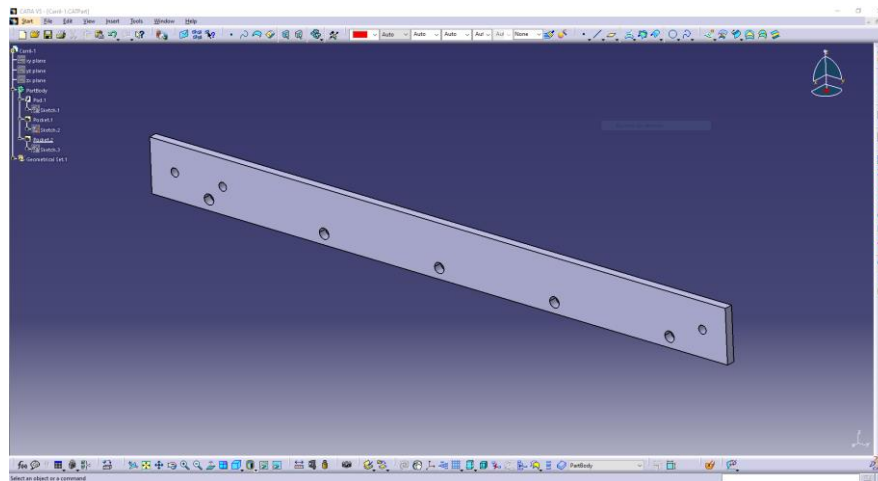
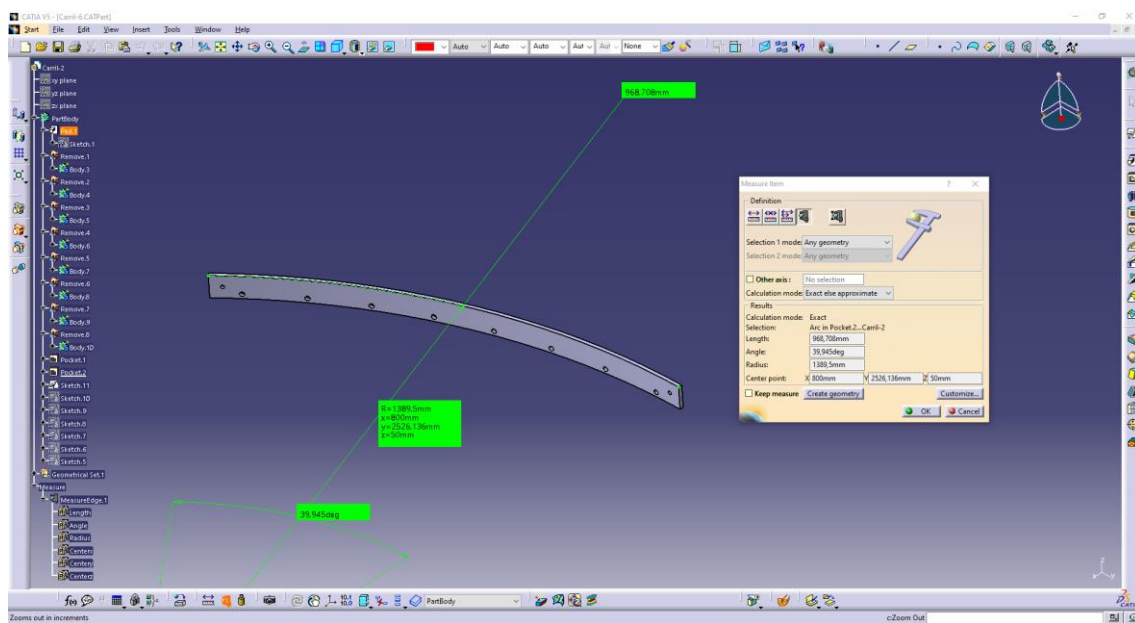
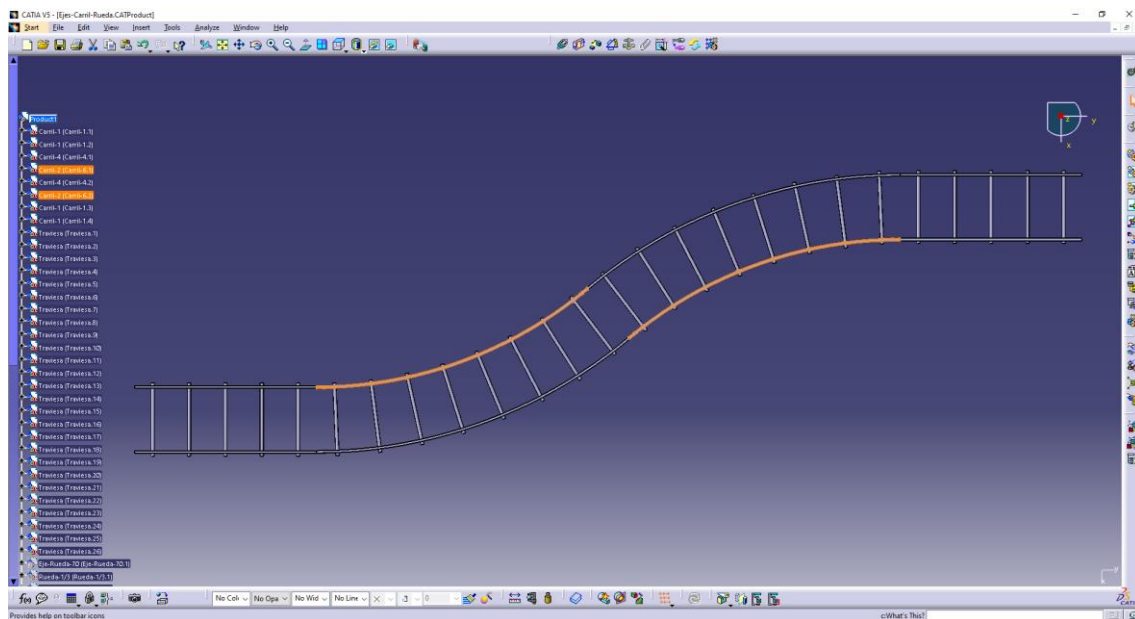


Figura 4.8. Carril-1.

- Parte 2

En esta parte se ha diseñado un carril con un cierto giro. Al tener el mismo ángulo de giro los dos carriles seleccionados en la figura 4.9, tienen la misma estructura. Por lo tanto, solo se diseña un carril, y en la parte de ensamblaje se utiliza el mismo.



- Parte 3

En esta parte ocurre lo mismo que en el anterior carril. De igual manera solo se diseña un carril.

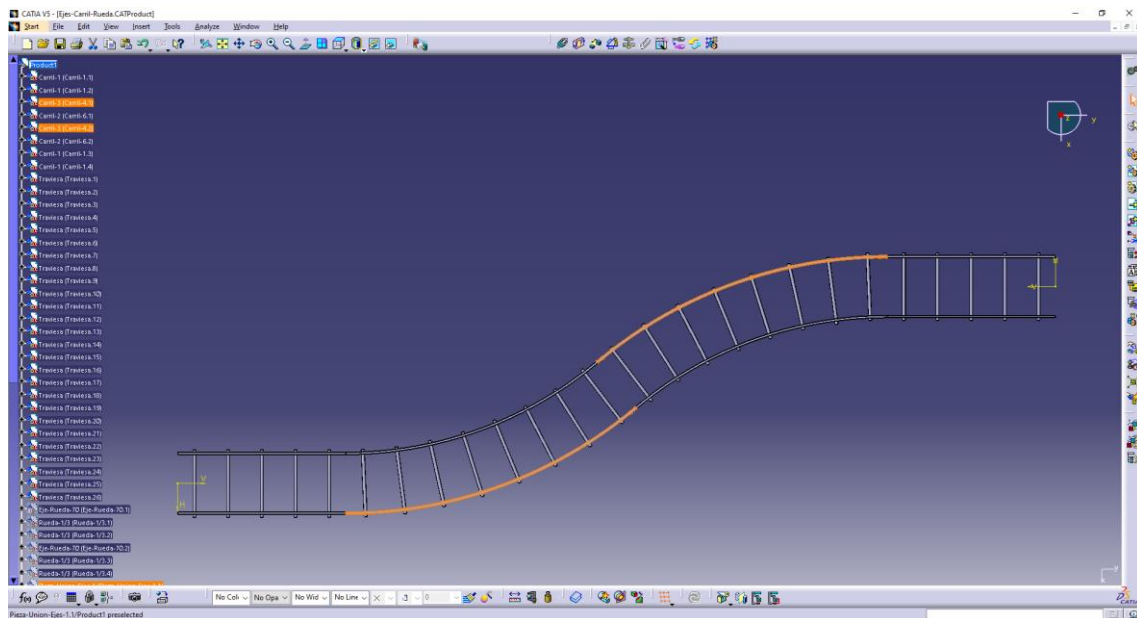


Figura 4.11. Carril 3.

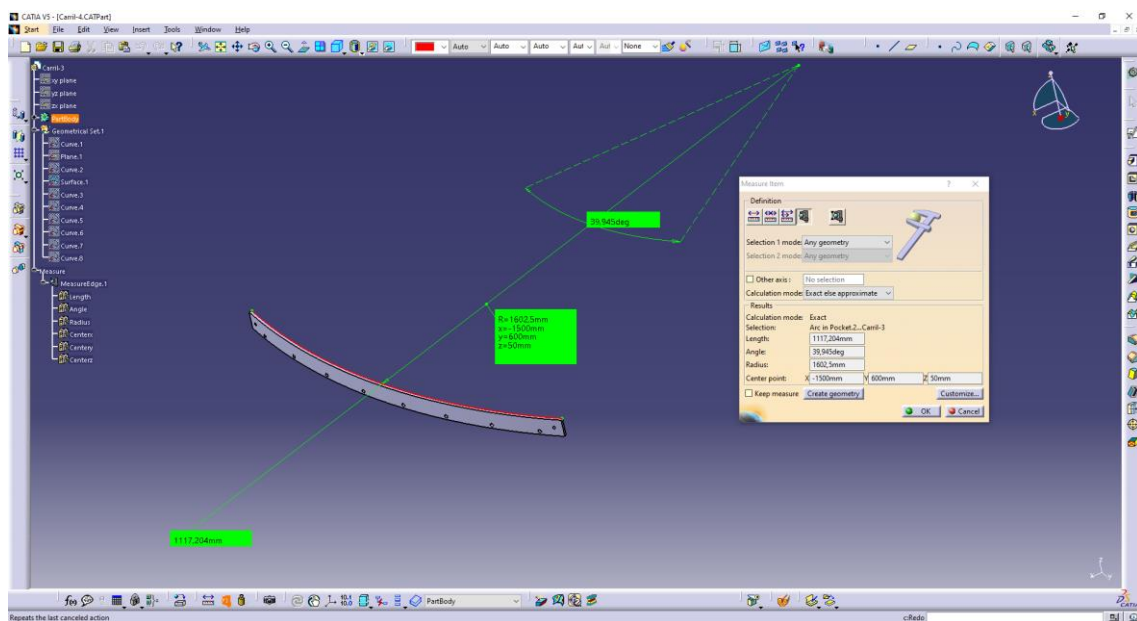


Figura 4.12. Angulo y radio del carril 3.

En realidad, solo se han diseñado 3 carriles, pero en el apartado de ensamblaje se utiliza el carril las veces que haga falta teniendo en cuenta que la estructura sea la misma.

El diseño de los carriles curvados sirve para calcular el ángulo de giro y la posición de los taladros para la pieza de sujeción y traviesas. En la parte de fabricación estos carriles se mecanizan sin la curvatura y después se realiza un proceso de plegado. Lo cual, en los planos se podrá ver como una estructura recta, con sus respectivas cotas para los diferentes taladros.

4.5.2. *Traviesa*

Este componente es muy sencillo, el diseño trata de una varilla circular, de una longitud de 240mm y radio 5mm. La función que tiene es mantener la distancia de 205mm entre los carriles, una escala de 1:10,3 de la realidad.

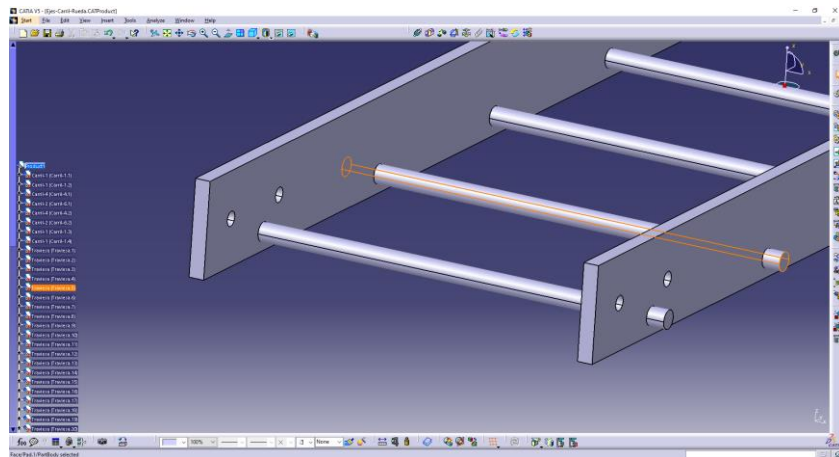


Figura 4.13. *Traviesa.*

4.5.3. *Pieza de sujeción*

La sección de esta pieza es angular 40x40x6mm. La función que desempeña esta pieza es unir dos carriles y a la vez asegurar la pendiente de la plataforma. El diseño es puramente sencillo, tienes dos taladros en una superficie que sirven para sujetar y unir dos carriles, y el otro taladro está roscado, sirve para dar pendiente mediante un tornillo.

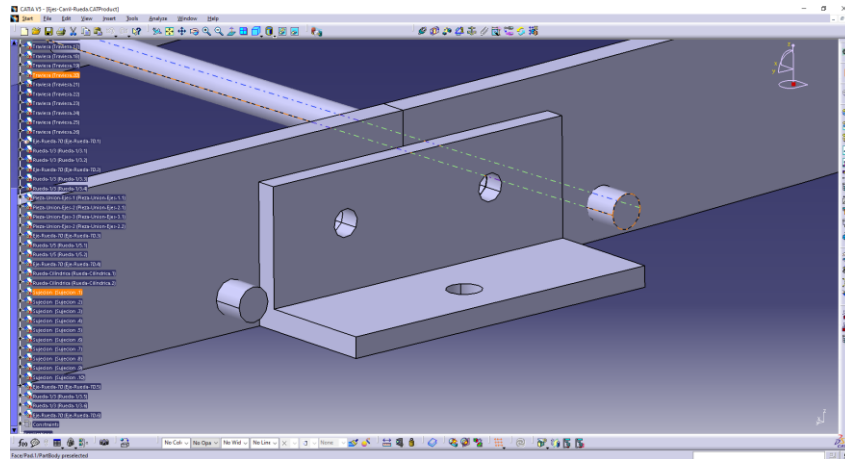


Figura 4.14. *Pieza de sujeción*

4.5.4. Ruedas

Teniendo en cuenta los cálculos previos se han diseñado tres tipos de ruedas. Rueda cilíndrica, rueda cónica de 1/3 de conicidad y 1/5 de conicidad.

- Rueda cilíndrica

Para este diseño se ha añadido una pestaña o flanco de seguridad para que evite que salga del carril. La parte selecciona de la figura 4.15 sirve para agarrar la rueda al eje, con un tornillo de diámetro 4mm.

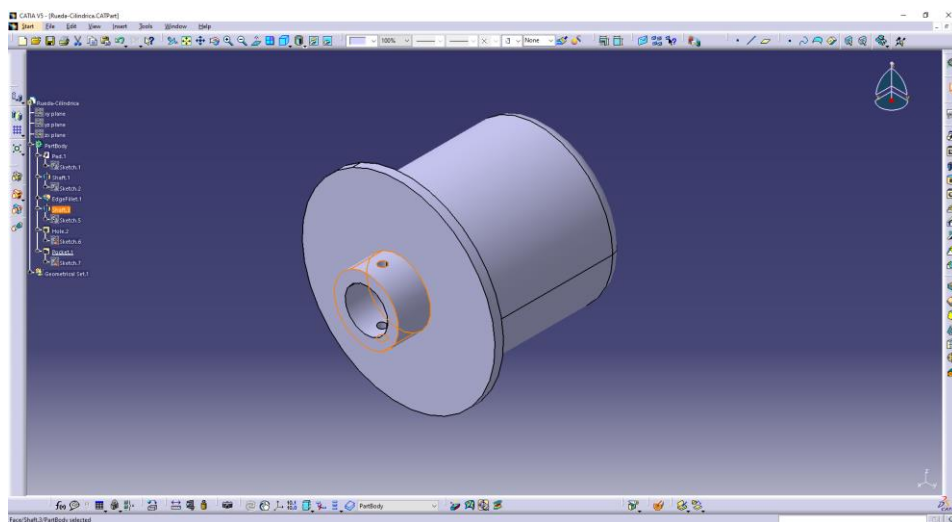


Figura 4.15. *Rueda cilíndrica*

- Rueda de conicidad 1/3

Esta rueda está diseñada para que realice el giro en la respectiva curva sin ninguna pestaña de seguridad. Ya que el movimiento que realiza es reducido.

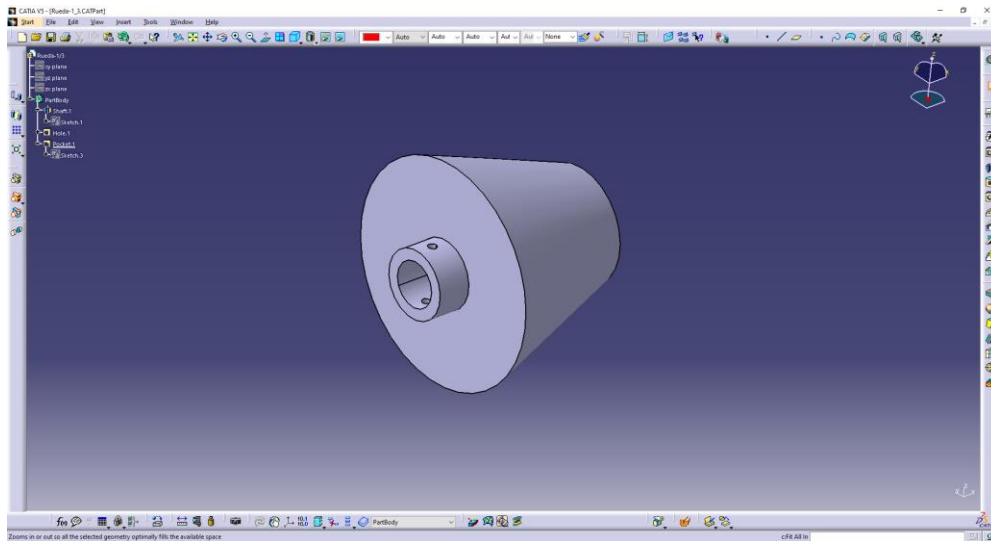


Figura 4.16. Rueda cónica (1/3)

- Rueda de conicidad 1/5

Por último, esta rueda está diseñada para asegurar que realice el giro en la curva, con su respectiva pestaña. Y en este caso el movimiento calculado es mayor que en la rueda anterior, por lo tanto, se hace uso de la pestaña.

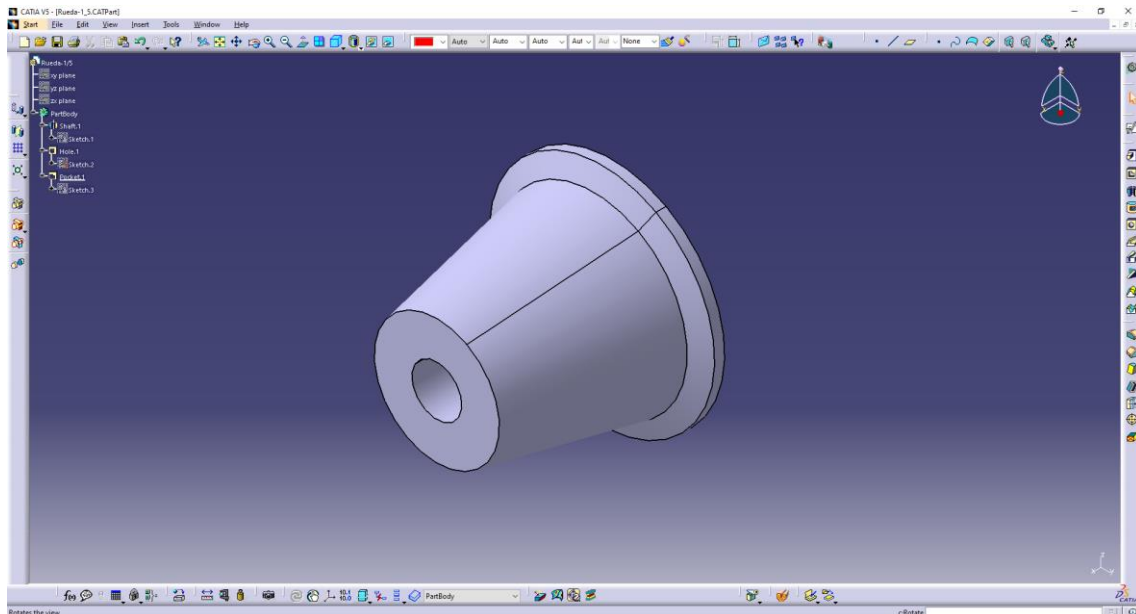


Figura 4.17. Rueda cónica (1/5)

4.5.5. Eje

El diseño del eje tiene que tratar varias funciones, se pueda sujetar a las dos ruedas, como un material rígido, realice la rodadura sobre el carril, permita posicionar las ruedas de dos maneras y tenga el diseño necesario para poner dos anillos de retención en el caso de que se utilice para el sistema de dos ejes.

Unos de los resultados, es que la rueda tenga una conicidad negativa, esto se consigue cambiando la posición de la rueda.

Para fijar la rueda con el eje, se utiliza un tornillo, que pasa por el taladro realizado en la pequeña pestaña de la rueda y en el taladro del eje se rosca.

Se puede ver en la figura 4.18 cuatros taladros. Los taladros más cercanos al centro sirven para sujetar a la rueda, de manera que tengan una conicidad positiva (figura 4.19). Y los dos taladros en los extremos, sirven para posicionar y sujetar a la rueda cambiando 180 grados (figura 4.20), de manera que tengan una conicidad negativa.

Por último, las medidas que se han utilizado para esos anillos son de DIN 471 para un eje de 20 mm de diámetro.

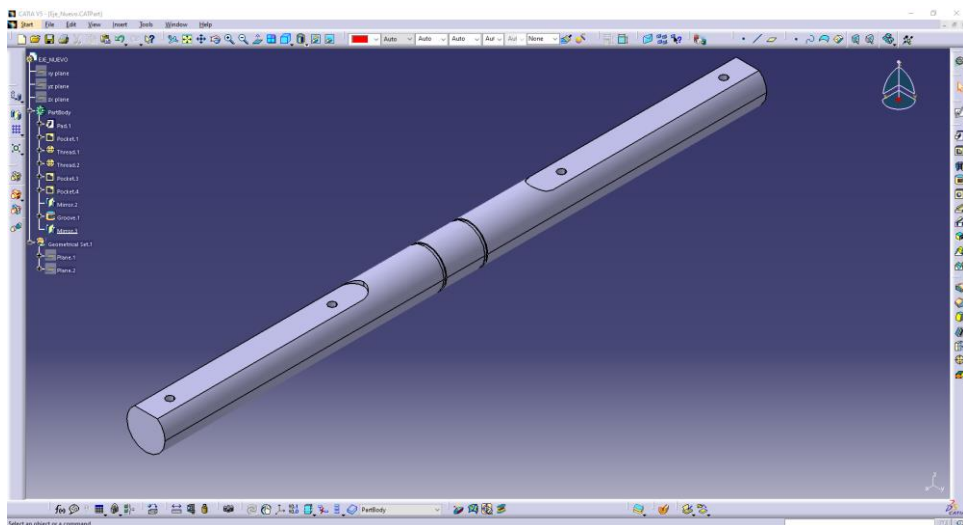


Figura 4.18. Eje

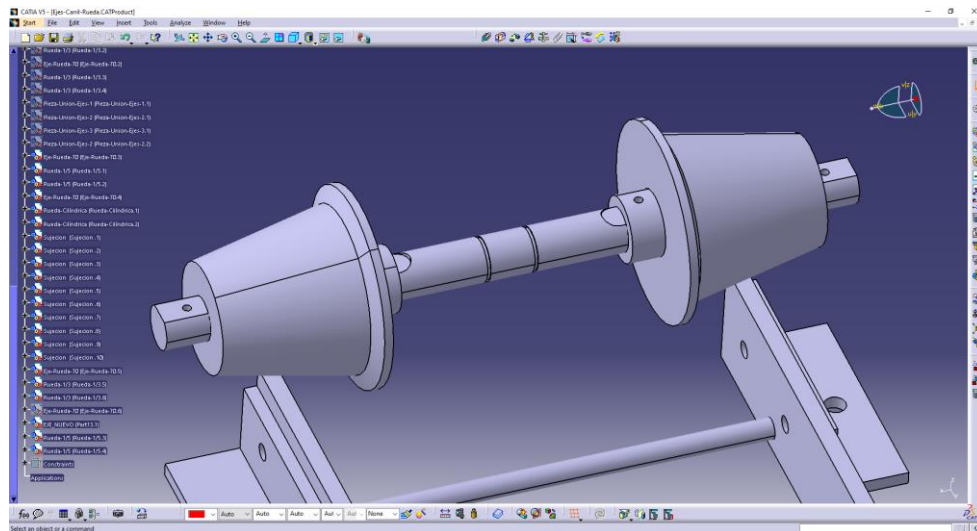


Figura 4.19. Eje y rueda posicionado con conicidad positiva

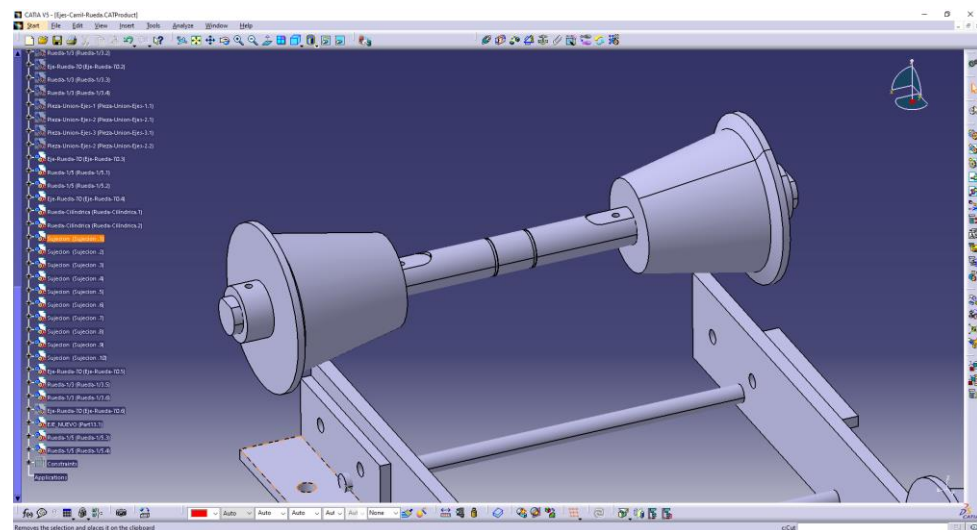


Figura 4.20. Eje y rueda posicionado con conicidad negativa

4.5.6. Pieza de unión para dos ejes

Aparte de realizar ensayos para un eje montado, se pretende diseñar una pieza que junte dos ejes montados y a la vez realice el giro horizontal y transversal a la hora de pasar por la curvatura del sistema de guiado. En la figura 4.21 se muestra la pieza de unión de ejes.

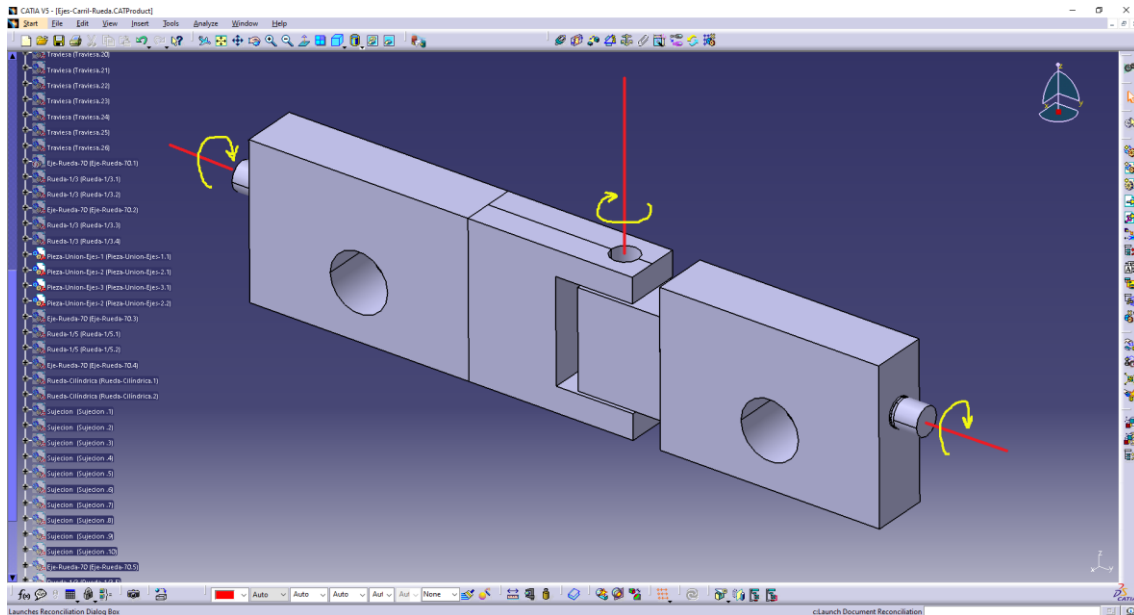


Figura 4.21. Pieza de unión para dos ejes

Para que la pieza pueda girar horizontal y trasversal se divide en varias partes:

- Pieza-Unión-Ejes-1

El diseño de esta pieza sirve para girar el sistema en horizontal utilizando una barrilla que se coloca en el taladro superior. En la barrilla que sobre sale se coloca la segunda pieza que podrá girar trasversalmente y estará retenida por una anilla de DIN 471.

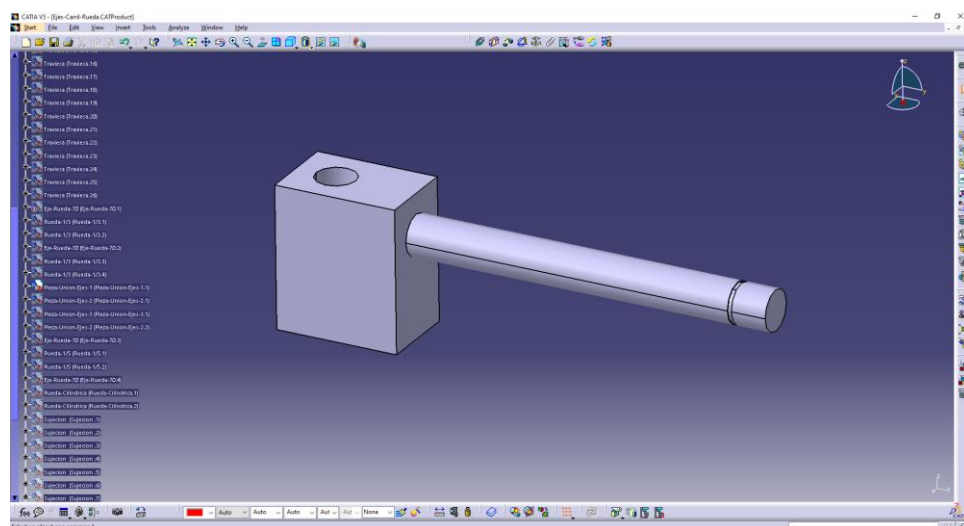


Figura 4.22. Primera pieza de unión

- Pieza-Unión-Ejes-2

Esta pieza sirve para sujetar el eje montado y está colocada a la pieza anterior, lo cual le permite el giro transversal. Esta pieza se utiliza de manera que retenga los dos ejes montados, por lo tanto, se utiliza el mismo diseño para sujetar los dos ejes montados.

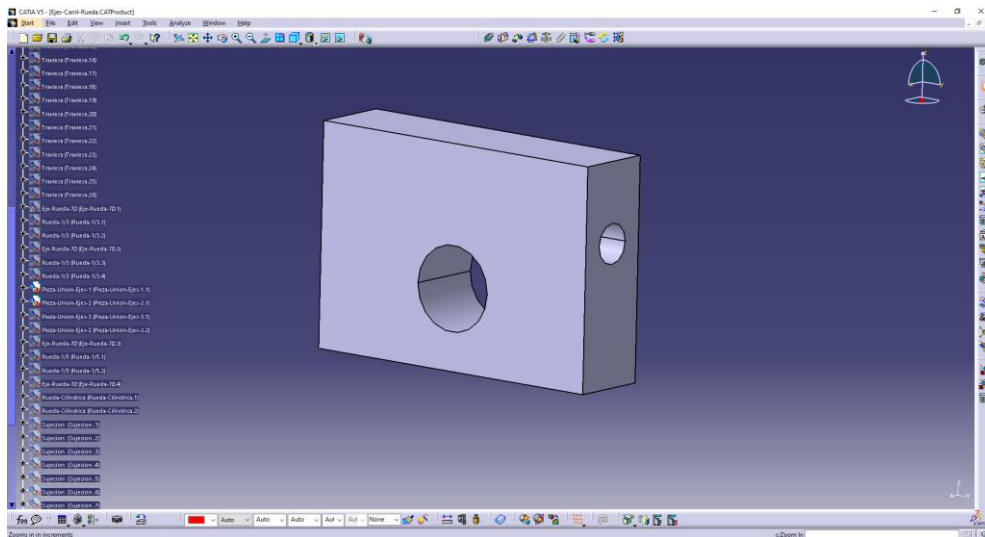


Figura 4.23. Segunda pieza de unión

- Pieza-Unión-Ejes-3

Igual que la primera pieza, sirve para el giro transversal, se une a la primera pieza en el extremo derecho con una varilla que ira introducida a presión. La segunda pieza se une sobre la varilla que sobre sale y también estará retenida por una anilla.

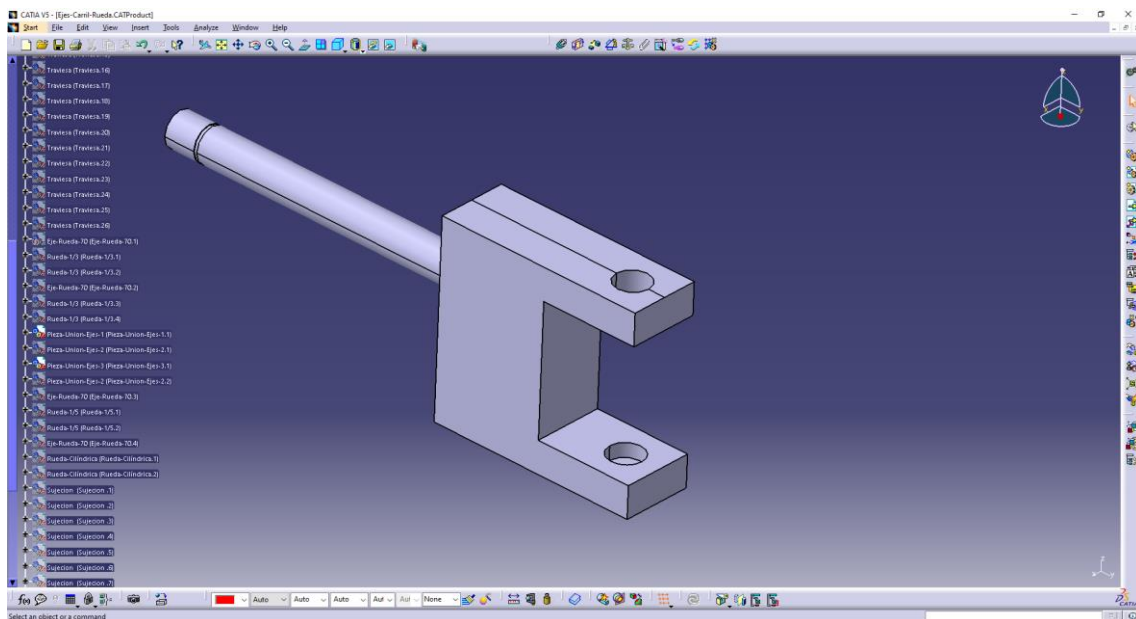


Figura 4.24. Tercera pieza de unión

4.5.7. Ensamblaje

Finalmente se procede a ensamblar todas las piezas creadas, a partir de las restricciones.

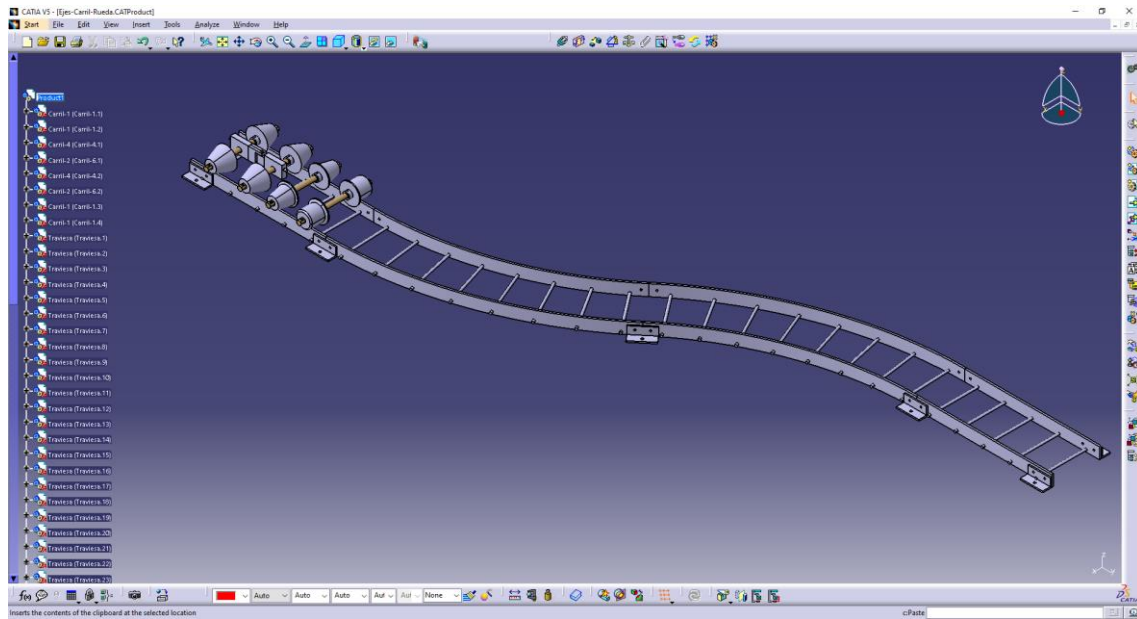


Figura 4.25. Ensamblaje-1

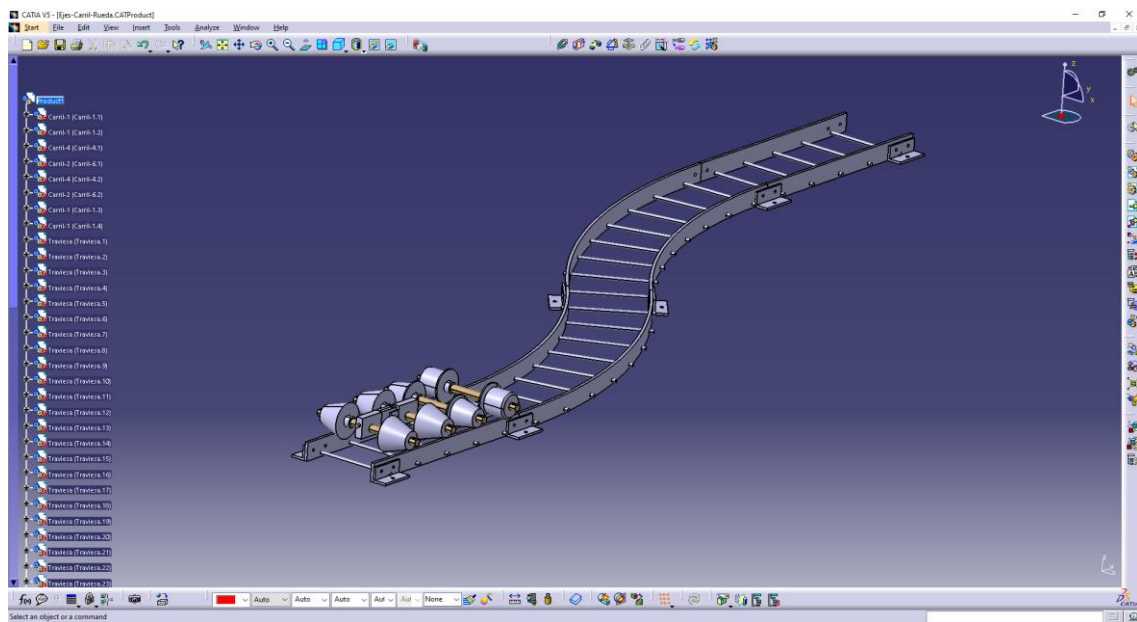


Figura 4.26. Ensamblaje-2

4.5.8. Diseño de útiles

Para el proceso de fabricación se han diseñado varios útiles y suplementos para la mordaza. La función que presentan es sujetar la pieza a la mordaza, para impedir que aparezcan vibraciones o movimientos durante el proceso de mecanizado en el control numérico. Los diseños de útiles están hechos por el técnico del laboratorio. En la parte de anexos se encuentran todos los planos de las diferentes piezas de los suplementos. En la siguiente figura 4.27 se muestra el diseño del útil.

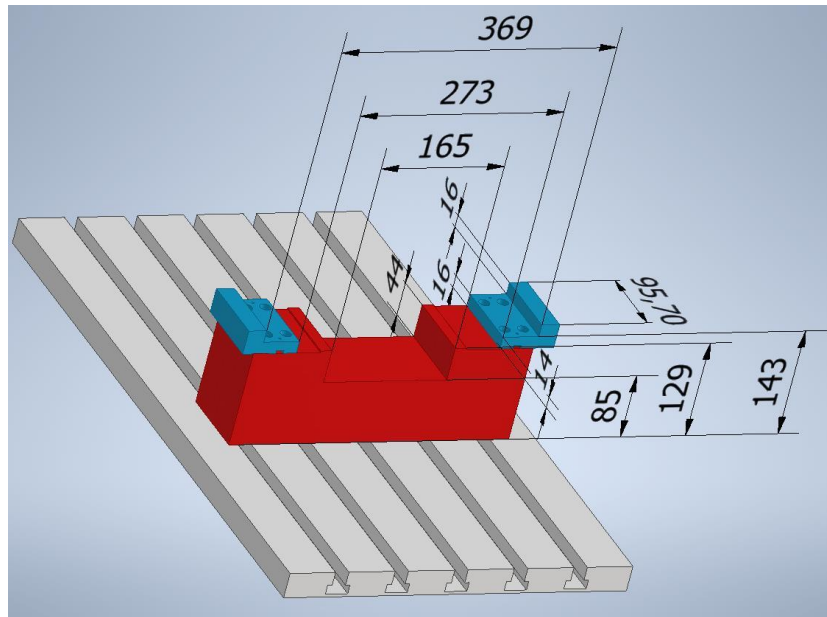


Figura 4.27. Diseño de útiles

4.6. Proceso de fabricación

En este apartado se procede a fabricar los diferentes elementos del sistema. Se han utilizado diferentes métodos para la fabricación. Se llevan a cabo varios pasos:

- Cortar el material necesario para su posterior mecanizado o torneado según si lo necesita.
- Torneear el material
- Mecanizar en CNC
- Ensamblar el dicho material

Los procesos de fabricación para cada parte de la plataforma se muestran en los siguientes apartados.

4.6.1. Ruedas

De todo el proyecto, esta parte es la más compilada y requieren el mayor tiempo de mecanizado. Se siguen los pasos indicados anteriormente.

Teniendo los planos, se empieza cortando del conjunto del material cilíndrico con las dimensiones necesarias, para su posterior proceso de torneado. En la figura 4.28 se muestra el corte realizado con la máquina de sierra. El siguiente proceso es el torneado, se realiza un cilindrado eliminando el material hasta obtener el diámetro adecuado. Aparte, en este proceso se obtiene la pequeña pestaña de la rueda, lo cual sirve como agarre para la mordaza del control numérico CNC (figura 4.29). Una vez acabado este proceso se introduce la pieza en la máquina de control numérico para el mecanizado de la rueda. En esta parte para evitar problemas se realiza la simulación utilizando el software Autodesk Fusion 360. Mediante el archivo CAD obtenido en la fase de diseño se realiza la simulación de fabricación de las diferentes ruedas.



Figura 4.28. Corte de material



Figura 4.29. *Proceso de torneado*

Hay que fabricar tres tipos de ruedas, en la cual el proceso del corte y torneado son idénticos para las tres. En cambio, en el mecanizado se utilizan diferentes métodos.

A continuación, podemos ver la simulación de las diferentes ruedas:

- Rueda cilíndrica

El torneado deja al material de la rueda con el diámetro de flanco (figura 4.29), para su posterior mecanizado. Se empieza con el desbaste de la superficie de la rueda que entra en contacto con el carril. A continuación, se le da inclinación al flanco de la rueda. Para el acabado se vuelven a realizar los dos procesos anteriores, pero esta vez con una distancia de paso reducida. Y, por último, se realiza el contorno de la parte superior de la rueda, para obtener dicho ángulo en el vértice. En las siguientes figuras se muestran estos procesos.

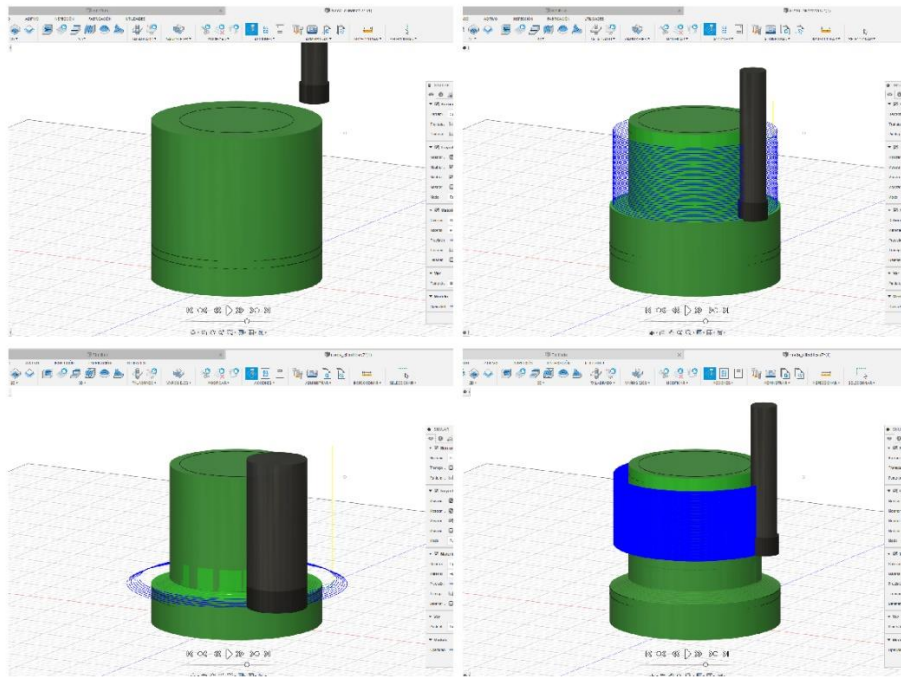


Figura 4.30. Proceso de simulación de la rueda cilíndrica

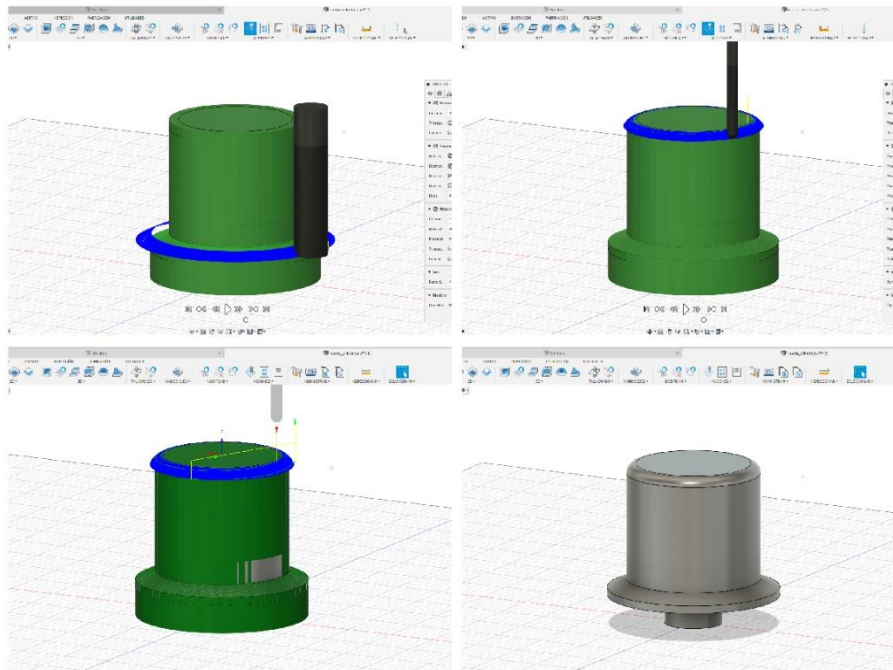


Figura 4.31. Proceso de simulación finalizada

- Rueda de conicidad 1/5

De igual manera que la rueda anterior, el proceso de torneado deja el material con el diámetro del flanco. En el control numérico se empieza con el desbaste de la superficie, pero esta vez la superficie de contacto con el carril tiene una cierta pendiente. El siguiente paso es el desbaste del flanco para dar cierta inclinación, ya que esta rueda también se fabrica con flanco. Por último, para el acabado se realizan otra vez los dos procedimientos anteriores, con una distancia de paso reducida, para obtener una superficie de mejor calidad para la rodadura de la rueda.

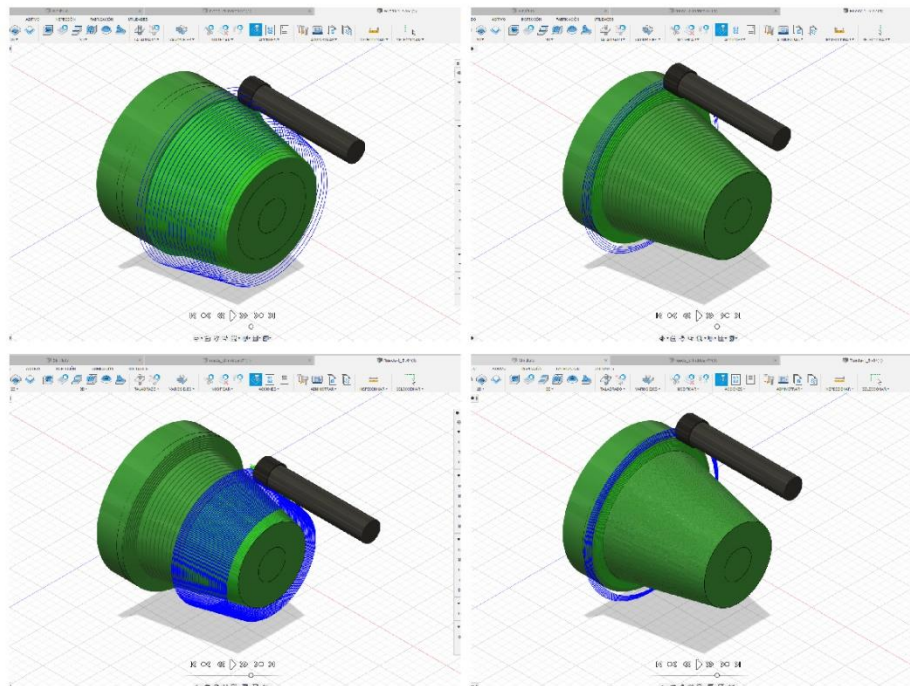


Figura 4.32. Proceso de simulación para la rueda cónica de 1/5

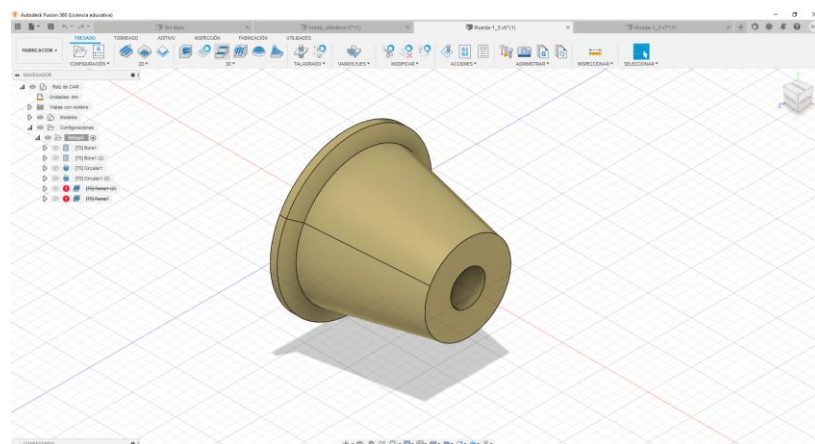


Figura 4.33. Simulación de la rueda final de conicidad 1/5

- Rueda de conicidad 1/3

Para esta rueda, el proceso de torneado proporciona el diámetro del material, igual al diámetro grande, ya que no presenta ningún flanco. El proceso del control numérico empieza con el desbaste de la superficie de rodadura y para el acabo se realiza el mismo proceso con un paso inferior al anterior.

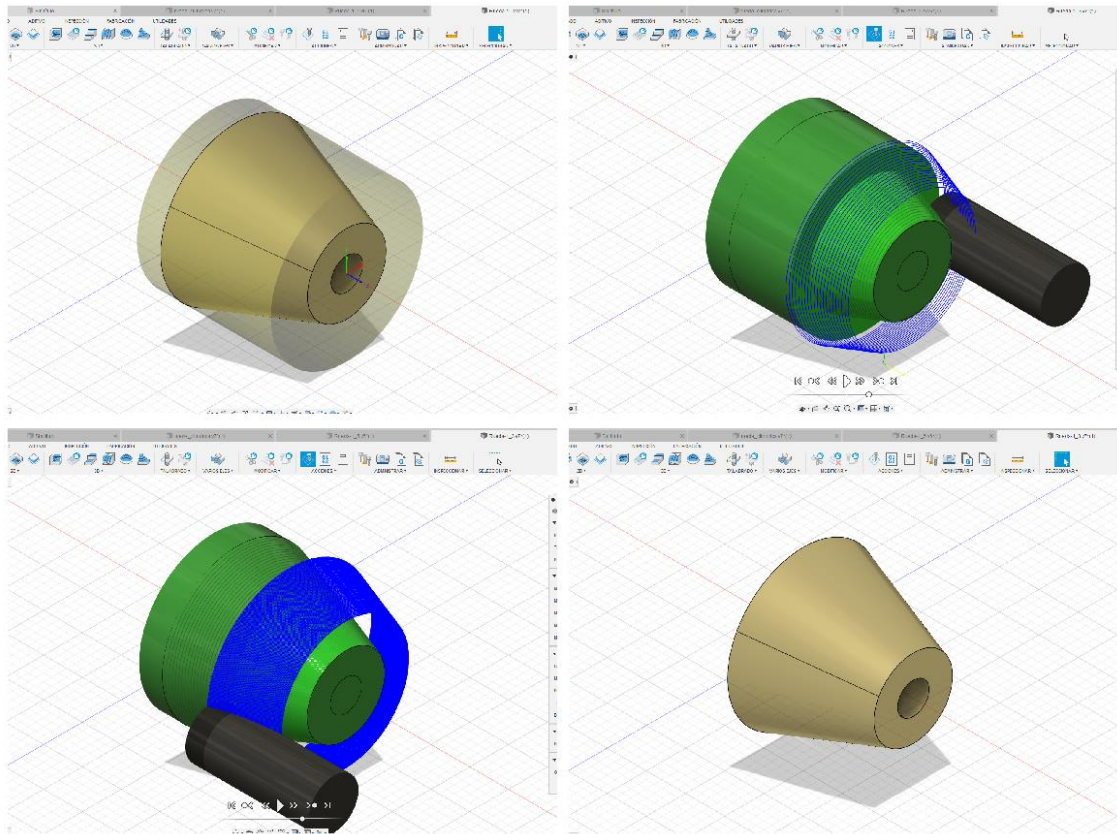


Figura 4.294. Proceso de simulación para la rueda cónica de 1/3

Una vez visto la simulación de las diferentes ruedas, pasamos a realizar el mecanizado en la máquina de control numérico CNC. El proceso se inicia con el taladrado para el eje de la rueda (figura 4.36). Y a continuación, dependiendo del tipo de rueda se realizan los procesos explicados anteriormente.

Para realizar el taladro en la pequeña pestaña que sobresale, se realiza una vez terminado todo el proceso de desbaste y acabado, se utiliza un taladro de Mx4 (figura 4.39).



Figura 4.35. *Proceso de corte*



Figura 4.36. *Proceso de taladrado para el eje*



Figura 4.37. *Proceso de desbaste*



Figura 4.38. *Proceso de acabado*



Figura 4.39. *Proceso de taladrado para el ajuste con el eje*



Figura 4.40. *Proceso finalizado para las ruedas cónicas*

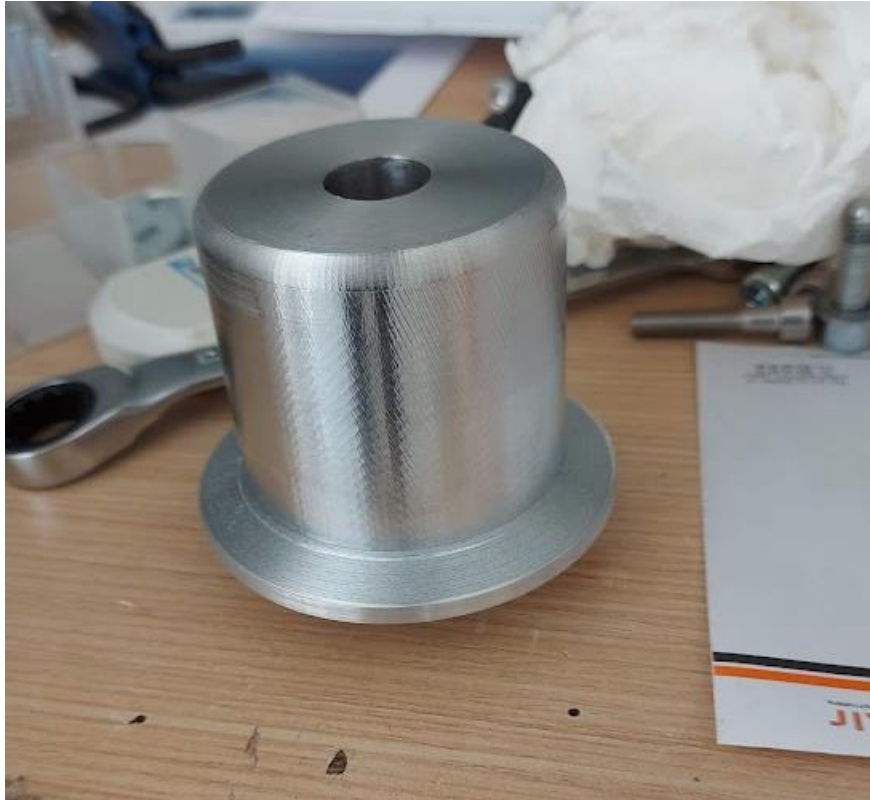


Figura 4.41. *Proceso finalizado para la rueda cilíndrica*

4.6.2. Eje

Para el mecanizado del eje se ha utilizado una barra cilíndrica de diámetro 20mm de aluminio. Se empieza con el proceso de corte con la sierra de cinta, ajustando a las dimensiones adecuadas, seguidamente se introduce en la máquina de control numérico para el mecanizado de los taladros roscados y la superficie donde se encuentran los diferentes taladros. La eliminación del material de la superficie se realiza para suavizar el trabajo del control numérico a la hora de realizar los taladros roscados.

En el control numérico se fija la barra cilíndrica a la mordaza, después se obtiene el centro de la barra, para su posterior proceso de eliminación del material de la superficie y realizar los taladros roscados.

Se fabrican 4 ejes, lo cual para dos ejes se mecaniza el ajuste de dos anillos de retención, estos ejes se utilizan para el sistema de unión de dos ejes.

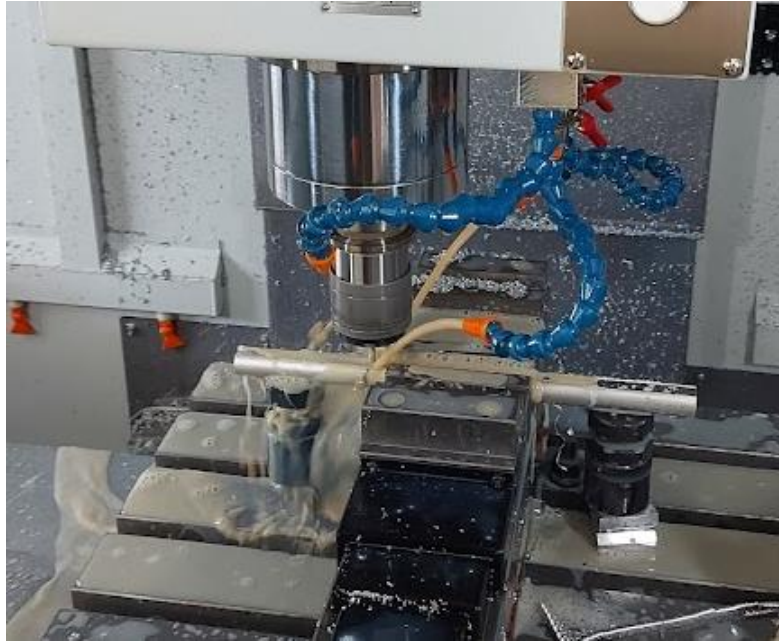


Figura 4.42. *Proceso de eliminación del material en la superficie*

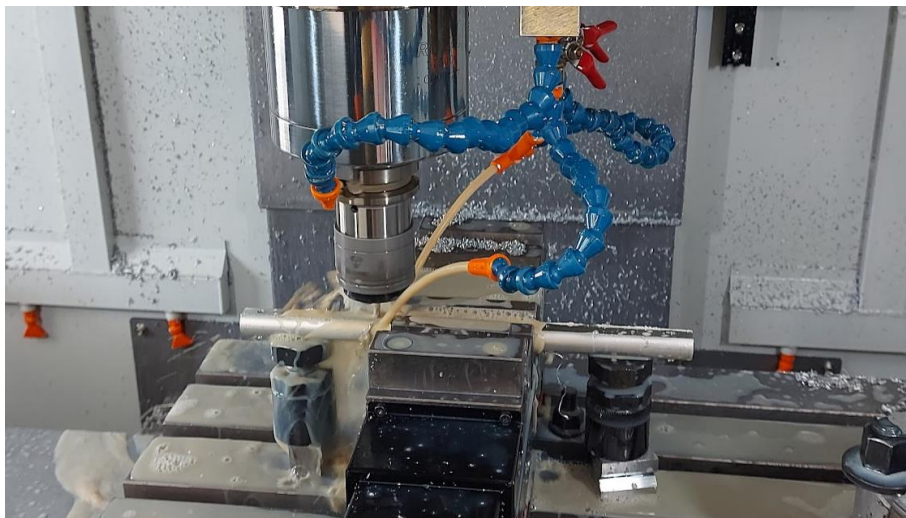


Figura 4.43. *Proceso de taladrado*



Figura 4.44. *Eje*



Figura 4.45. *Eje con ajuste de dos anillos*

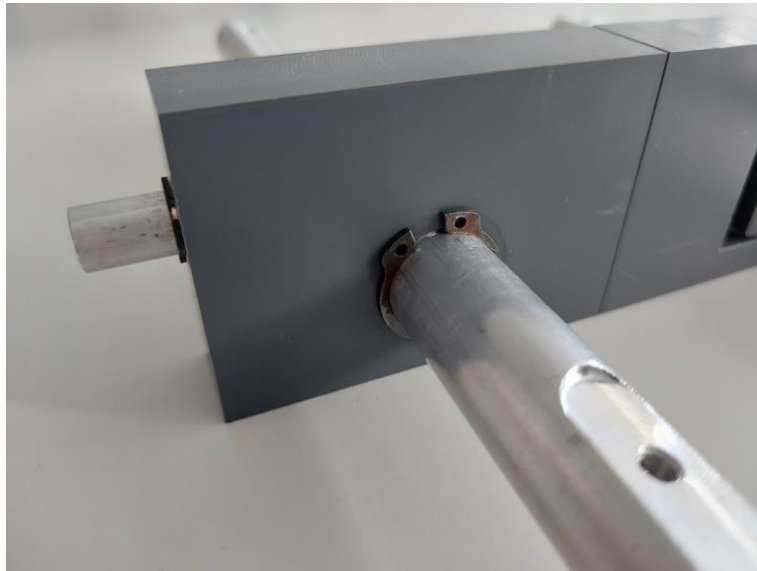


Figura 4.46. *Eje con anillo de retención*

4.6.3. Traviesas

Para la fabricación de las traviesas se utilizan varillas roscadas de diámetro 10mm. Para esta parte el proceso de fabricación es puramente sencillo. A partir de una varilla de 1 m se obtienen varillas de 240 mm, utilizando la máquina de corte. Las varillas no necesitan un mecanizado lateral, porque se colocan en posición transversal a la dirección de los carriles, que van sujetos con tuercas. Por lo tanto, se puede permitir una pequeña variación en la longitud de las traviesas producida en el proceso de corte, debido a que la distancia de la traviesa es suficiente para mantener una distancia de 205 mm entre los carriles.



Figura 4.47. *Varilla roscada*



Figura 4.48. *Traviesa colocada*

4.6.4. Piezas de unión para dos ejes

Para la fabricación de la pieza de unión para dos ejes se realiza con material de PVC. Debido a que se le exigen varios giros en la curvatura.

El primer proceso es el corte del material, a partir de una placa de PVC de 20 mm de espesor. La pieza de unión para dos ejes tiene un espesor de 20mm, por lo tanto, en el mecanizado se realiza el contorno lateral para obtener la medida exacta de la pieza. Esta pieza de unión se divide en 4 piezas, de la cual dos son iguales.

En la figura 4.49 se muestra la primera pieza, la parte superior tiene un taladrado pasante de 10 mm de diámetro, en la cual estará sujeta a la tercera pieza mediante una varilla de aluminio, esta pieza permite girar horizontal y transversal al eje. En la parte lateral donde se observa la varilla, se le realizó un taladrado, pero no es pasante, para introducir la varilla a presión, que sirve para sujetar la segunda pieza.

Para la segunda pieza en el mecanizado se le ha elaborado dos taladros. El taladro central de la pieza es para eje y el taladro pequeño que se situó en la parte lateral sirve para sujetar a la pieza introduciendo la varilla de la pieza anterior y permite el giro transversal. Esta pieza está retenida mediante una anilla de retención de DIN 471 que está mecanizada en la varilla de la pieza anterior. Esta pieza se utiliza para la unión y retención de los dos ejes, por lo tanto, se mecanizan dos piezas.

En la tercera pieza con el proceso de mecanizado se elimina el material, para poder colocar la primera pieza como se muestra en la figura 4.50. En esta pieza también se le han realizado dos taladros, los dos son para sujetar las otras piezas, uno a presión y el otro con una anilla de retención.

En esta parte hay que comentar que se han utilizado tres varillas de aluminio, lo cual dos son iguales y sirven para retener la segunda pieza con anillos de retención, y la tercera sirve para sujetar la pieza primera con la pieza tercera, permitiendo el giro horizontalmente.

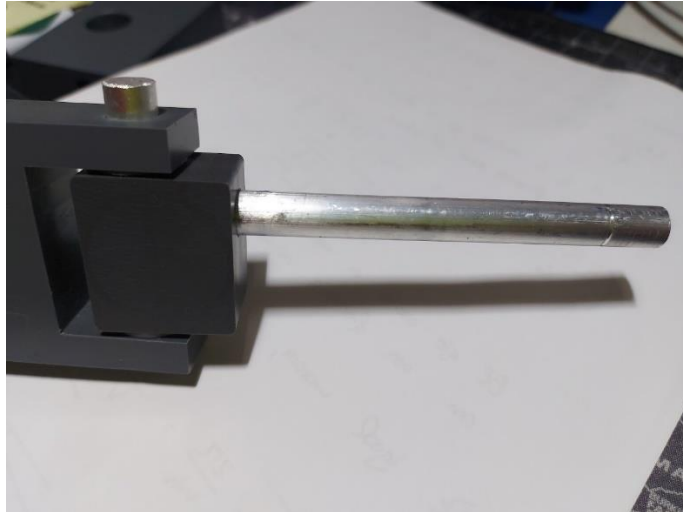


Figura 4.49. *Primera pieza de unión*

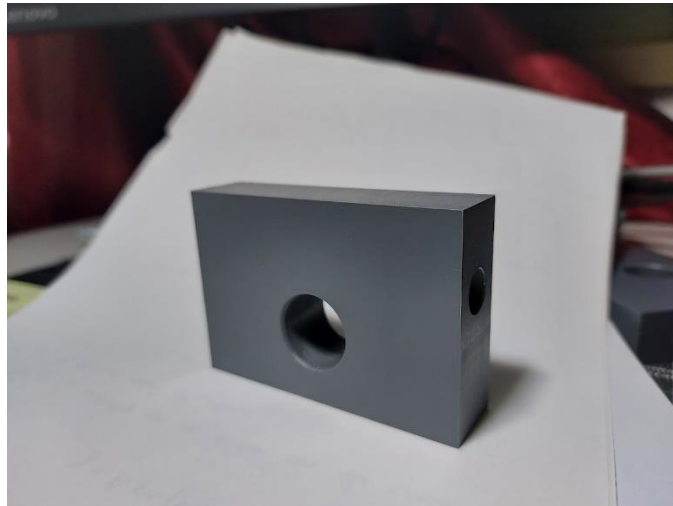


Figura 4.50. *Segunda pieza de unión*

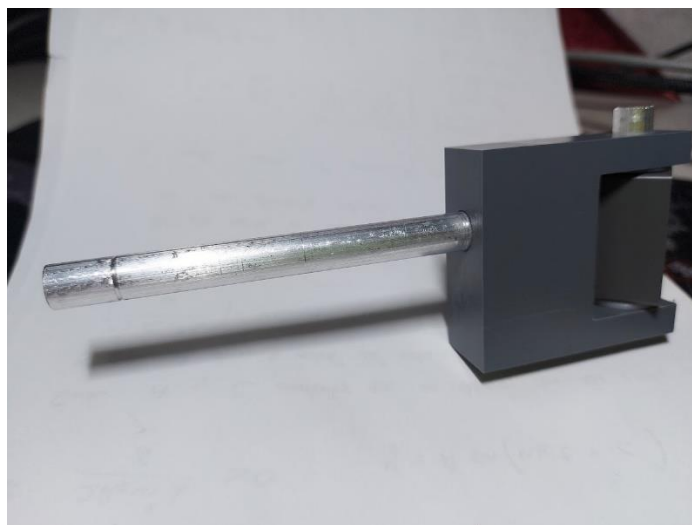


Figura 4.51. *Tercera pieza de unión*

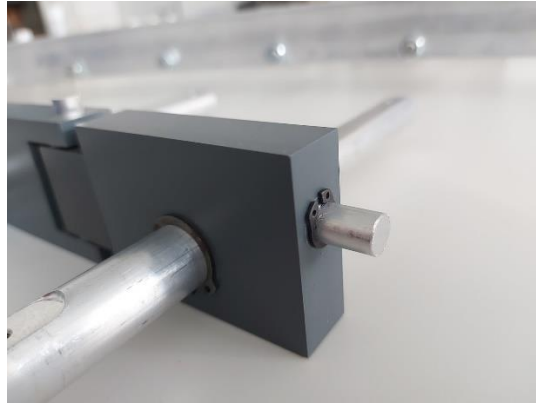


Figura 30. *Retención de la pieza segunda mediante anilla de retención*

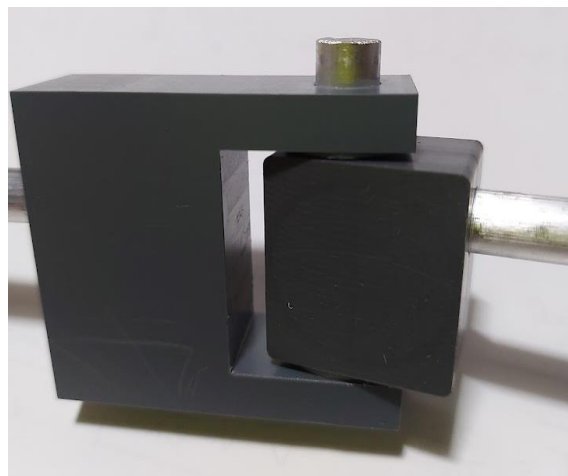


Figura 4.53. *Unión de la primera y tercera pieza*



Figura 4.54. *Pieza de unión de dos ejes*

4.6.5. Sujeciones

Para la fabricación de la pieza de sujeción se han utilizado unas pletinas de ángulo de 40x40x6mm. El proceso se inicia con el corte de la pieza con la longitud necesaria de la pieza de unión. A continuación, se introduce la pieza en el control numérico para realizar los taladros de la pieza, dos para sujetar a las pletinas y el tercer taladro está roscado para utilizar un tornillo para dar pendiente a la vía.

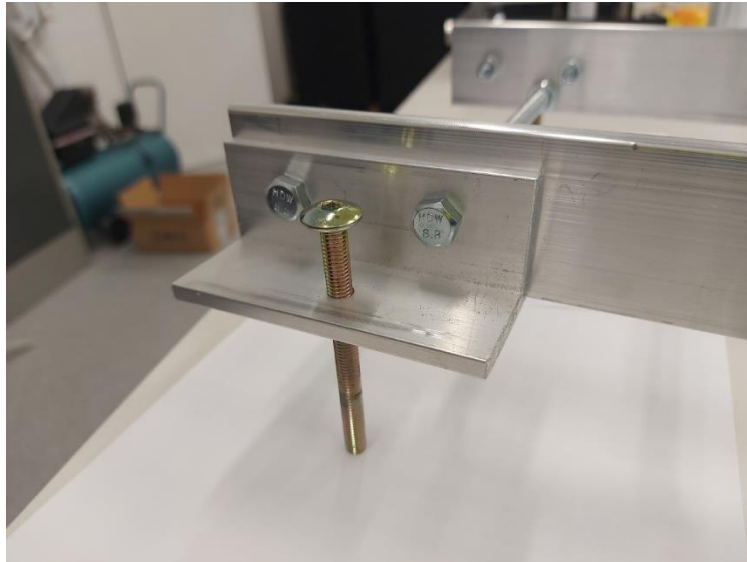


Figura 4.55. *Pieza de sujeción: pendiente a la vía*



Figura 4.56. *Pieza de sujeción*

4.6.6. Carril

Para el proceso de fabricación de los distintos tramos de carriles se han utilizado pletinas de aluminio. Antes de empezar con el procedimiento, hay que destacar que el control numérico CNC solo se puede mover en el eje horizontal una distancia de 0,6m. Para las pletinas que superan esta distancia se ha utilizado un método que consiste utilizar un taladro de la pletina como referencia. Es decir, se empieza trabajando en el inicio de la pletina y se sigue hasta llegar a una distancia adecuada, que será la distancia de un taladro para las traviesas. Y se vuelve a empezar moviendo el carril con la referencia de ese taladro. Aparte en este proceso, se han utilizado los útiles diseñados y fabricados por el técnico, para sujetar estas pletas a la mesa del control numérico. Estos útiles se pueden ver en la figura 4.58

El proceso de fabricación es similar para los tres tipos de carriles, pero para algunas pletinas al acabar se realiza el proceso de plegado. Por lo tanto, se empieza con el proceso de corte, con la longitud necesaria para cada tipo de carril. Después se introduce la pletina en el control numérico para el mecanizado de la parte lateral, para el proceso de taladrado y para obtener la sección de la parte superior del carril escalado de UIC-60. Para este proceso también se ha realizado una simulación en Autodesk Fusion 360, para evitar defectos en la continuidad de la vía. Se utiliza el comando paralelo para el mecanizado de la pletina. Se empieza empleando una pasada a lo largo del carril, y, para el acabado se realiza el mismo proceso con un valor de paso reducido. A continuación, podemos ver los diferentes procesos de simulación y mecanizado.

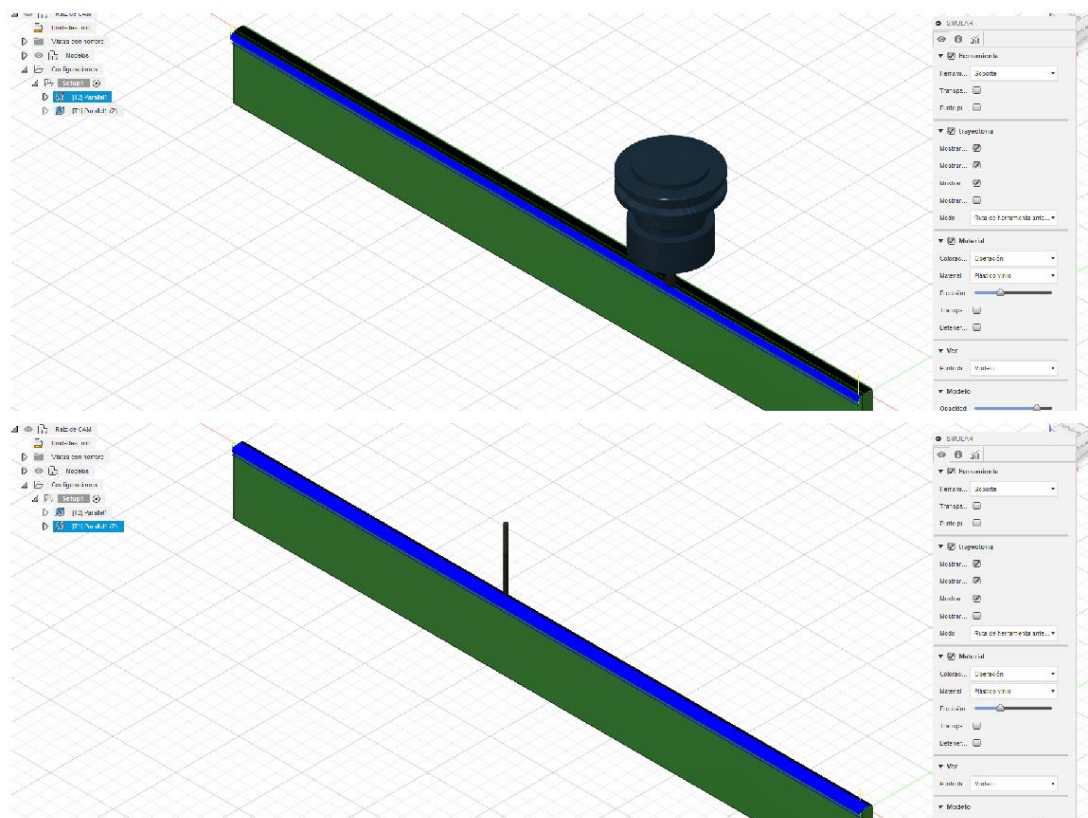


Figura 4.57. Simulación del mecanizado recto de la parte superior del carril

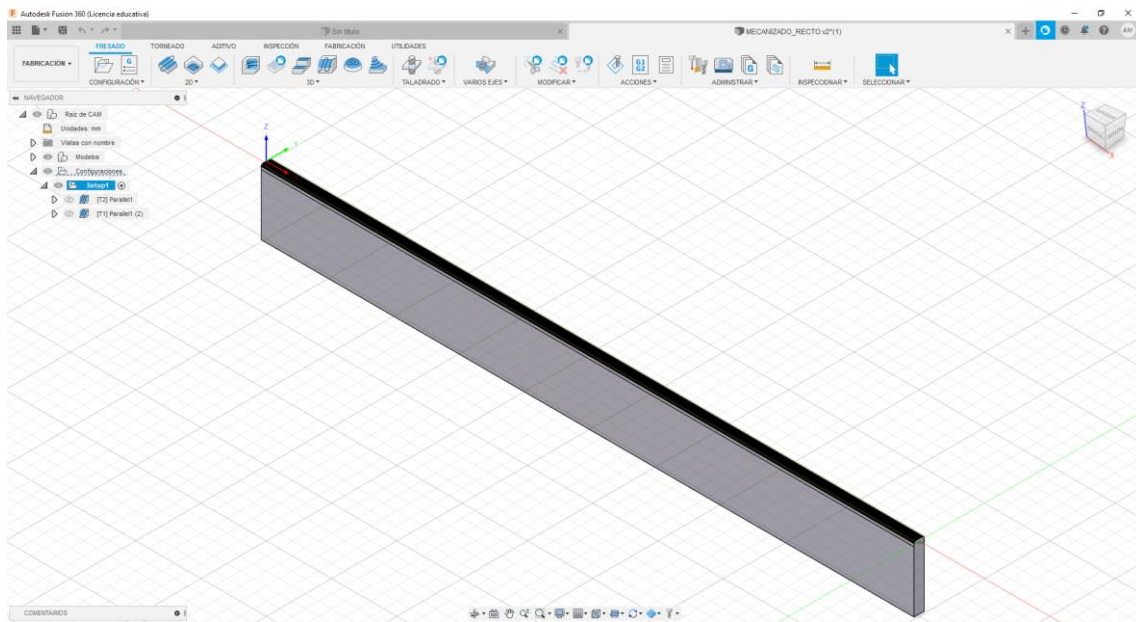


Figura 4.58. Simulación del mecanizado recto

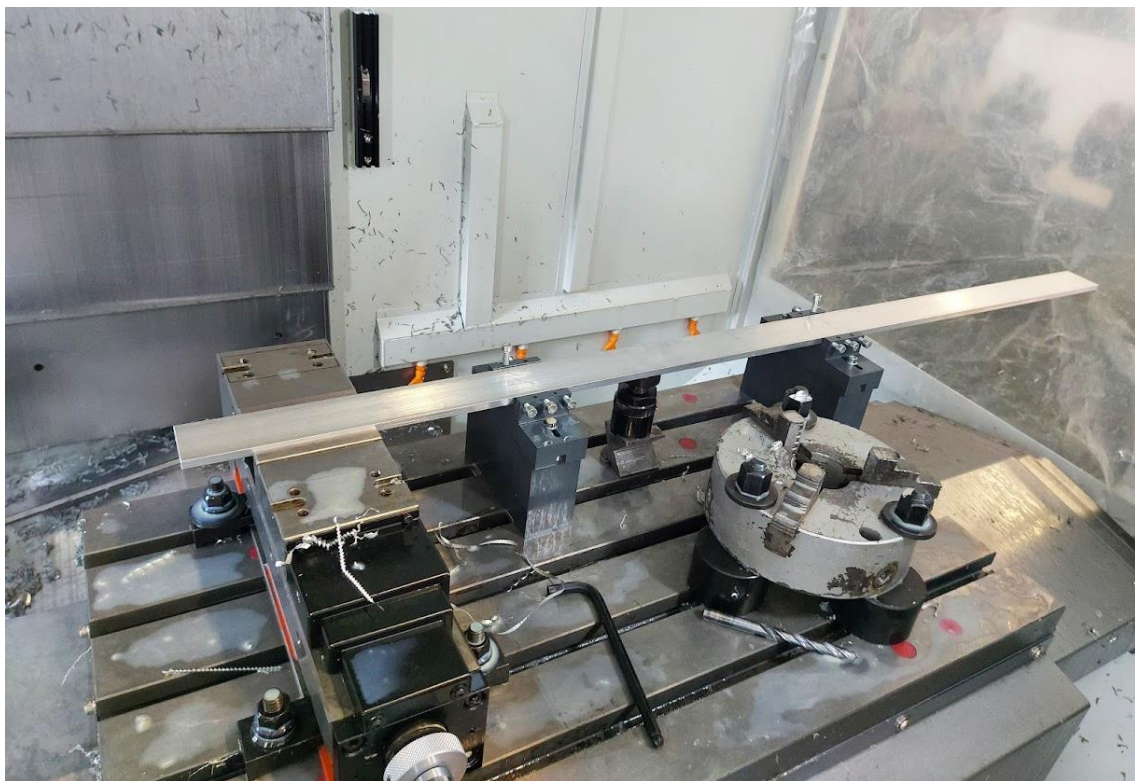


Figura 4.59. Pletina sujeta por los útiles

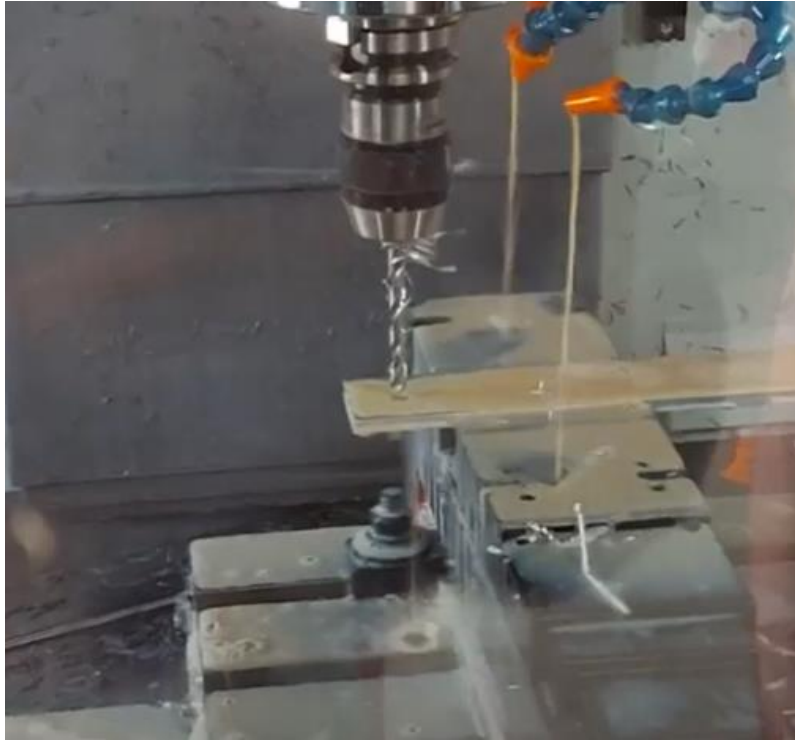


Figura 4.60. *Proceso de taladrado*

Una vez acabado el proceso de mecanizado, las pletinas que se utilizan para la curvatura del carril necesitan un plegado. Para este proceso el personal de laboratorio ha creado un útil de rodamientos para el plegado de las pletinas. Este proceso consiste en poner la pletina en dos rodamientos que están separados a una distancia, en el centro se aplica fuerza con otro rodamiento que va girando mediante una manivela, lo que hará es el desplazamiento de la pletina por los rodamientos intentando dar una curvatura. Por desgracia solo se consigue una pequeña curvatura. Por lo tanto, el proceso de plegado de las pletinas se realizó en una empresa externa. A continuación, se pueden ver en las figuras el sistema de plegado creado por el técnico de laboratorio.



Figura 4.61. Sistema de plegado



Figura 4.62. Sistema de plegado

Después del proceso de plegado por la empresa externa, se encuentran defectos en la pletina curvada. Debido a la distancia entre los rodamientos de la maquina plegadora, los tramos iniciales y finales terminan sin curvatura. Por lo tanto, se escoge un proceso de plegado para esos tramos utilizando la prensa hidráulica. El proceso consiste en situar los rodamientos creados para el proceso anterior, debajo de la pletina y con la prensa hidráulica conseguir una pequeña curvatura a partir de pequeñas presiones, de tal manera que la pletina siga el mismo radio. Los resultados de este proceso son aceptables, por lo que presentan un radio conforme en todo el tramo.



Figura 4.63. Proceso de plegado con prensa hidráulica

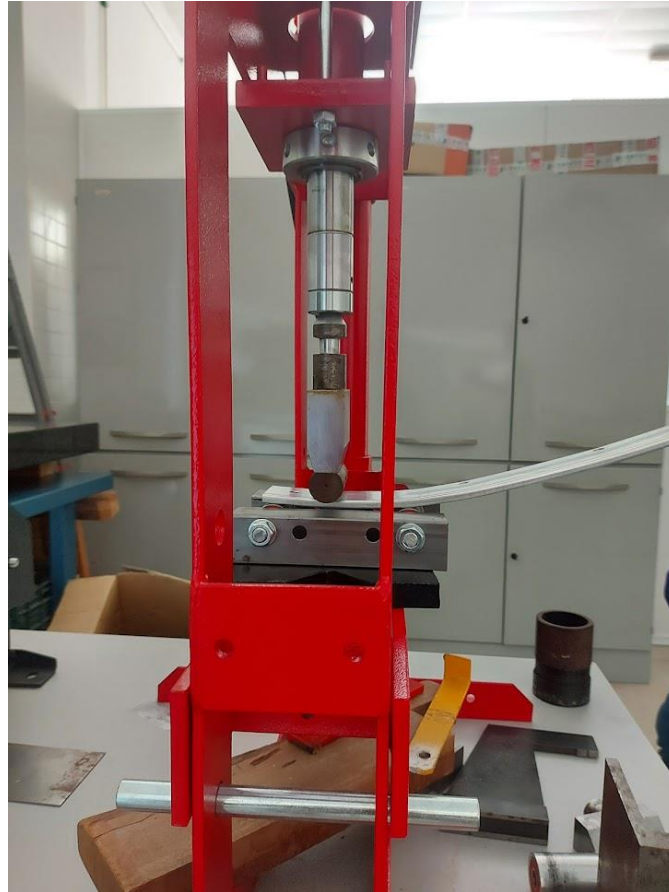


Figura 4.64. *Proceso de plegado con prensa hidráulica, vista lateral*

4.7. Montaje del proyecto

Una vez completados el proceso de diseño y fabricación, se ha procedido al montaje del sistema de guiado ferroviario. Para las uniones se ha utilizado el método de tornillería y también se utilizan tornillos relativamente altos para la pendiente.

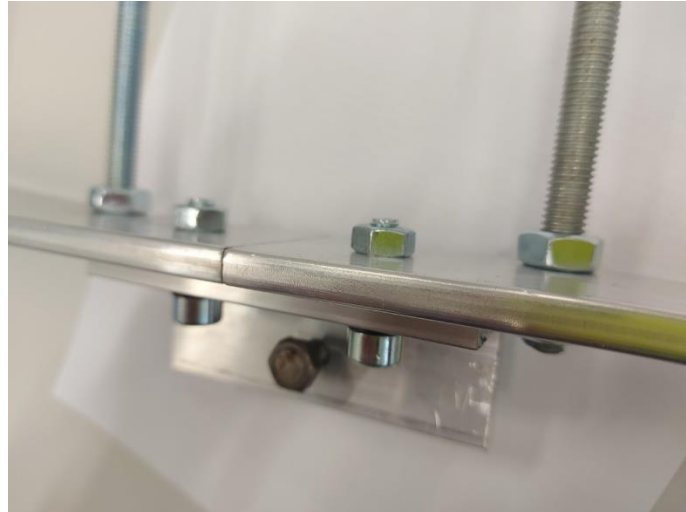


Figura 4.65. *Unión entre traviesa y carril*



Figura 4.66. *Unión de dos carriles*



Figura 4.67. *Pendiente al sistema*



Figura 4.68. *Unión entre la rueda y carril*

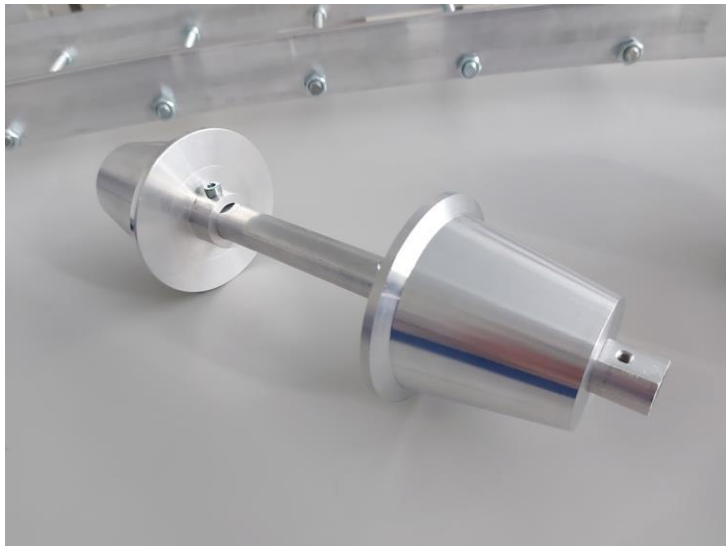


Figura 4.69. *Eje montado*



Figura 4.70. *Pieza de unión para dos ejes montados*



Figura 4.71. Montaje final del sistema de guiado



Figura 4.72. Sistema de guiado con eje montado

5. Valoración Económica

Para la valoración económica se ha utilizado el programa Microsoft Excel. Se tiene en cuenta las horas de la maquinaria utilizada para el mecanizado, el coste del material y coste adicionales.

Para el proceso de mecanizado han sido 60 horas de trabajo, la mano de obra de la maquinaria son 20€/h, por lo tanto, el coste de la maquinaria son 12000€ (tabla5).

Se han comprado pletinas de 50x8 mm, barras cilíndricas de 100 mm de diámetro para las diferentes ruedas, pletina en forma de ángulo de 40x40x6 mm, barra cilíndrica de 20 mm de diámetro para los ejes, varillas roscadas de 10 mm para las traviesas y toda la tornillería. En la tabla 5.2 se muestra el precio total de todo el material.

Las pletinas que son aplicadas para los tramos de giro, se le ha realizado un proceso de plegado fuera de la Universidad. Son 4 pletinas, el coste por cada pletina ha sido de 25€.

Para finalizar, el valor económico del proyecto viene dado por 2.002,33€

Tabla 5.1. Mano de obra de CNC

TIEMPOS DE MECANIZADO CNC			
FECHA	MINUTOS	HORAS	MECANIZADO
09/06/2021	360	6:00:00	Ruedas
10/06/2021	360	6:00:00	Ruedas
11/06/2021	360	6:00:00	Ruedas
14/06/2021	360	6:00:00	Ruedas
15/06/2021	360	6:00:00	Pieza de union1-2-3 y ejes
17/06/2021	120	2:00:00	Sujeciones
17/06/2021	240	4:00:00	Útiles suplemento mordaza
18/06/2021	240	4:00:00	Útiles suplemento mordaza
21/06/2021	360	6:00:00	Taladros raíles
22/06/2021	240	4:00:00	Suplementos pletinas mordazas
23/06/2021	600	10:00:00	Perfil recto
	3600	60	
			TOTAL
Mano de obra de CNC		20€/h	1.200,00 €

Tabla 5.2. Valoración Económica

Material					
Elemento	Medida (m)	Cantidad	Cantidad Oferta	Precio	Total
Barra Cilindrica 100mm	1,00				350,00 €
Tornillería					30,00 €
Pletina de 50x8	6,05	2	12,10	7,02	84,94 €
Barra redonda	3,00	1	1,00	17,85	17,85 €
Angulo 40x40	6,05	1	6,05	7,79	47,13 €
Varillas roscadas de 10mm	1	8		7,64	61,12
Costes adicionales			IVA 21%		111,28 €
Plegado de las pletinas	100,00 €		TOTAL		702,33 €
		TOTAL			2.002,33 €

6. Resultados

Para obtener la solución cinemática de Klingel para las distintas conicidades se ha empleado el programa Matlab. A partir de la ecuación del movimiento de lazo y de la oscilación cinemática se obtiene una figura que muestra las oscilaciones cinemáticas para las diferentes conicidades de ruedas. A continuación, se muestra el código de Matlab empleado para obtener dichas figuras, el cual está compuesto por dos archivos:

- Klingel movement.m

El archivo “Klingel movement.m” se encarga de establecer los parámetros del modelo, como son el radio y conicidad de la rueda, la velocidad angular del eje, o el ancho de la vía. Después, se realiza la integración numérica de la ecuación diferencial mediante la función ode45, la cual llama al segundo archivo “ecDAE.m” con los parámetros definidos y con unas condiciones iniciales de 1 mm de desplazamiento lateral del eje. El código de este archivo se muestra en la figura 6.1.

```
clear all
close all

global datos
datos.R0 = 0.0625/2;      %radio nominal 1/5
% datos.R0 = 0.075/2;      %radio nominal 1/3
datos.w = 10;             %velocidad angular, (NO INTERVIENE EN KLINGEL)
datos.lambda = 1/5;       %conicidad
datos.G = 0.205;          %distancia entre puntos de contacto
tend = 5;                 %tiempo de simulacion

Lk = 2*pi*sqrt(datos.R0*datos.G/2/datos.lambda); %Longitud de onda de Klingel

[t z] = ode45(@(t, z) ecDAE(t, z), [0 tend], [0.001 0.00]');

figure, plot(t, z(:,1), 'b'), legend('lateral displacement')
% hold on, plot(t, z(:,1), 'rx')
title('Movimiento de lazo para conicidad 1/5')
xlabel('eje x')
ylabel('eje y')
% axis([0 tend -0.001 0.001])

% figure, plot(t, z(:,1)*1000, 'b', t, z(:,2)*1000, 'r'), legend('Desplazamiento lateral', 'Velocidad lateral')
% xlabel('t (s)'), ylabel('y (mm), dy (mm/s)')
```

Figura 6.1. Código Matlab del archivo “Klingel movement.m”

- ecDAE.m

El archivo ecDAE.m es el que transforma la ecuación diferencial de segundo orden de Klingel en una ecuación diferencial ordinaria (ODE) mediante transformación de coordenadas para poder ser integrada numéricamente mediante el integrador de Matlab ode45. El código de esta función se muestra en la figura 6.2.

```
function zp = ecDAE(t,z)
    global datos

    yp = z(1);
    y = z(2);

    % A = 2*datos.R0*datos.w^2*datos.lambda/datos.G;
    A = 2*datos.lambda/datos.G/datos.R0;

    M = [0 -A; 1 0];

    zp = M*z;
end
```

Figura 6.2. Código Matlab del archivo “ecDAE.m”

Los archivos anteriores se ejecutan para tres tipos de ruedas cuyos resultados se muestran a continuación: ruedas con conicidad positiva, negativa y nula.

- Ruedas con conicidad positiva

Para la conicidad positiva hay dos distintas conicidades. El movimiento de lazo de la conicidad 1/3 viene dada por la figura 6.3. Y para la conicidad 1/5 la figura 6.4.

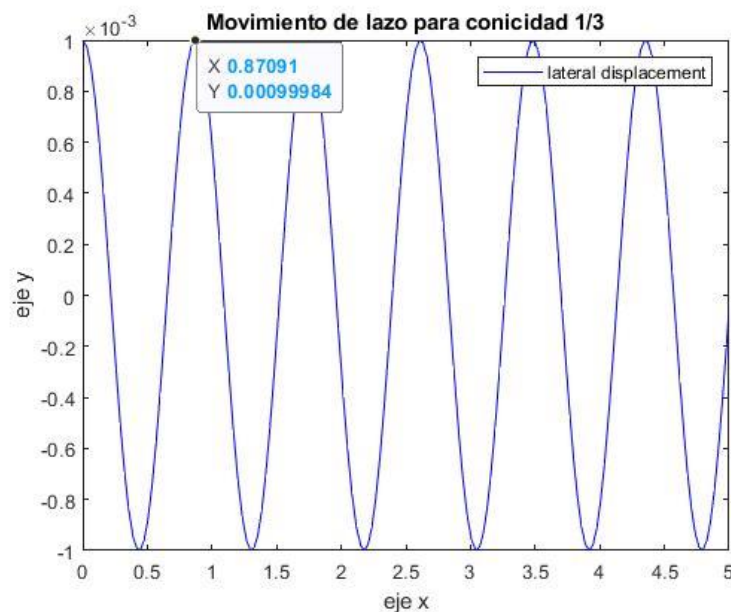


Figura 6.3. Movimiento de lazo para conicidad 1/3

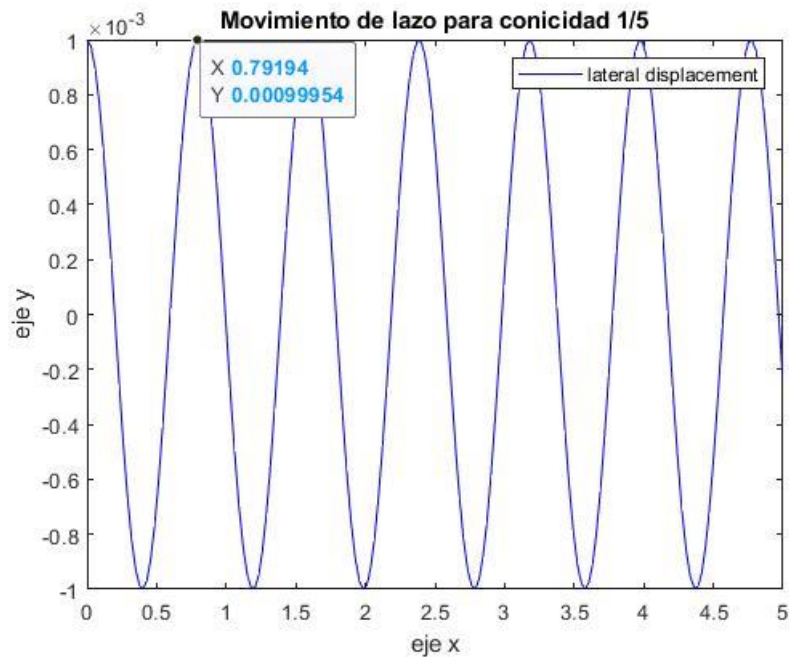


Figura 6.4. Movimiento de lazo para conicidad 1/5

- Rueda con conicidad nula

Para esta conicidad el movimiento de lazo es nulo, por lo tanto, solo presenta un movimiento recto.

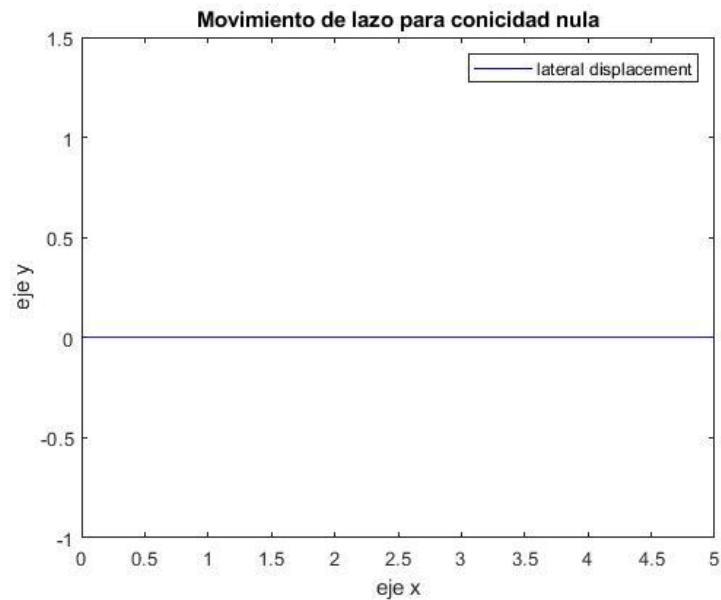


Figura 6.5. Movimiento de lazo para conicidad nula

- Rueda con conicidad negativa

Para este tipo de rueda el movimiento de lazo aumenta respecto al tiempo exponencialmente, debido a que la conicidad es negativa.

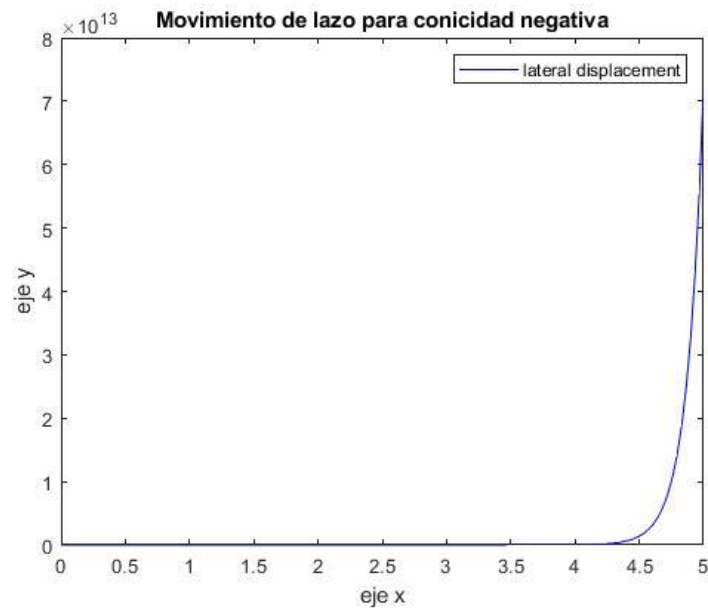


Figura 6.6. *Movimiento de lazo para conicidad negativa*

7. Conclusiones

Como se ha podido observar a lo largo del proyecto, el movimiento de lazo influye en muchos aspectos para el sistema ferroviario. Se ha intentado dar una visión general de todos los elementos y teorías que rodean el movimiento de lazo, centrandose en la teoría de Klingel.

Después de realizar ensayos experimentales, se puede concluir que la teoría de Klingel es un fenómeno correcto. A diferencia de conicidades negativas, las ruedas con conicidades positivas elaboran un movimiento de oscilaciones estables.

Para el proceso de fabricación se han encontrado varios problemas a la hora de realizar el mecanizado en el control numérico, debido a las vibraciones que aparecen durante el proceso. Por lo tanto, se ha procedido a diseñar y fabricar varios útiles para la mordaza del control numérico CNC.

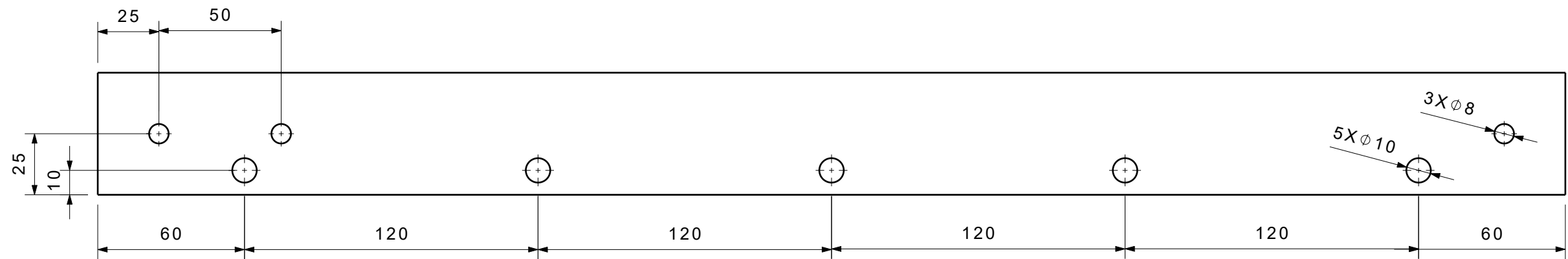
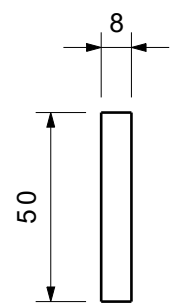
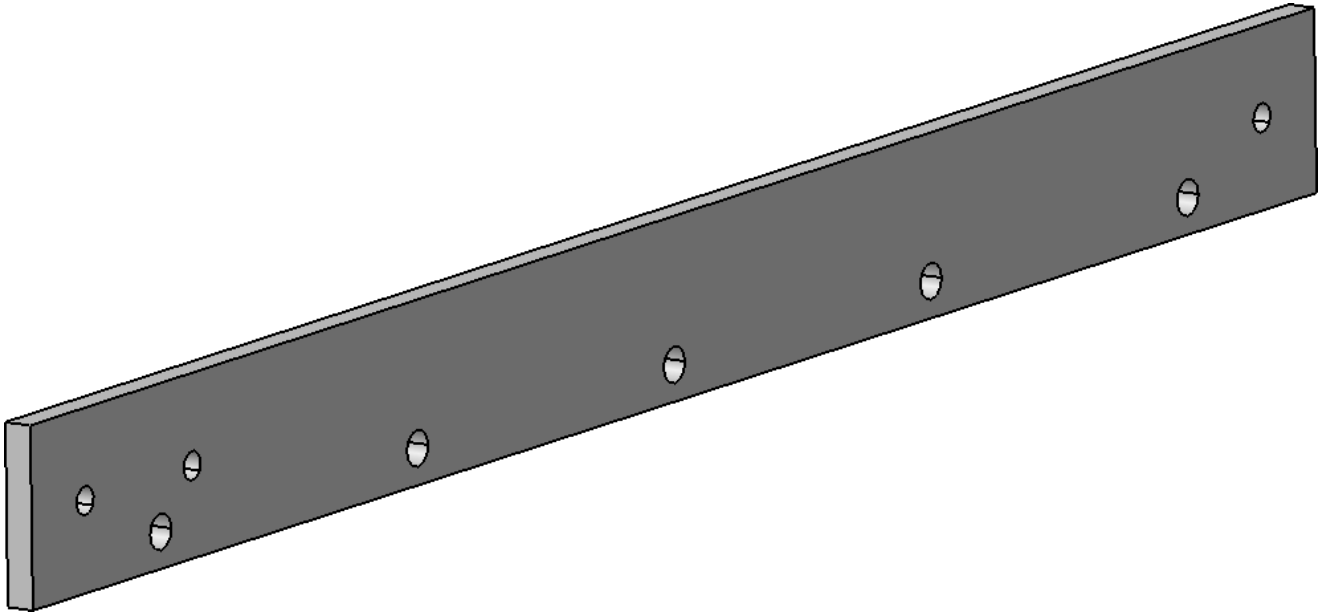
Al realizar el montaje del eje ferroviario se han encontrado defectos con la pieza de unión para dos ejes. Dicha pieza no cumple con las funciones que se esperan de él, no permite que los dos ejes montados giren horizontalmente respecto a la vía, y también para que la pieza circule sobre el carril necesita una mayor pendiente y una pequeña fuerza de empuje. Esto ocurre, debido a que existe mayor fuerza de rozamiento entre la pieza y el eje. Una solución sería volver a diseñar la pieza empleando rodamientos.

8. Bibliografía

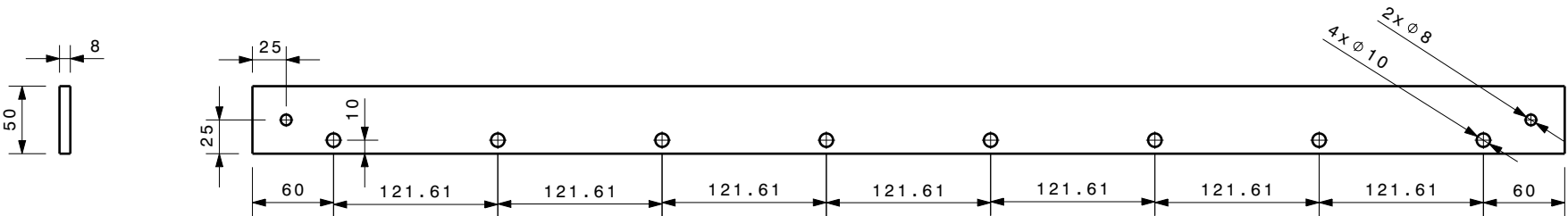
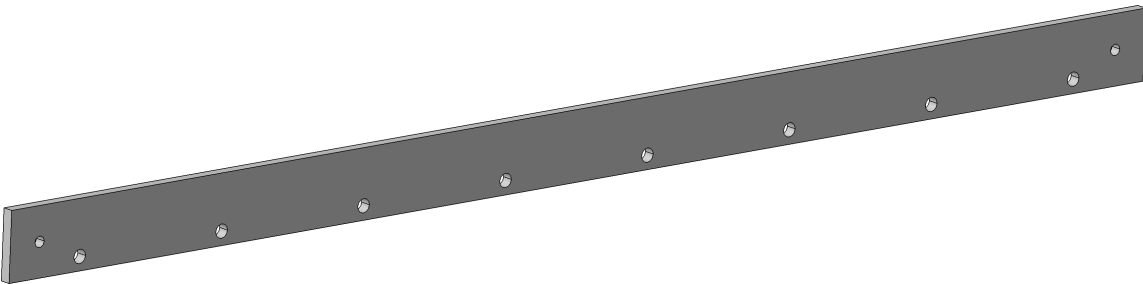
- [1] Andrés López Pita, *Infraestructura ferroviarias*, Primera edición, Mayo de 2006.
- [2] María José Cano Adán, *Análisis de Registros de Aceleraciones Verticales en Caja de Grasa y Correlación con la Infraestructura*, Tesis doctoral, Universidad de Madrid, 2015.
- [3] Javier Fernández Aceituno, *Multibody modeling of railway vehicles and experimental validation*, Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Enero 2016.
- [4] F. Javier González Fernández; Julio Fuentes Losa, *Ingeniería Ferroviaria*, Segunda edición, 2010.
- [5] Ramón Sevillano Queipo de Llano, *El consumo de madera de Renfe y sus consecuencias ecológicas*, Artículo publicado el 14 de octubre 2019.
- [6] F. Javier Calvo Poyo, Rafael Jurado Piña, José Lorente Gutiérrez, Juan de Oña López. *Ferrocarriles*. Primera edición. Universidad de Granada, 2011.
- [7] *Instrucción para el Proyecto y Construcción de Obras Ferroviarias, IF-3. Vía sobre Balasto. Cálculo de Espesores de Capas de la Sección Transversal*. Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, Ministerio de Fomento.
- [8] ORDEN FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.–Balasto y 7. –Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF).
- [9] IWNICKI, S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor & Francis Group, LLC. London: CRC Press. May 2006. 1ª Edición.
- [10] Álvarez Mántaras, Daniel; Luque Rodríguez, Pablo. *Ingeniería e infraestructura de los trasportes*. Oviedo: Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones, 1º Edición, 2003.
- [12] Ahmed A. Shabana; Khaled E.Zaaza; Hiroyuki Sugiyama; *Railroad Vehicle Dynamics, A Computational Approach*; 2008 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [13] Coenraad Esveld; *Modern Railway Track*; Digital Edition 2016, versión 3.8.

9. Anexos

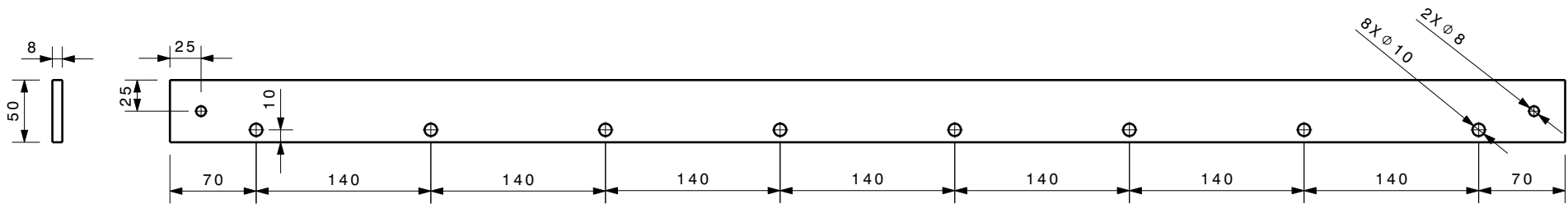
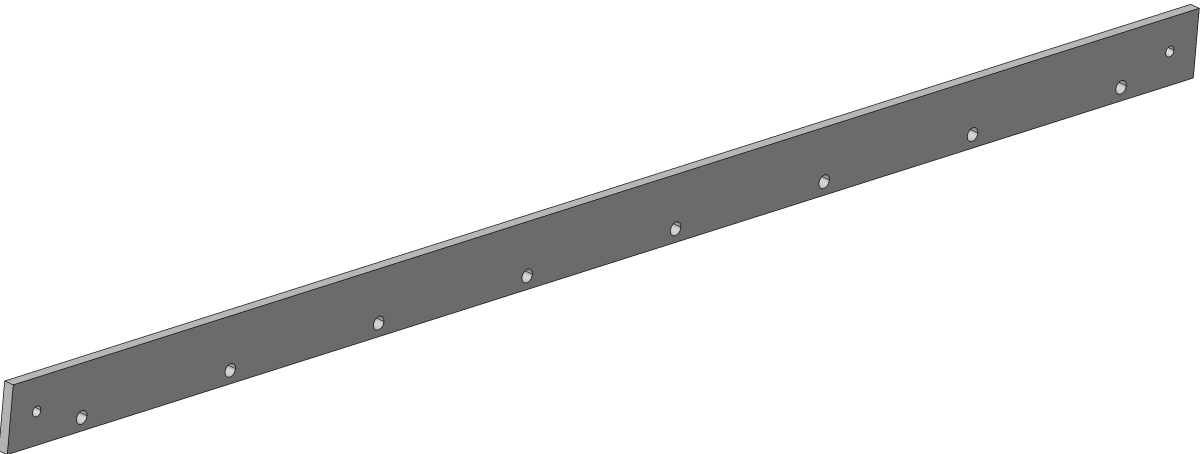
9.1. Anexos Planos



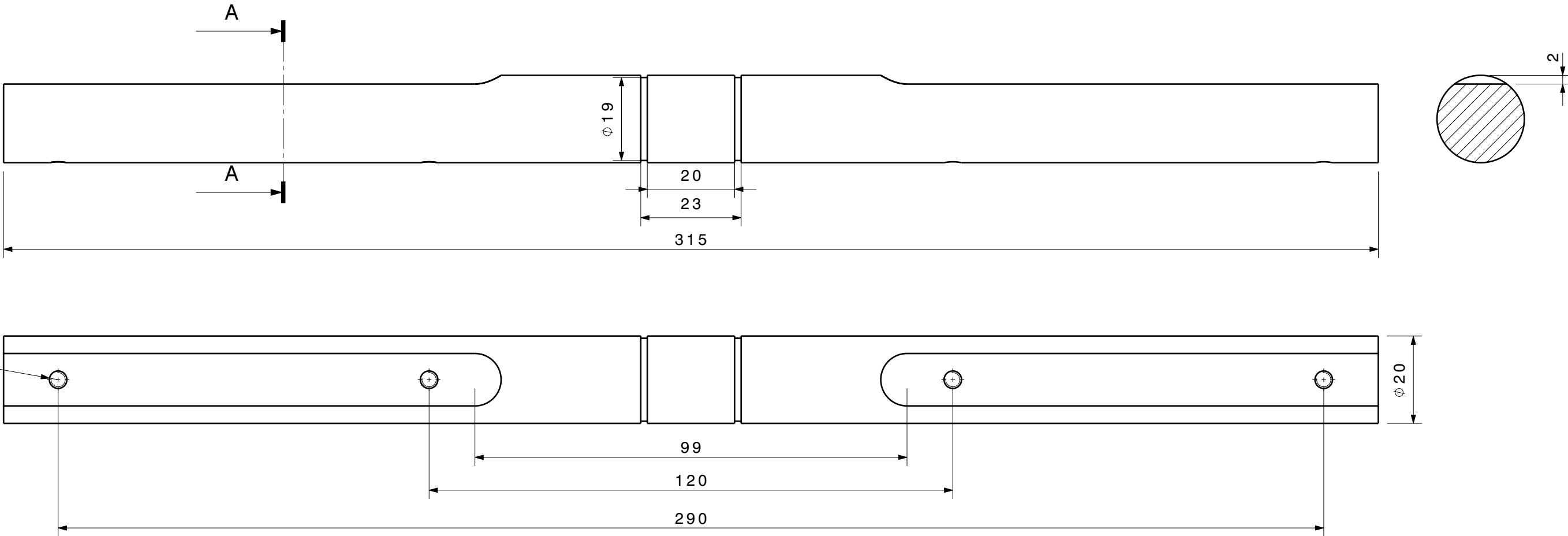
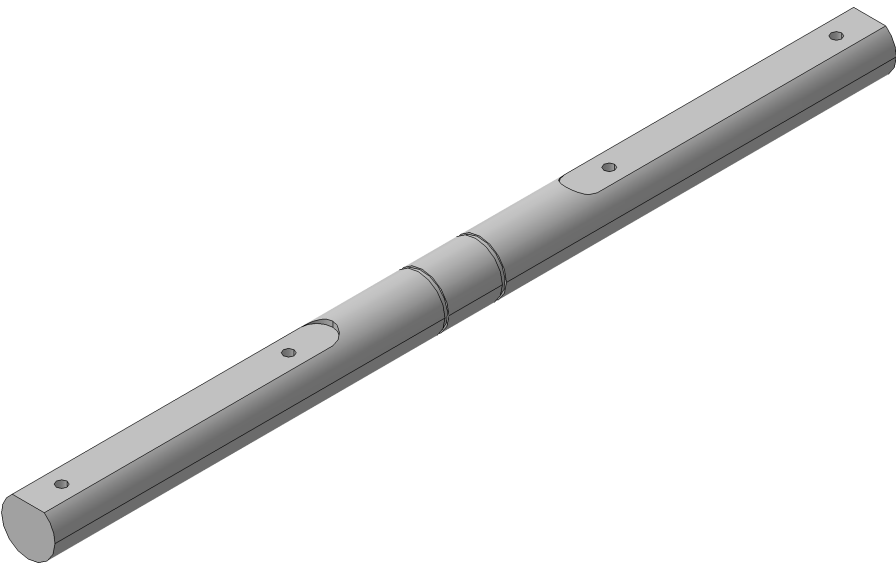
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO	
1:2				1/12	
Formato A3				SUSTITUYE A	
				SUSTITUIDO POR	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO	
1/5				2/12	
Formato A3				SUSTITUYE A	
				SUSTITUIDO POR	

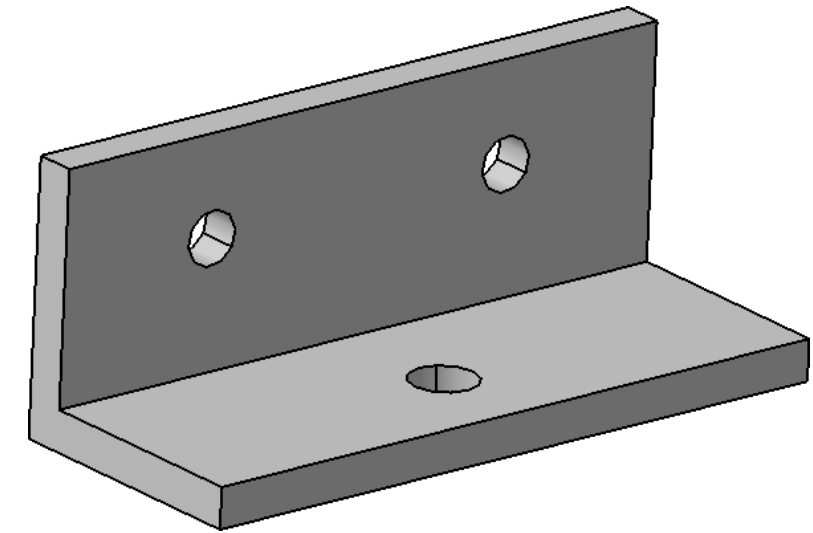
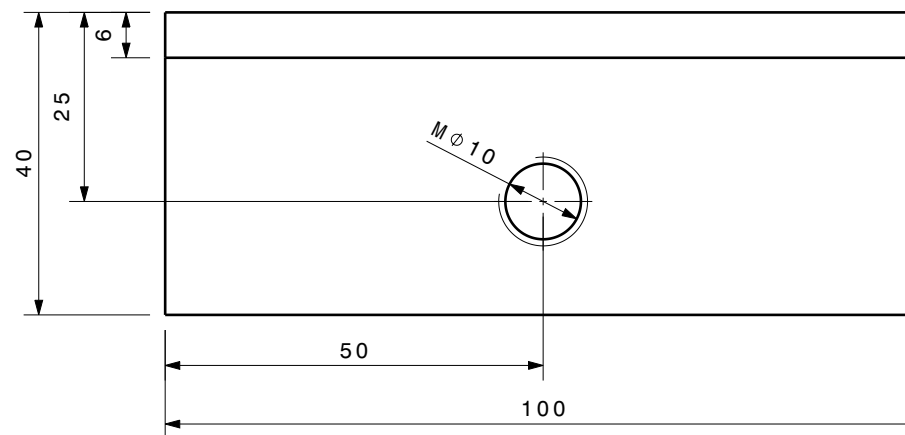
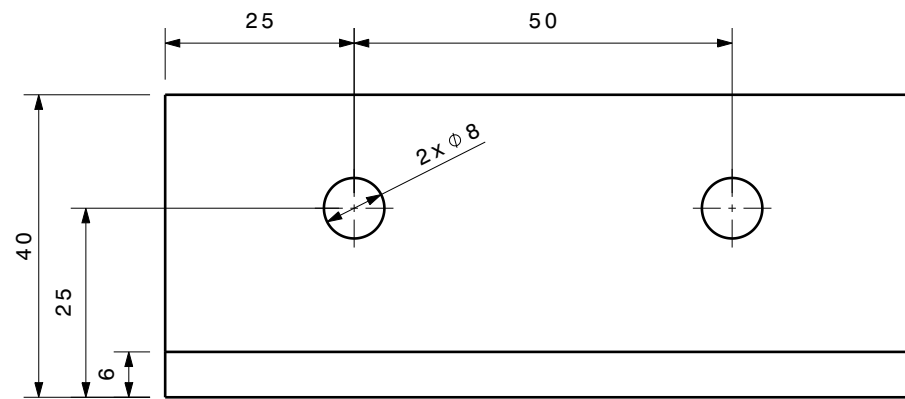


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO Carril 3			Nº PLANO 3/12	
1/5				SUSTITUYE A	
Formato A3				SUSTITUIDO POR	

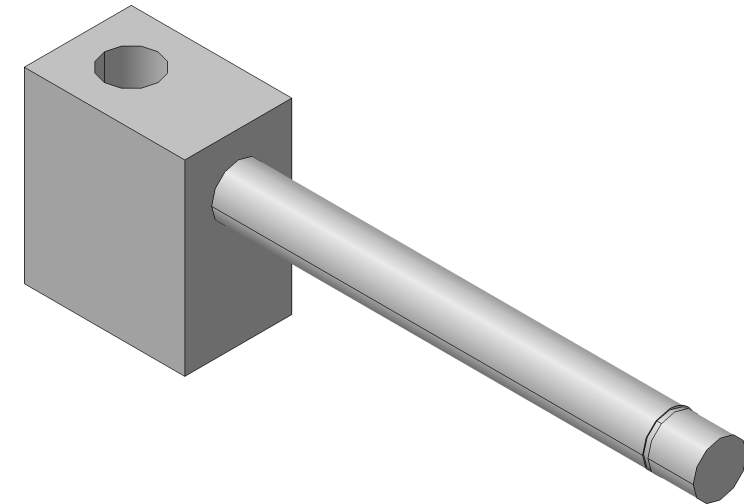
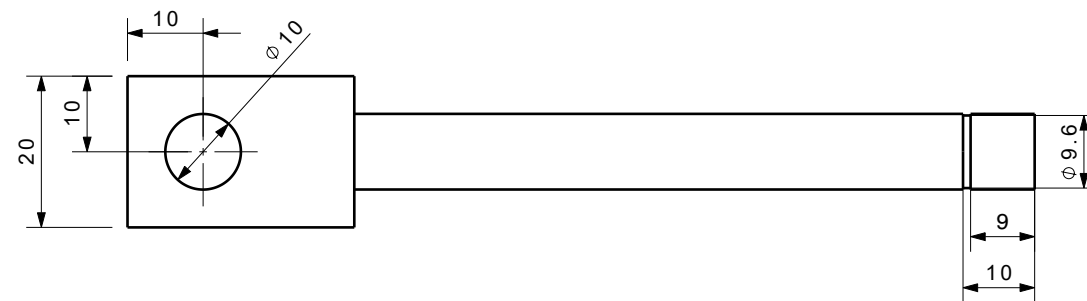
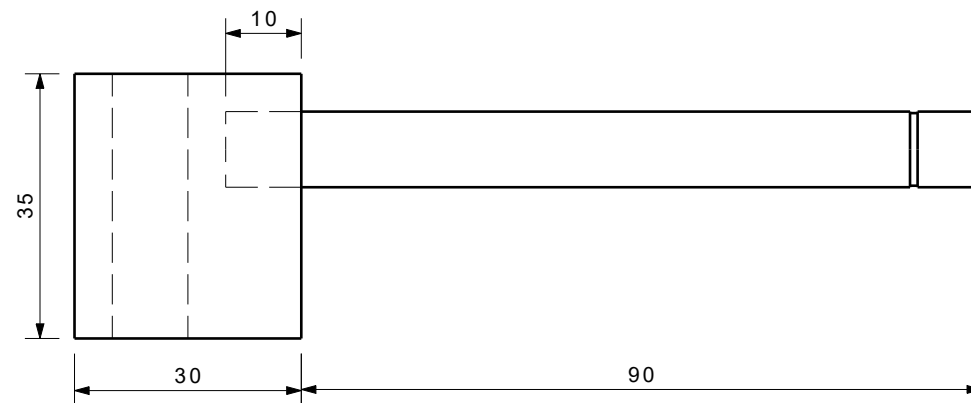
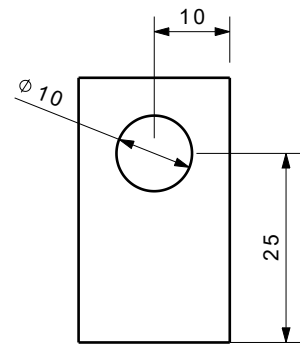


M 4 x 0.7

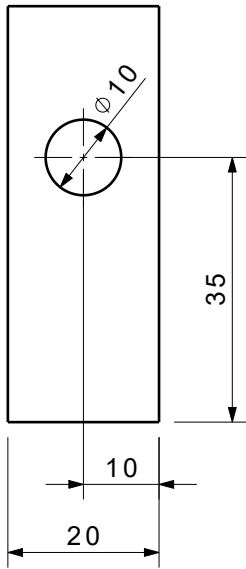
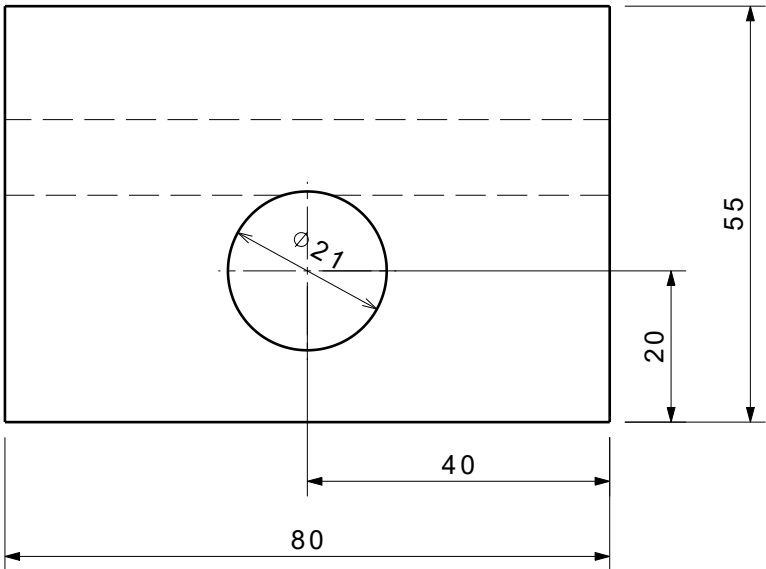
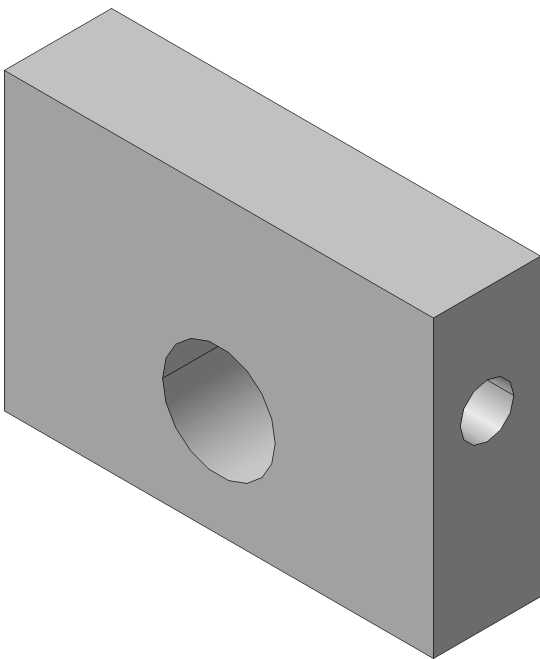
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		ABdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO 4/12	
1/1				SUSTITUYE A	
Formato A3				SUSTITUIDO POR	



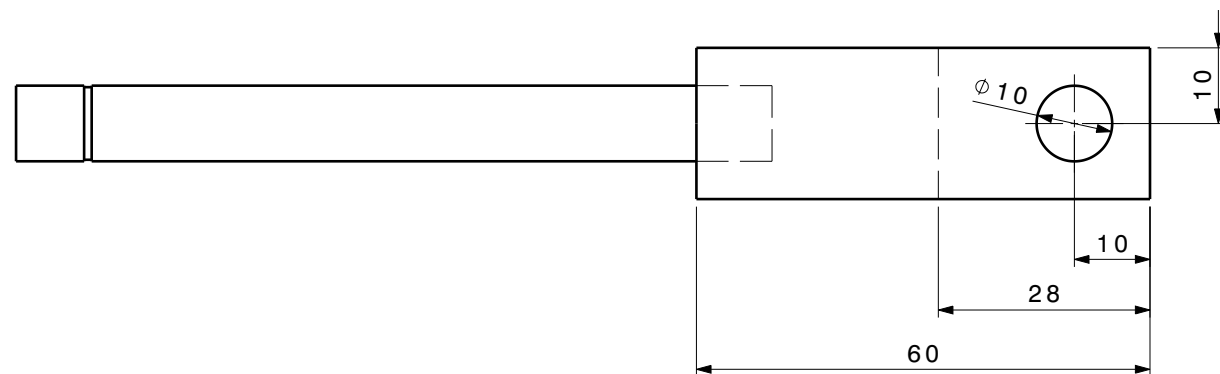
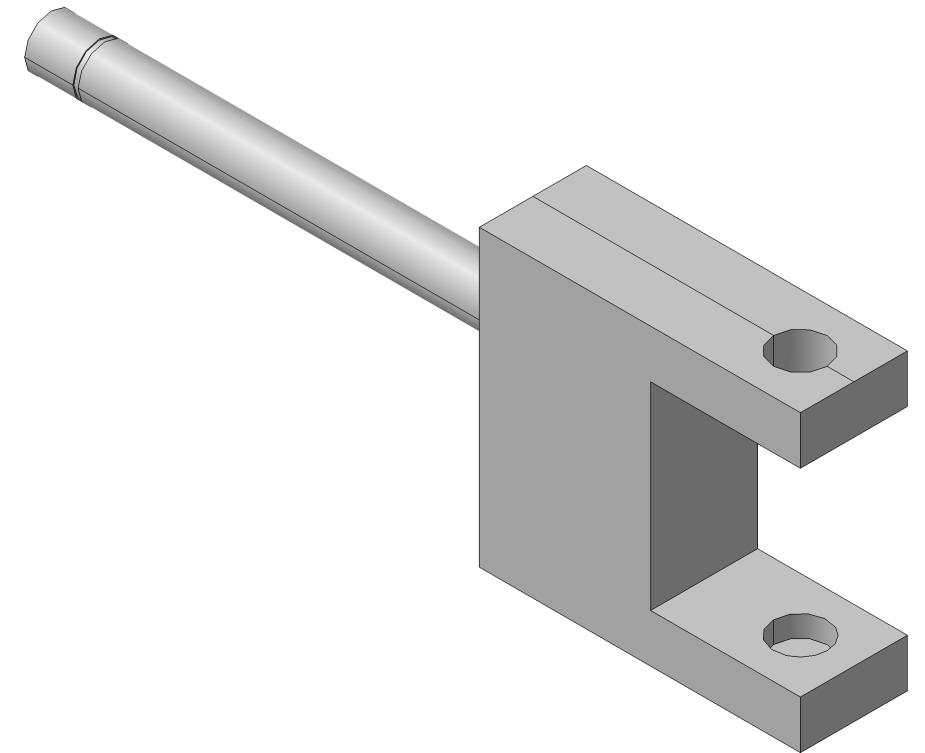
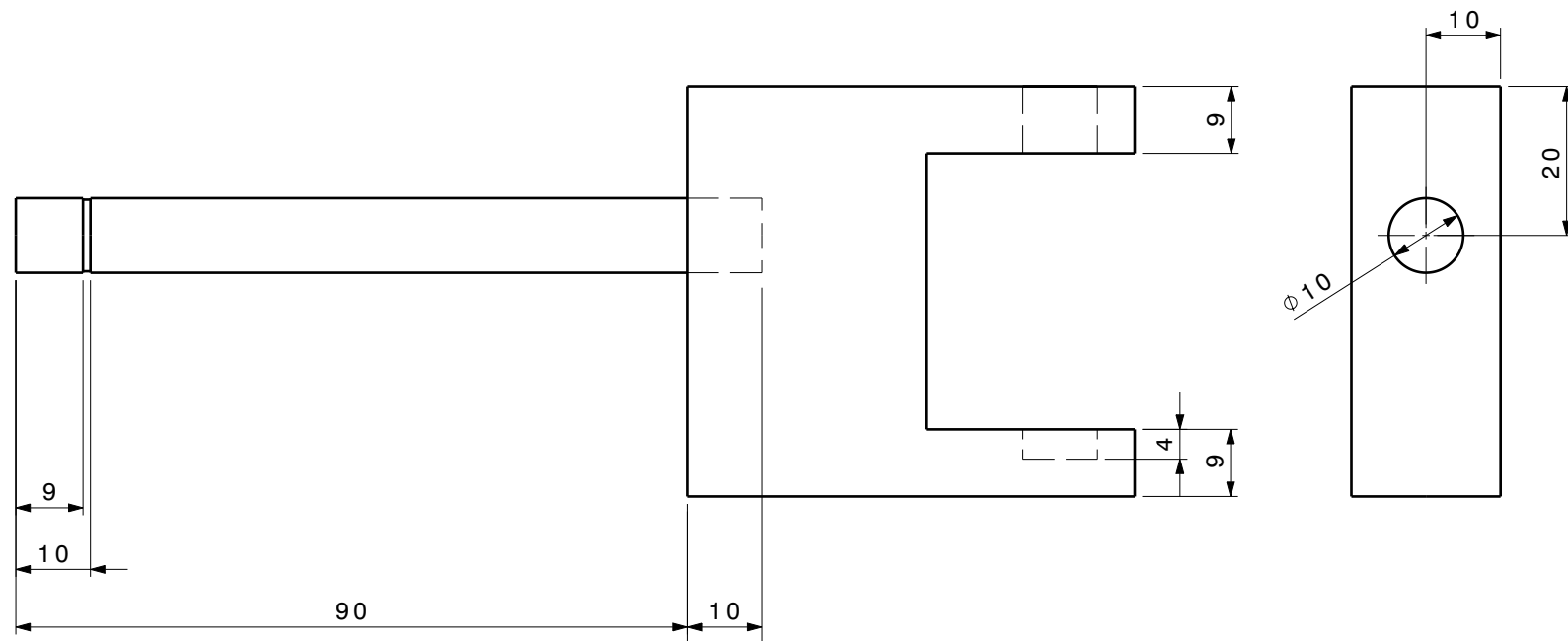
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		Abdul Rehman		
COMPROBADO				
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO
1/1				5/12
Formato A3				
Pieza de sujeción			SUSTITUYE A	
			SUSTITUIDO POR	



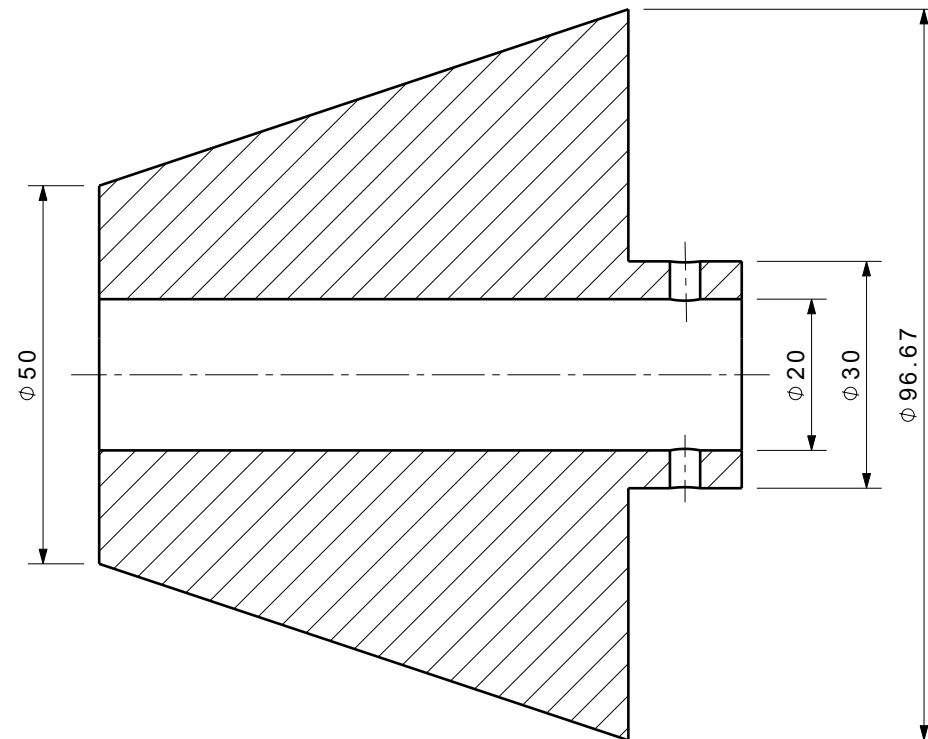
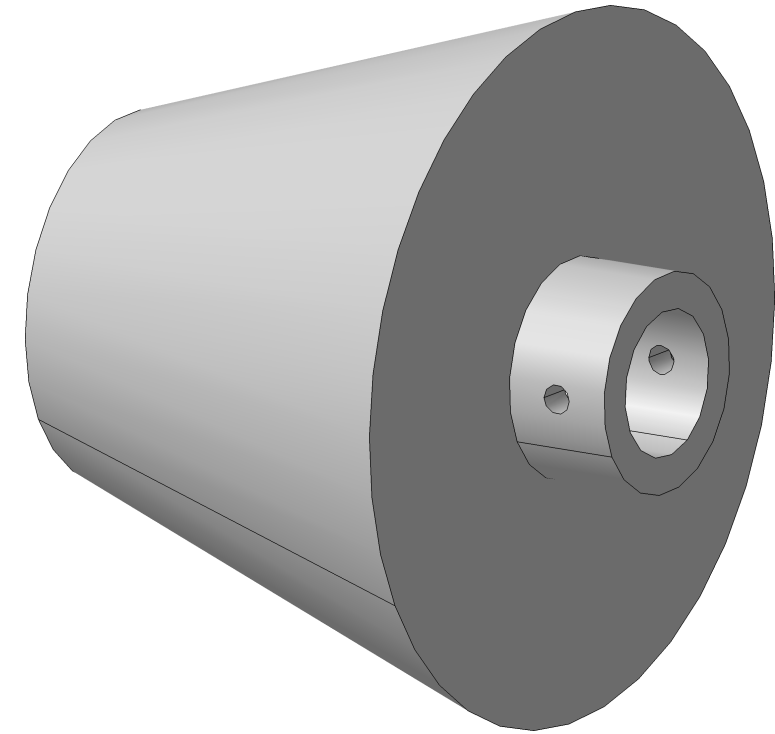
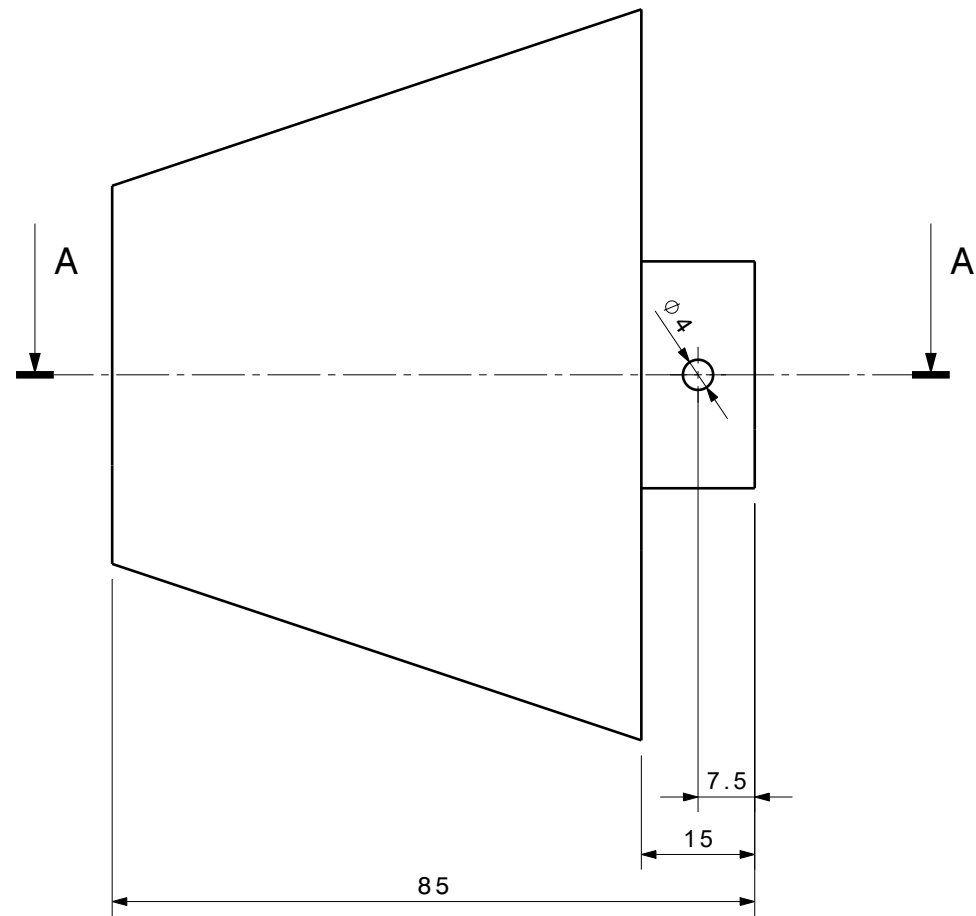
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO Pieza-Unión-Ejes-1			Nº PLANO	6/12
1/1				SUSTITUYE A	
Formato A3				SUSTITUIDO POR	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		Abdul Rehman		
COMPROBADO				
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO Pieza-Unión-Eje-2			Nº PLANO 7/12
1 / 1				
Formato A3				
				SUSTITUYE A
				SUSTITUIDO POR

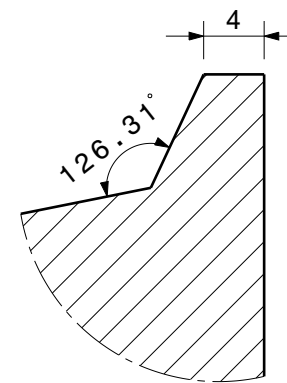
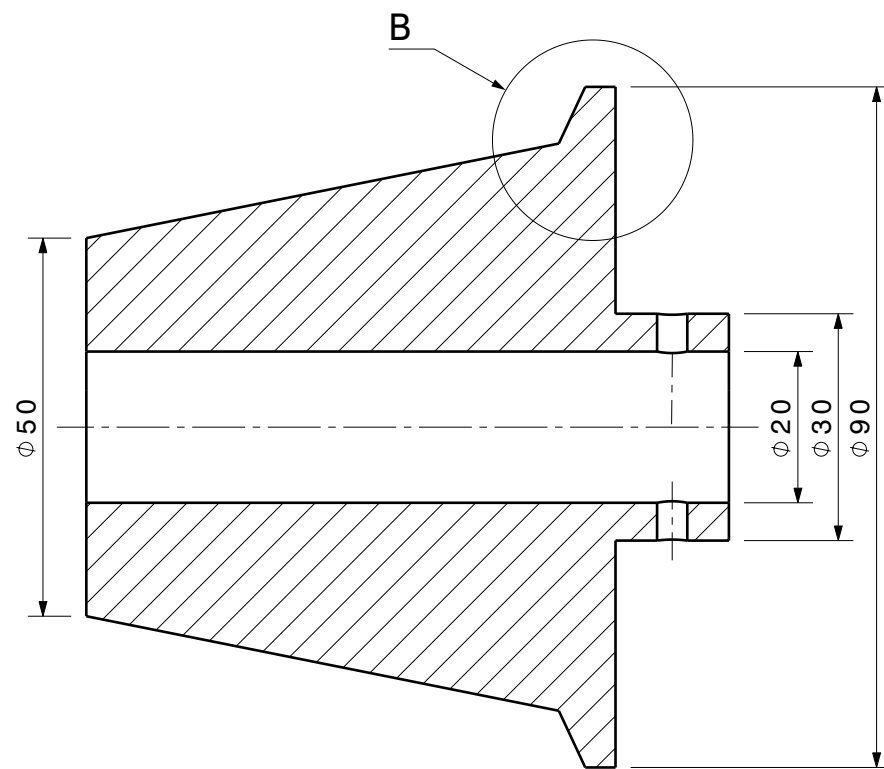
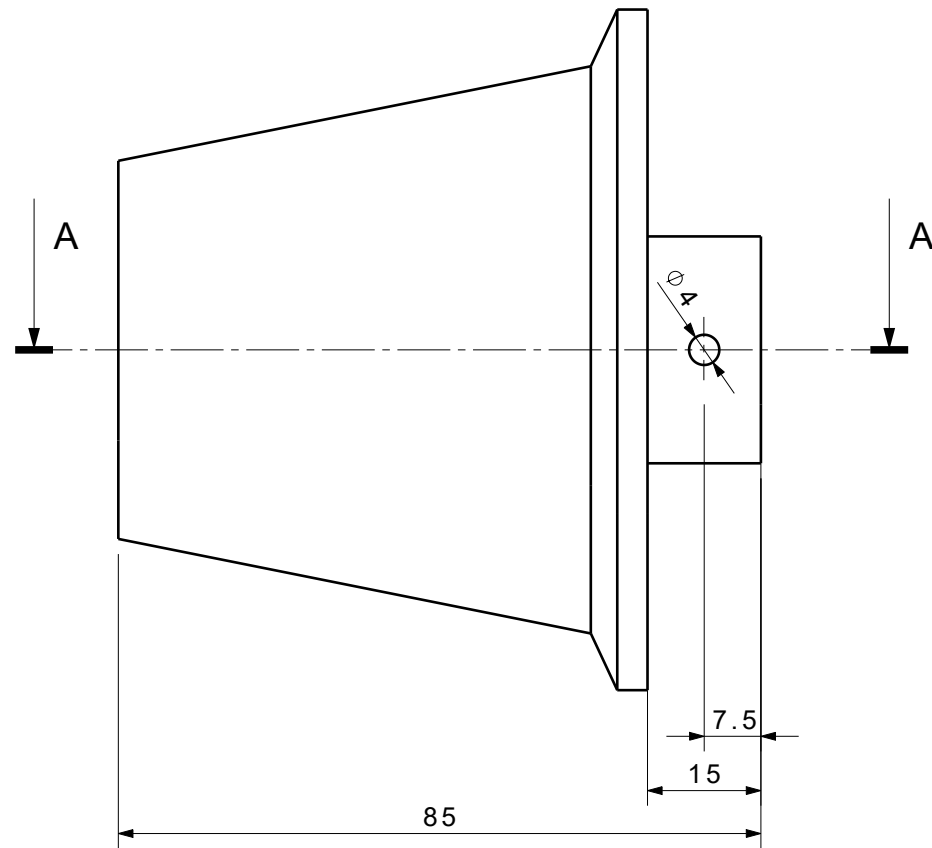


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		Abdul Rehman		
COMPROBADO				
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO Pieza-Unión-Eje-3			Nº PLANO 8/12
1/1				SUSTITUYE A
Formato A3				SUSTITUIDO POR

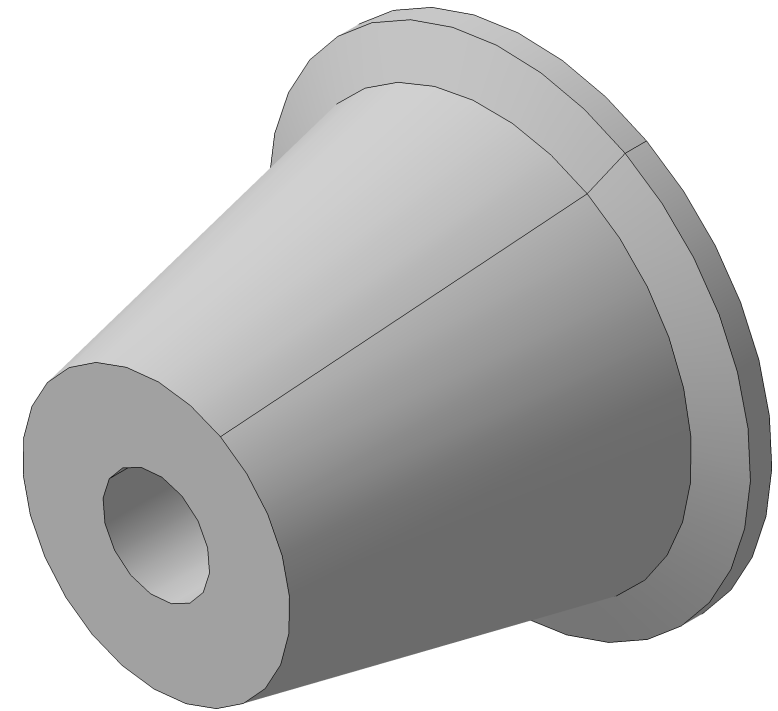


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO	
1:1				9/12	
Formato A3				SUSTITUYE A	
				SUSTITUIDO POR	

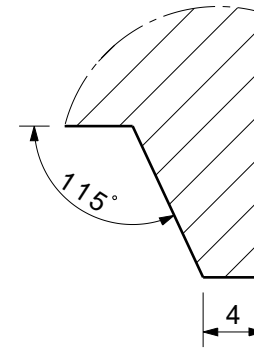
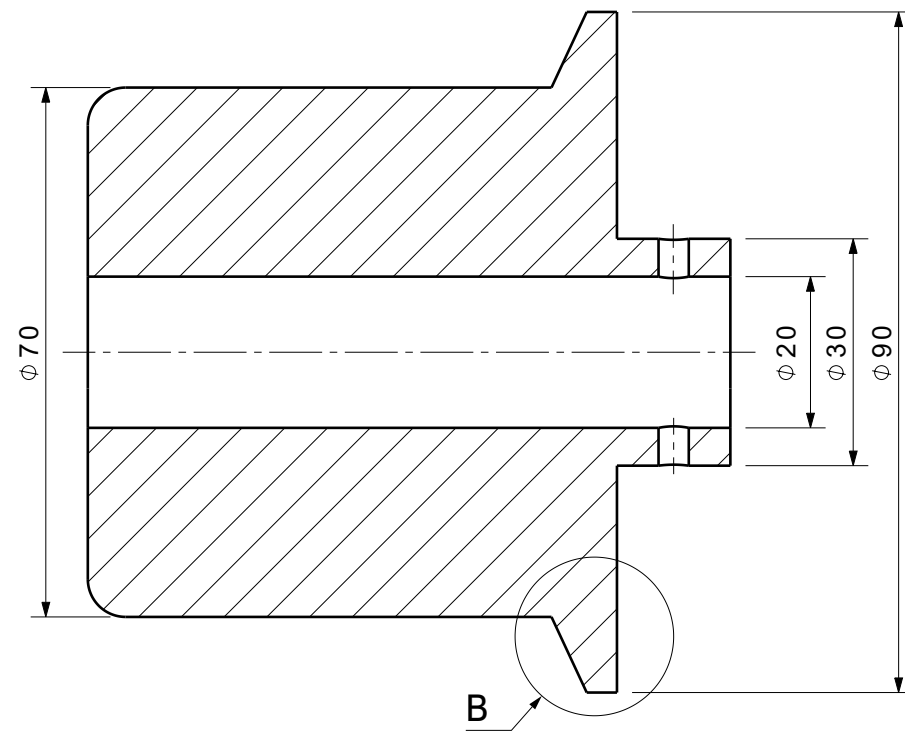
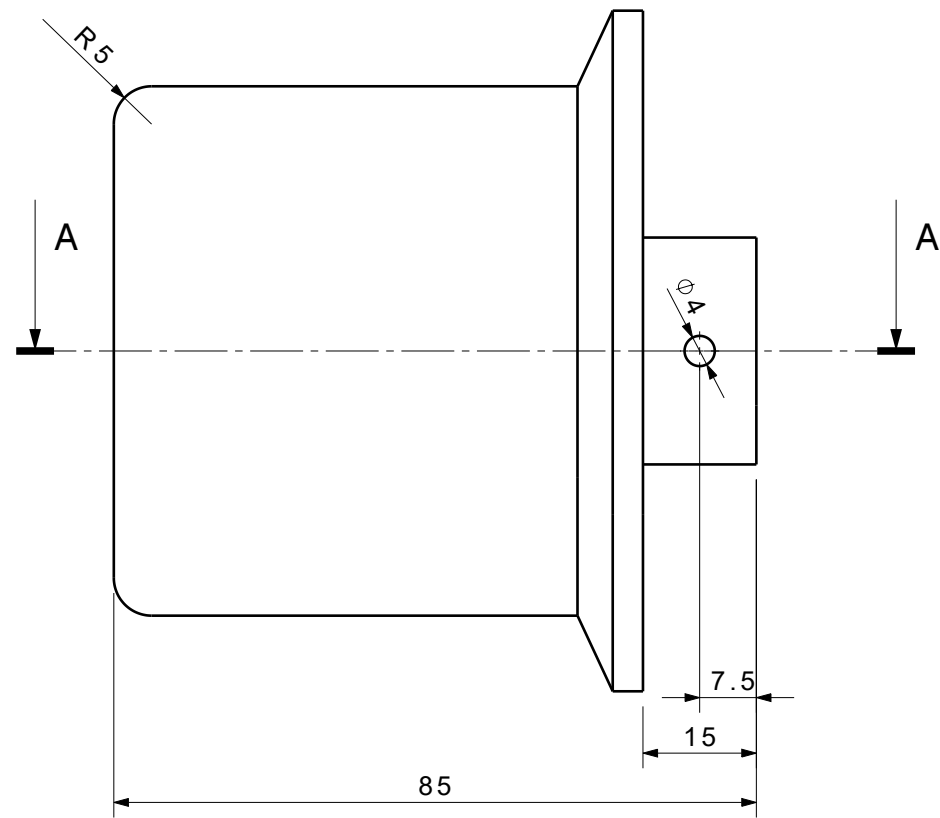
Rueda 1/3



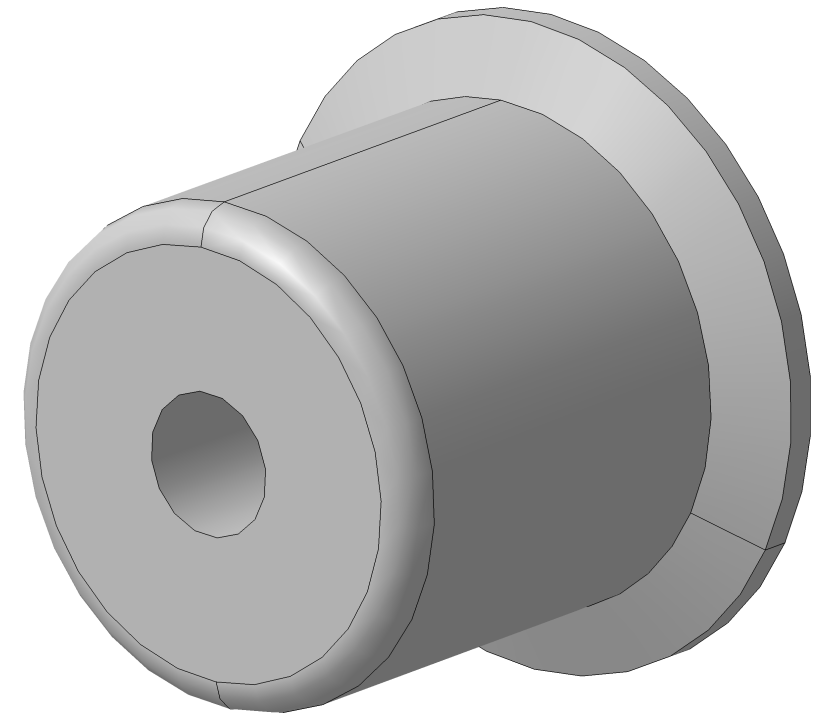
Detalle B
Escala: 2:1



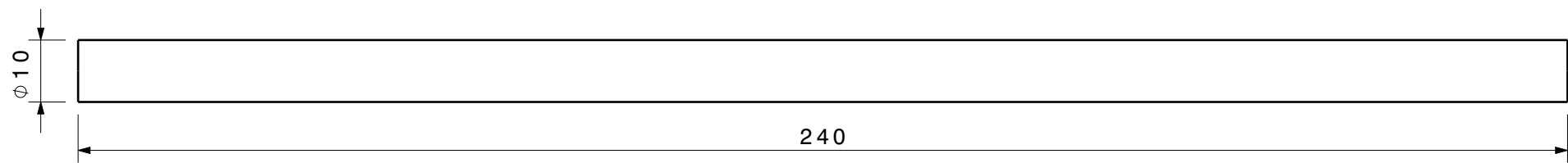
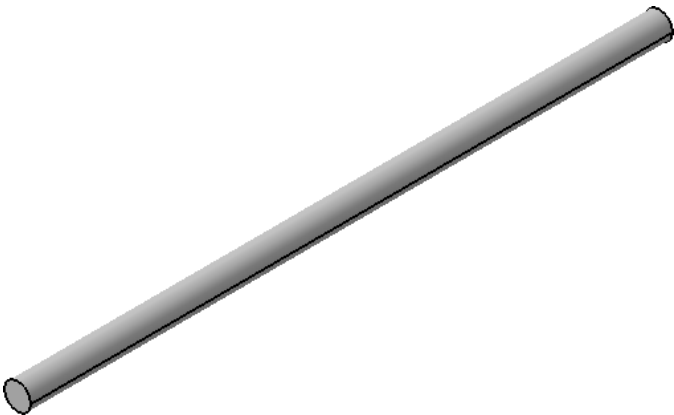
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO	
1/1				Rueda 1/5	10/12
Formato					SUSTITUYE A
A3					SUSTITUIDO POR



Detalle B
Escala: 2:1

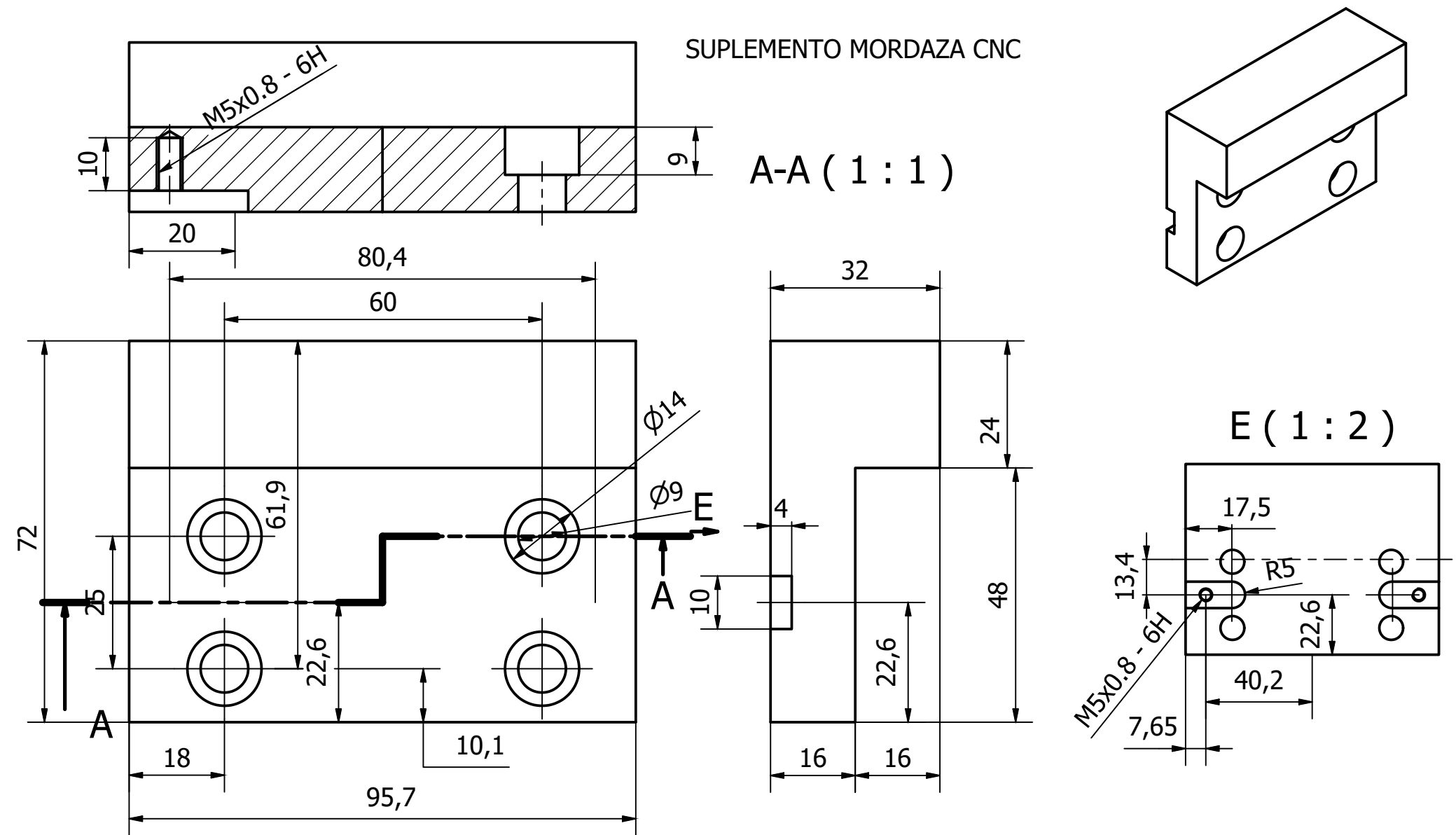


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		Abdul Rehman			
COMPROBADO					
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO			Nº PLANO	
1:1				11/12	
Formato A3				SUSTITUYE A	
				SUSTITUIDO POR	



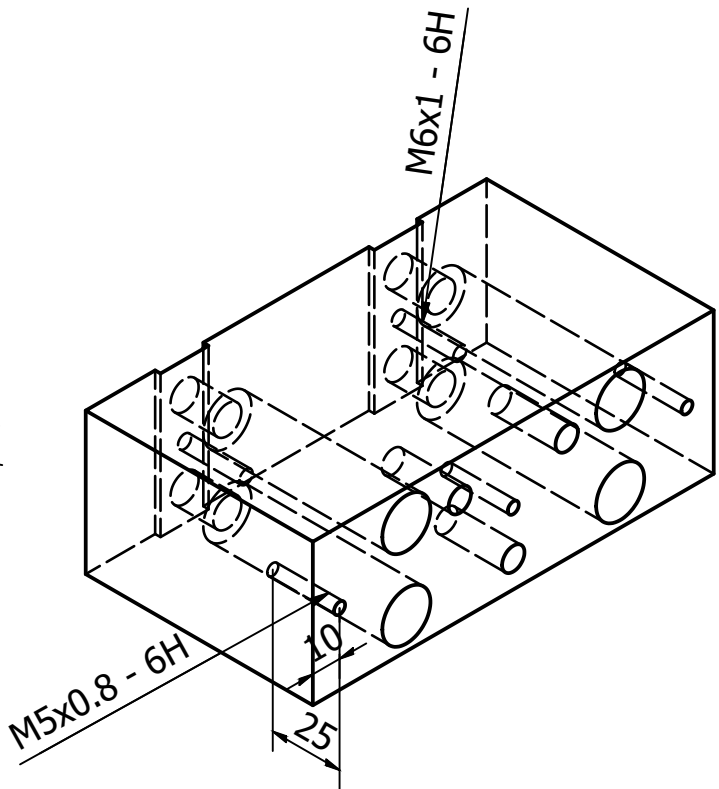
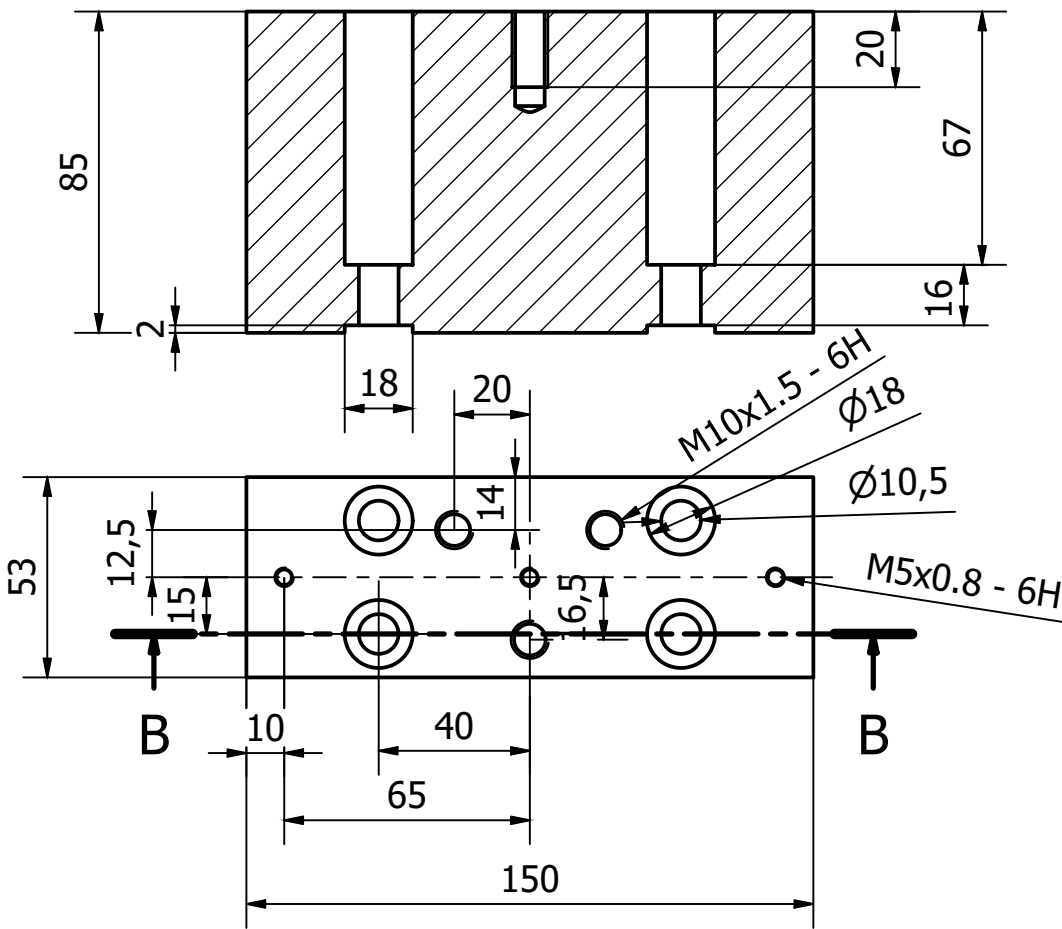
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO		Abdul Rehman		
COMPROBADO				
Escala	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO CON EJES A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO Traviesa			Nº PLANO 12/12
1 / 1				SUSTITUYE A
Formato A3				SUSTITUIDO POR

9.2. Anexos Planos de Útiles

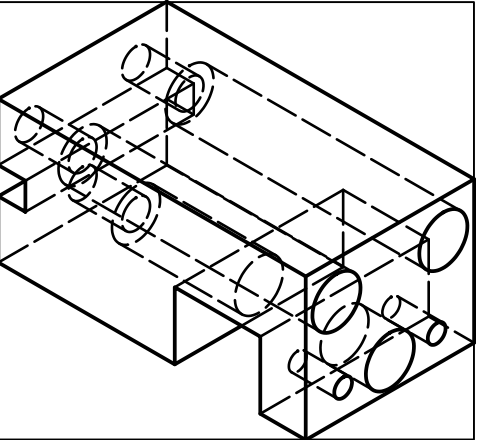


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA:	ACCESORIOS MORDAZA			Nº PLANO
1/1	SUPLEMENTO 2			1/6
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

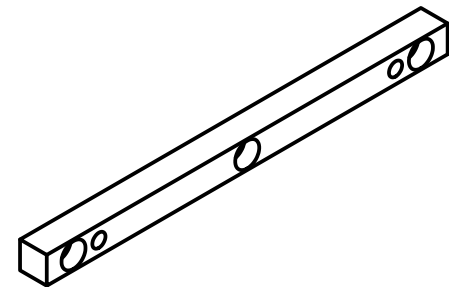
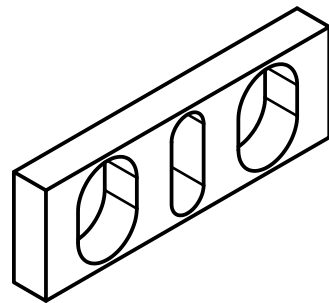
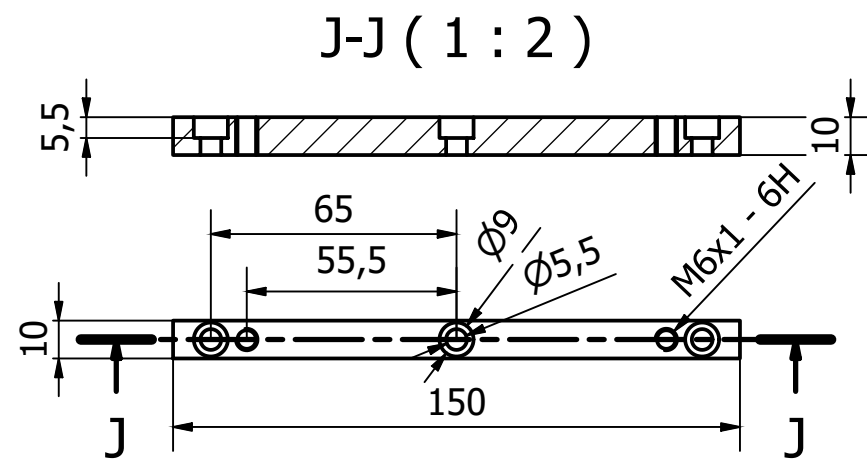
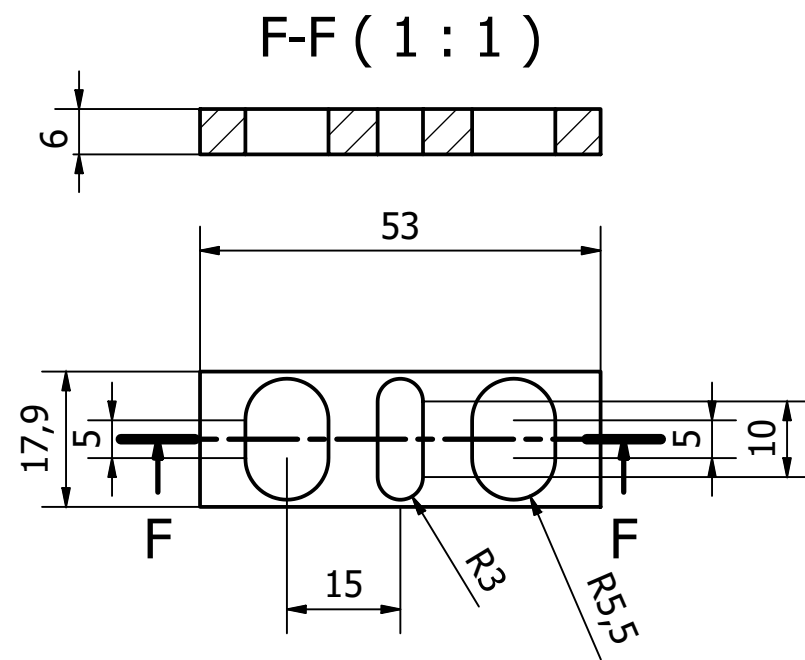
B-B (1 : 2)



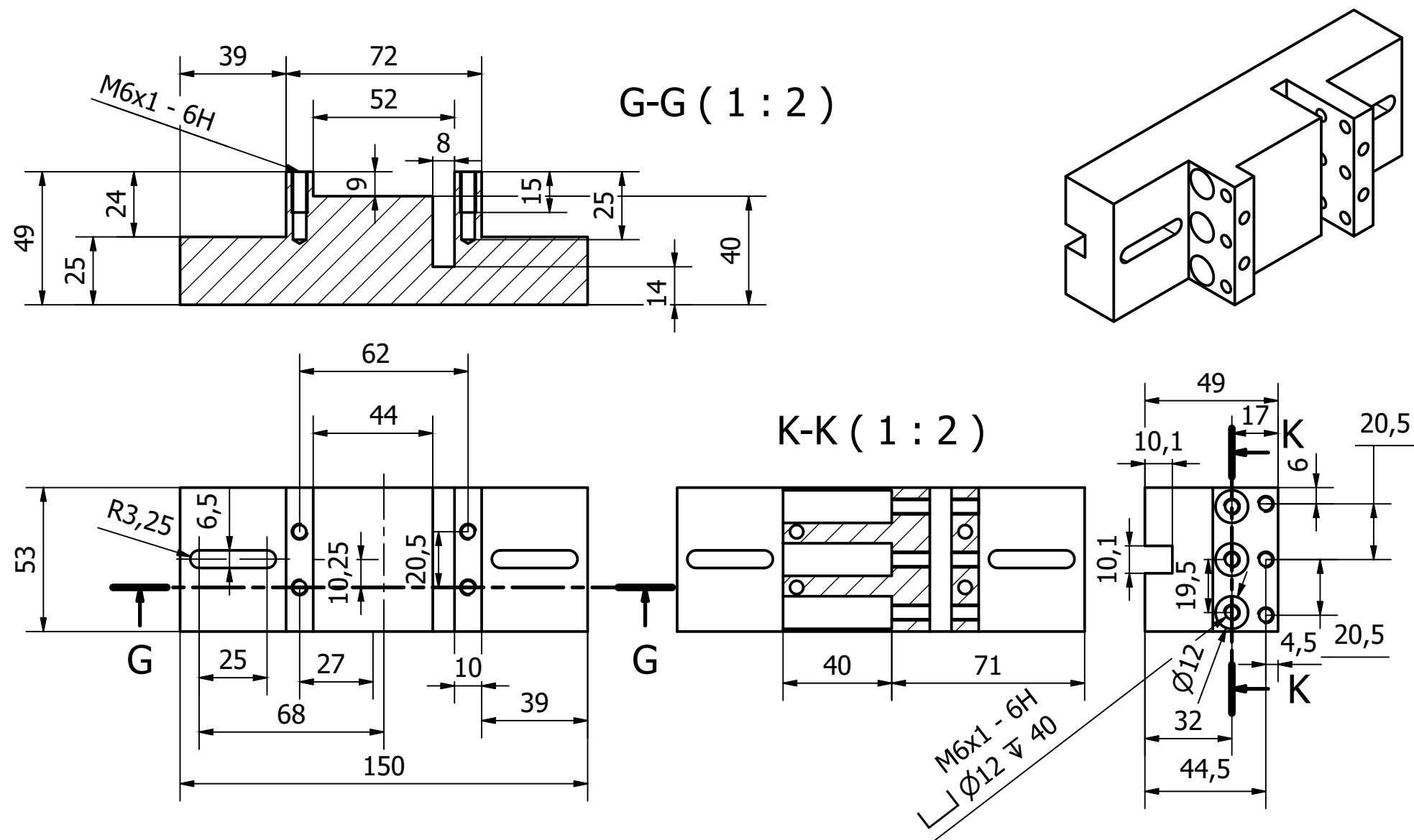
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO					
COMPROBADO					
ESCALA:	ACCESORIOS MORDAZA ALTURA 85				Nº PLANO 2/6
1/1					SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:



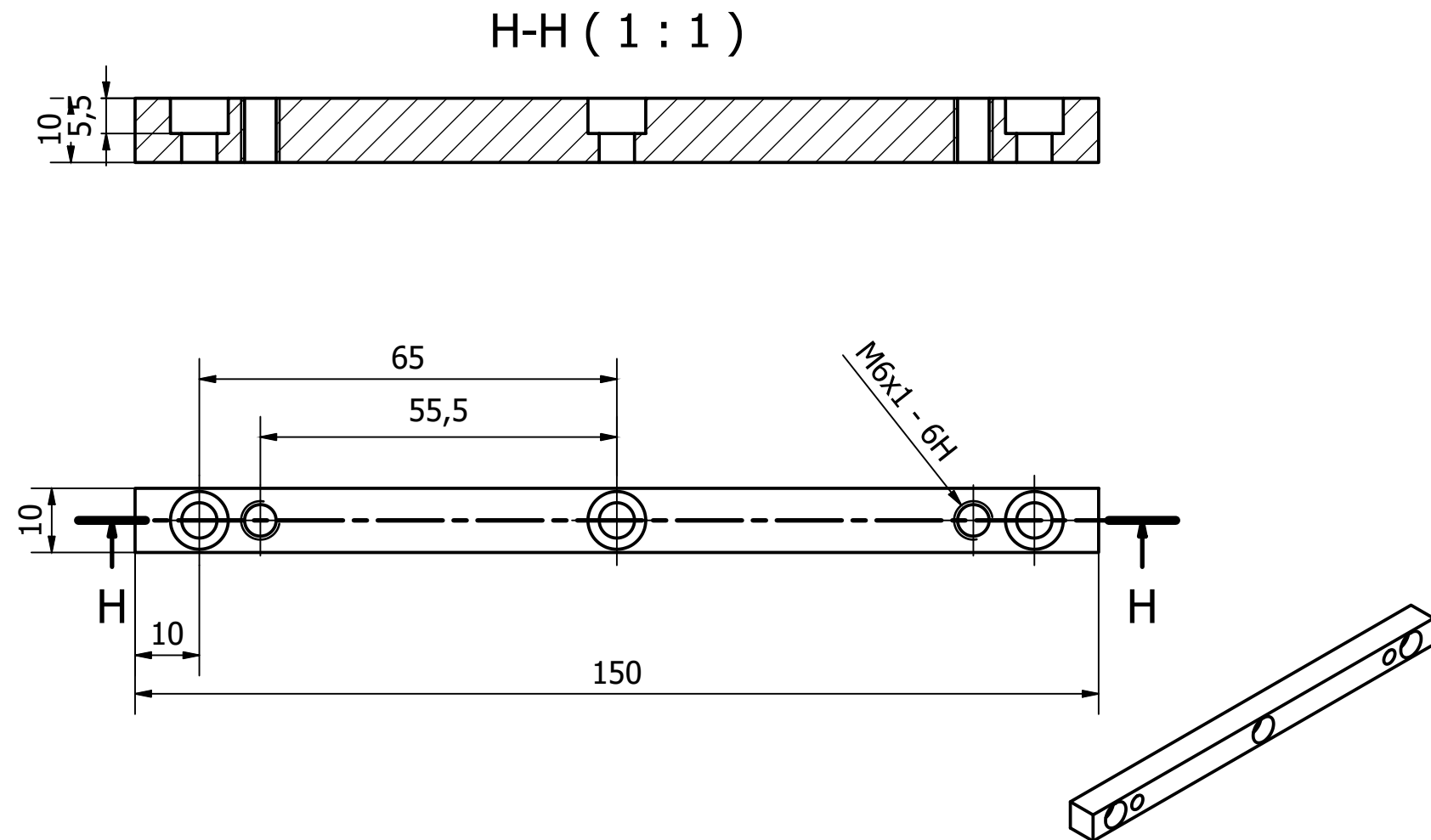
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA:	ACCESORIOS MORDAZA ALTURA 115			Nº PLANO 3/6
1/1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO					
COMPROBADO					
ESCALA:	ACCESORIOS MORDAZA PLETINA RANURA 18			Nº PLANO 4/6	
1/1				SUSTITUYE A:	
				SUSTITUIDO POR:	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA:	ACCESORIO MORDAZA			Nº PLANO
1/1	SUPLEM_PLETINA_52			5/6
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA:	ACCESORIO MORDAZA			Nº PLANO
1/1	GUIA 10 mm			6/6
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

9.3. Anexo Guion de Prácticas

Ferrocarriles y Transporte Guiado

Grado en Ingeniería Civil y Doble Grado en Ingeniería Civil y en Ingeniería de Tecnologías
Mineras

PRÁCTICA

ANÁLISIS DEL AUTOGUIADO Y MOVIMIENTO DE LAZO PRODUCIDO EN EJES FERROVIARIOS

Enunciado

Conceptos aplicados: Trazado y geometría de la vía (Bloque B), Mecánica de la vía (Bloque D),
Dinámica ferroviaria (Bloque F)

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el transporte ferroviario se encuentra en especial auge, pues está considerado como la principal infraestructura de transporte pesado sostenible. Ello es debido a la baja fricción existente entre el contacto por rodadura producido en superficies metálicas rueda-carril [1], lo cual convierte al transporte ferroviario como la gran alternativa eficiente para el transporte de mercancías y pasajeros. Esta importancia queda de manifiesto según se muestra en las líneas de actuación europeas del Horizonte H2020 [2], y en especial, de la agencia europea CEF Transport (Connecting Europe Facility for Transport [3]), las cuales, en sus líneas de financiación principal, potencian al transporte ferroviario en sus modalidades de eficiencia y seguridad. Por tanto, debido a su competitividad energética frente a otras modalidades de transporte, el transporte por ferrocarril debe cumplir, además, dos requisitos importantes; (1) debe ser un transporte seguro y (2) debe ser un transporte confortable, pues esto ayudará a minimizar la interacción vehículo-vía y a reducir los costes de mantenimiento de la infraestructura.

Para analizar las condiciones de seguridad de la marcha y de confort de un vehículo ferroviario, existen distintos indicadores asociados a las fuerzas y aceleraciones experimentadas por los vehículos, entre los que destacan, el coeficiente de descarrilamiento de Nadal (cociente entre fuerzas laterales y verticales en cada rueda), criterio de Prud'homme (resistencia lateral), y los criterios de descarga y de vuelco [4,5]. Sin embargo, analizar la calidad de rodadura de estos vehículos requiere conocer su comportamiento dinámico, determinado por las características singulares tanto de la infraestructura como de los ejes ferroviarios. En este sentido, el principal factor que interviene en el comportamiento dinámico de estos vehículos es la geometría del contacto de las ruedas de los ejes ferroviarios y del carril. Por ello, esta práctica se fundamentará en conocer las características geométricas básicas de los ejes ferroviarios y su influencia en la dinámica del vehículo.

2. EL EJE FERROVIARIO

En la actualidad, existen dos tipologías de ejes ferroviarios utilizados en la industria.

a. Eje ferroviario convencional:

El eje ferroviario convencional mostrado en la Fig. 1, está constituido por dos ruedas ensambladas rígidamente a un eje. Esto implica que no existe movimiento relativo de una rueda frente a la otra o frente al eje, sino que todo el conjunto se comporta como un único sólido.

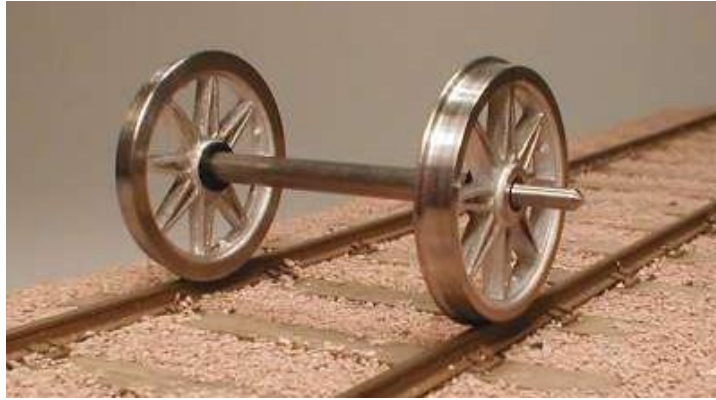


Figura 1: Eje ferroviario convencional

b. Eje de ruedas independientes:

El eje de ruedas independientes mostrado en la Fig. 2, es una modificación del eje ferroviario tradicional que consiste en unir dos ruedas mediante uniones articuladas a un bastidor (conocido como “puente”), de manera que cada rueda puede girar libremente frente a la otra o frente al bastidor.

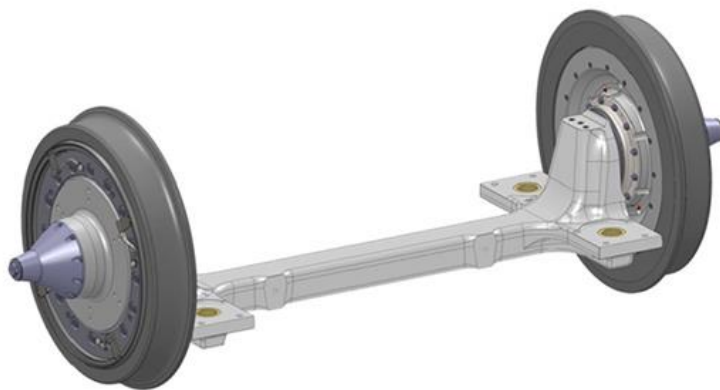


Figura 2: Ilustración CAD de un eje ferroviario de ruedas independientes

De las dos tipologías de ejes presentadas, el eje ferroviario tradicional es la base del comportamiento dinámico de estos vehículos, el cual ha experimentado una importante evolución desde comienzos del siglo XVIII. Por otro lado, el eje de ruedas independientes es una evolución reciente e incorporado en vehículos principalmente urbanos, en donde existen trazados ferroviarios con curvas de radios pequeños. Estos ejes, tienen el inconveniente de requerir sistemas de tracción individualizados para cada rueda, y, por tanto, de control electrónico. Aunque presentan ventajas en aspectos relacionados con el trazado de curvas, su control puede influir someramente en la dinámica de los vehículos, por lo que el análisis de estos ejes queda fuera de esta práctica.

3. EJE RÍGIDO Y CONICIDAD DE RUEDA

El eje ferroviario rígido ha experimentado un importante desarrollo histórico desde sus orígenes en el siglo XVIII. Tal y como se ha comentado con anterioridad, la principal ventaja del transporte ferroviario es su baja resistencia a la rodadura del contacto metal-metal, lo cual hasta el siglo XX siempre ha sido la mayor ventaja competitiva frente a otras modalidades de transporte terrestre.

Inicialmente los ejes estaban configurados con ruedas cilíndricas, las cuales disponían de unas pestañas o “flancos” en sus extremos para poder trazar los tramos curvos y evitar el descarrilamiento. Sin embargo, cuando el flanco de una de las ruedas de un eje entra en contacto con el carril, se eleva la fuerza de fricción además de aumentar las probabilidades de descarrilamiento, por lo que rápidamente se adoptó el uso de ruedas con perfil cónico y no cilíndrico.

El empleo de ruedas cónicas a comienzos del siglo XIX permitió que los ejes tuviesen la capacidad del “autoguiado” en el trazado de tramos curvos, (fenómeno descrito cualitativamente por G. Stephenson en 1821). Dicho autoguiado permite que los ejes se desplazan lateralmente respecto del centro de la vía (p. ej. en curvas) debido a la diferencia de radios entre la rueda exterior e interior. Dado que el sistema eje-ruedas convencional es un sistema de sólido único, es decir, las ruedas giran solidarias al eje, la posibilidad de trazar curvas en donde los radios de los carriles exterior e interior son distintos, es únicamente posible por la geometría cónica de las ruedas (ver Fig. 3).

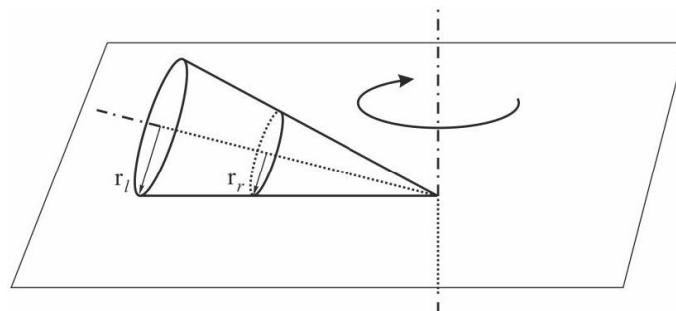


Figura 3: Trazado circular en una geometría cónica

Este fenómeno de “autoguiado” de un eje ferroviario es lo que también se conoce como movimiento de lazo, definido matemáticamente en primer lugar por Klingel en 1883. Es un movimiento oscilatorio íntegramente cinemático, que predice la longitud de onda que describe el eje en función de la conicidad de las ruedas, radio nominal y distancia entre puntos de contacto. El desarrollo matemático del movimiento cinemático de Klingel, se muestra detalladamente en el apartado 4.

Sin embargo, el movimiento de Klingel puede presentar grandes deficiencias en la descripción del movimiento de los ejes ferroviarios, principalmente en situaciones de altas velocidades y grandes transmisiones de carga, o en ausencia de elementos de suspensión, lo que favorece a que la fricción rueda-carril sea insuficiente para mantener estable el movimiento de lazo, llegando al fenómeno de inestabilidad conocido como “hunting motion” [4], crítico en el diseño de estos vehículos y que delimita la velocidad de operación de estos. El movimiento de

“hunting”, no es más que un movimiento de lazo autoamplificado, de manera que el eje ferroviario en una situación de este tipo, va oscilando respecto del centro de la vía en ciclos cada vez de mayor amplitud, produciéndose el descarrilamiento de estos si las pestañas de las ruedas no lo evitan. En este sentido, la Fig. 4 muestra un esquema visto en planta del movimiento de lazo de un eje ferroviario en situación de hunting. En línea roja se muestra la posición de los carriles y en línea verde el teórico desplazamiento lateral del eje. Dado que los carriles no permiten un desplazamiento mayor del eje pues existe contacto flanco-carril, este se comporta lateralmente según la línea azul.

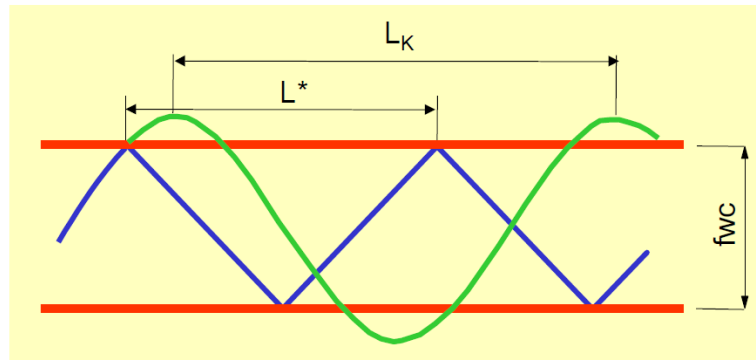


Figura 4: Comportamiento lateral de “hunting” de un eje al entrar con contacto flanco-carril

4. MOVIMIENTO CINEMÁTICO DE KLINGEL

En el apartado anterior se ha visto cómo mediante desarrollo empírico, las ruedas de los ejes ferroviarios convencionales pasaron de ser cilíndricas a ser cónicas. Sin embargo, ¿podría valer cualquier tipo de conicidad?

La respuesta a esta pregunta se obtiene a partir del desarrollo matemático de la cinemática de Klingel, la cual se muestra a continuación:

Para entender este desarrollo, podemos suponer que un eje montado se encuentra por alguna irregularidad del terreno y provoca algún tipo de desviación, por la cual el eje se desplaza lateralmente un cierto valor (y). En el inicio, el eje montado se encuentra en su posición inicial, por lo tanto, los radios de las dos ruedas son el mismo. La conicidad de la rueda es la pendiente del perfil de la rueda, se muestra en la figura 5.

La ecuación de los radios en la posición inicial es la siguiente:

$$R_r = R_l = R_0 \quad (4.1)$$

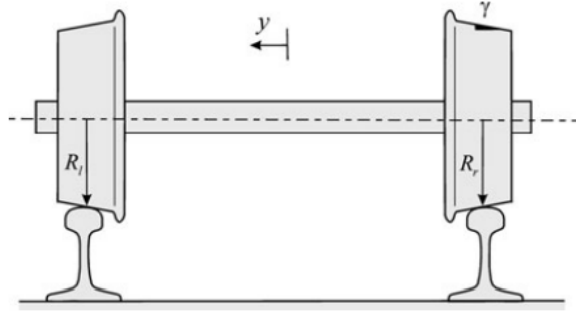


Figura 5: Posición de equilibrio de un eje montado

Si el eje se mueve lateralmente, la diferencia de radios ΔR se puede obtener por la hipótesis de ángulos pequeños:

$$\Delta R = y\gamma \quad (4.2)$$

De ello podemos deducir los radios de las diferentes ruedas en cualquier instante:

$$R_r = R_0 - y\gamma \quad (4.3)$$

$$R_l = R_0 + y\gamma \quad (4.4)$$

Como el eje es rígido y la velocidad angular es constante, las respectivas velocidades de las ruedas se pueden calcular como:

$$V_r = R_r\omega \quad (4.5)$$

$$V_l = R_l\omega \quad (4.6)$$

La velocidad del eje ferroviario será la media de las dos velocidades anteriores.

$$V = \frac{V_r + V_l}{2} = \frac{R_r\omega + R_l\omega}{2} = \frac{(R_0 - y\gamma + R_0 + y\gamma)\omega}{2} = R_0\omega \quad (4.7)$$

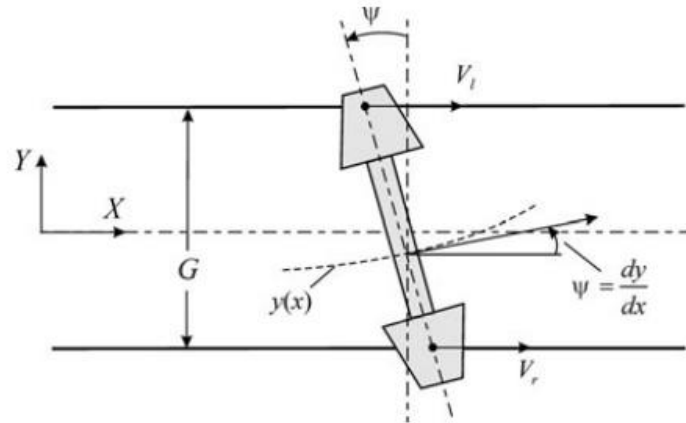


Figura 6: Eje montado en el movimiento de lazo inestable

Si el ángulo yaw girado en planta es muy pequeño (figura 6), podemos asumir que el $\tan \psi \approx \psi$, por lo tanto, la velocidad de desplazamiento lateral se puede calcular de la siguiente manera:

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = \psi V = \psi R_0 \omega \quad (4.8)$$

Se puede obtener la velocidad del ángulo yaw con el cociente de las velocidades de las ruedas entre el ancho de la vía.

$$\psi = \frac{V_r - V_l}{G} = \frac{(R_0 - y\gamma - R_0 - y\gamma)\omega}{G} = \frac{-2y\gamma\omega}{G} \quad (4.9)$$

Derivando la ecuación 4.8 respecto al tiempo y sustituyendo la ecuación 4.9, se obtiene la ecuación que se puede utilizar para el movimiento de lazo.

$$\ddot{y} = \frac{d\dot{y}}{dt} = \frac{d\dot{y}}{d\psi} \frac{d\psi}{dt} = R_0 \omega \dot{\psi}$$

$$\ddot{y} = R_0 \omega \left(\frac{-2y\gamma\omega}{G} \right)$$

$$\ddot{y} + \frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} y = 0 \quad (4.10)$$

Si el coeficiente (γ) es positivo, la solución de esta ecuación puede ser de la siguiente forma:

$$\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} > 0$$

$$y = A \sin(\omega_n t + C) \quad (4.11)$$

Siendo A y C constantes que se pueden obtener usando las condiciones iniciales. La frecuencia natural se puede obtener por:

$$\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} = \omega_n^2$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2R_0\omega^2\gamma}{G} \frac{R_0}{R_0}} = \sqrt{\frac{2V^2\gamma}{GR_0}} \quad (4.12)$$

La solución de la ecuación 4.11 se obtiene suponiendo que ω_n^2 es positivo, lo cual presenta una oscilación con amplitud constante. Si la conicidad es positiva, el coeficiente (γ) también lo será. El periodo de oscilación se obtiene de la siguiente manera:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{V} \sqrt{\frac{GR_0}{2\gamma}} \quad (4.13)$$

A partir de las ecuaciones 4.12 y 4.13 podemos obtener la ecuación de la longitud de onda:

$$L_k = T V$$

$$L_k = 2\pi \sqrt{\frac{R_0 G}{2\gamma}} \quad (4.14)$$

Del desarrollo aquí expuesto, se observa que, para valores de conicidad positivos, negativos y nulos en la ecuación 4.10, el comportamiento matemático del eje será el de la Fig. 7.

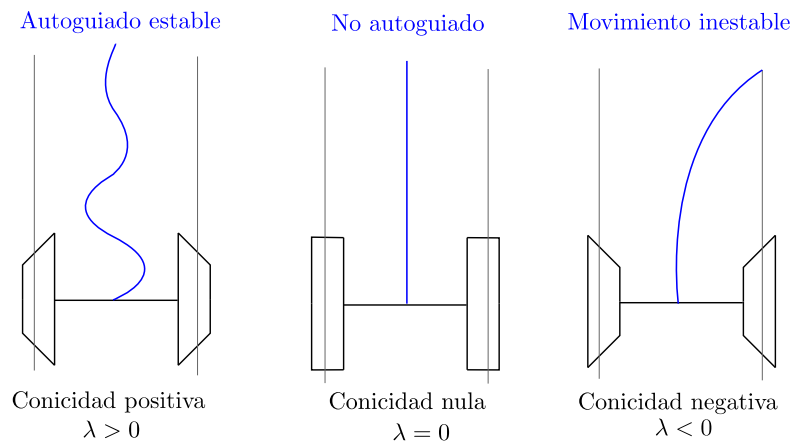


Figura 7: Movimiento oscilatorio en eje ferroviario según conicidad de las ruedas

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Para la realización de esta práctica se dispone de una pequeña infraestructura ferroviaria compuesta por:

- Tramo ferroviario compuesto por los siguientes tramos: (recta curva etc)
 - Obtenido mediante pletinas de aluminio mecanizadas según la cabeza del perfil UIC60 y unidas transversalmente mediante varillas roscadas a modo de traviesas cada 12 cm.



Figura 8: Tramo ferroviario

- Capacidad de aplicar pendiente mediante tornillos roscados en la pieza de sujeción.



Figura 9: Pendiente para el tramo ferroviario

- Ejes ferroviarios rígido

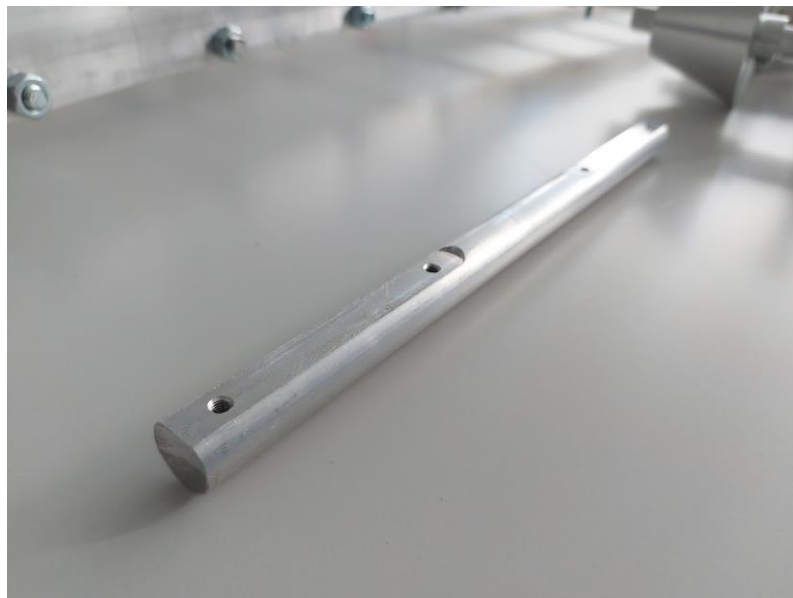


Figura 10: Eje rígido

- Ruedas de distinta conicidad:
 - Cilíndricas (conicidad nula)

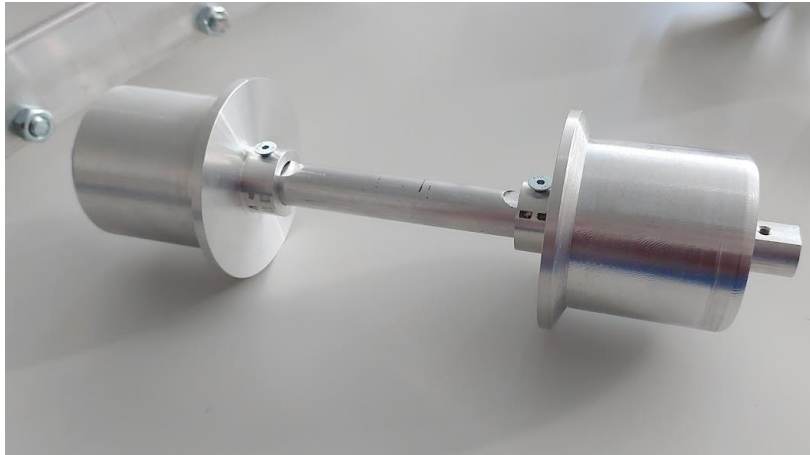


Figura 11: Rueda cilíndrica

- Ruedas cónicas de conicidad 1/3 y 1/5

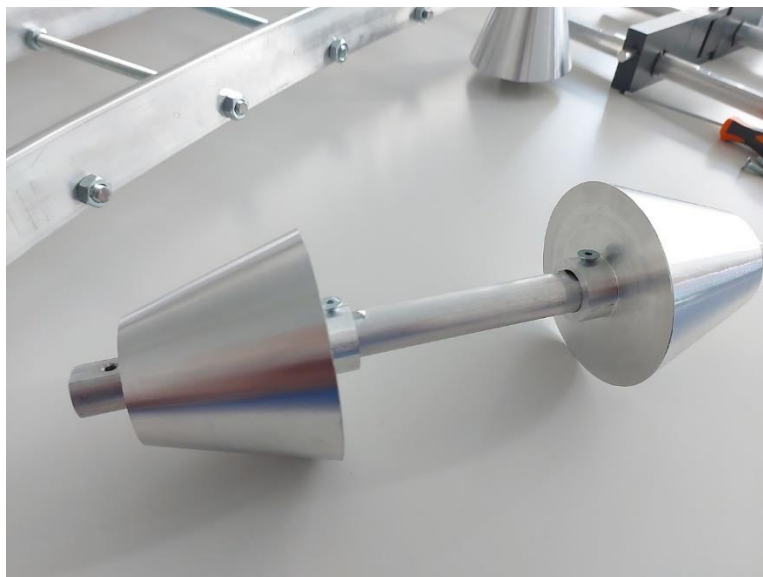


Figura 12: Rueda cónica 1/3



Figura 13: Rueda cónica de 1/5

5.1. CÁLCULO COMPUTACIONAL

En primer lugar, se determinarán las características del movimiento cinemático de Klingel para cada uno de los ejes ferroviarios disponibles, en función del ancho de vía y conicidad de rueda. Se determinarán la frecuencia de Klingel y la longitud de onda del movimiento, así como el desplazamiento lateral teórico para trazar de manera estacionaria los tramos curvos. Dicha actividad será realizada mediante el software de cálculo Matlab o similar.

5.2. CÁLCULO EXPERIMENTAL

En segundo lugar, se ensayarán los distintos ejes ferroviarios sobre el trazado ferroviario. Se analizará el movimiento registrado por cada eje, frecuencia de oscilación y longitud de onda. También se compararán los resultados obtenidos con los predichos por la cinemática de Klingel, identificando las diferencias observadas y las limitaciones del modelo matemático.

5.3. ENTREGA

Se elaborará un informe detallando el proceso realizado, indicando el cálculo numérico y los resultados obtenidos experimentalmente. Además, se deberá elaborar un análisis de las diferencias obtenidas, haciendo hincapié en las causas de las posibles diferencias. Finalmente, el informe deberá incluir las conclusiones extraídas.

Bibliografía:

- [1] Esveld, C. (2001). *Modern railway track* (Vol. 385). Zaltbommel: MRT-productions.
- [2] European Commission. *Horizont* 2020.
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>
- [3] European Commission. *Connecting Europe Facility (CEF) for Transport*.
<https://ec.europa.eu/inea/connecting-europe-facility/cef-transport>
- [4] Garg, V. (2012). *Dynamics of railway vehicle systems*. Elsevier.
- [5] Pita, A. L. (2010). *Infraestructuras ferroviarias* (Vol. 12). Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.