



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Mecánica y de Materiales

Automatización del diseño y cálculo de ejes ferroviarios.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Mecánica

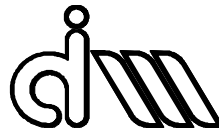
AUTOR/A: López Galindo, Antonio

Tutor/a: Martínez Casas, José

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Automatización del diseño y cálculo de ejes ferroviarios

Presentado por: D. Antonio López Galindo
Dirigido por: Dr. D. José Martínez Casas

Valencia, Septiembre de 2024

Agradecimientos

“A mi familia,
por su apoyo incondicional.”

Resumen

El eje es uno de los componentes de mayor relevancia en el proceso de diseño de bogies para el sector ferroviario. Pese a que a los requerimientos para su diseño y cálculo están definidos en la normativa ferroviaria aplicable, la integración entre ambos procesos no se encuentra automatizada en el entorno laboral, requiriendo múltiples iteraciones hasta obtener una geometría óptima para el cuerpo de eje.

En el presente Trabajo de Fin de Máster, se describe un método para la integración de los requisitos de diseño y cálculo del eje definidos en la normativa ferroviaria vigente, permitiendo obtener una geometría optimizada y su planimetría asociada de forma automática a partir de los datos de entrada proporcionados por el diseñador.

En el Capítulo 1 se introducen conceptos de utilidad acerca del eje montado y sus componentes, se define la normativa aplicable al cuerpo de eje y el alcance y objetivo del presente Trabajo de Fin de Máster. En los capítulos 2 y 3 se describen los requisitos de diseño, cálculo y planimetría asociados a la normativa aplicable y considerados para el desarrollo del trabajo. En el Capítulo 4 se describe la metodología propuesta en el presente Trabajo de Fin de Máster con el objetivo de automatizar el diseño, cálculo y planimetría de ejes ferroviarios. Por último, en el Capítulo 5 se sintetizan las conclusiones del proyecto y se describen las líneas de desarrollo futuras.

Palabras Clave: Ferroviario, Bogie, Eje montado, Automatización, Diseño, Cálculo, Optimización.

Resum

L'eix és un dels components de major rellevància en el procés de disseny de bogies per al sector ferroviari. Malgrat que els requeriments per al seu disseny i càlcul estan definits en la normativa ferroviària aplicable, la integració entre tots dos processos no es troba automatitzada en l'entorn laboral, requerint múltiples iteracions fins a obtenir una geometria òptima per al cos d'eix.

En el present Treball de Fi de Màster, es descriu un mètode per a la integració dels requisits de disseny i càlcul de l'eix definits en la normativa ferroviària vigent, permetent obtenir una geometria optimitzada i la seua planimetria associada de manera automàtica a partir de les dades d'entrada proporcionats pel dissenyador.

En el Capítol 1 s'introduïxen conceptes d'utilitat sobre l'eix muntat i els seus components, es definix la normativa aplicable al cos d'eix, i es definix l'abast i objectiu del present Treball de Fi de Màster. En el Capítol 2 i en el Capítol 3 es descriuen els requisits de disseny, càlcul i planimetria associats a la normativa aplicable i considerats per al desenrotllament del treball. A continuació, en el Capítol 4 es descriu la metodologia proposada en el present Treball de Fi de Màster amb l'objectiu d'automatitzar el disseny, càlcul i planimetria d'eixos ferroviaris. Finalment, en el Capítol 5 se sintetitzen les conclusions del projecte i es descriuen les línies de desenrotllament futures.

Paraules Clau: Ferroviari, Bogie, Eix muntat, Automatització, Disseny, Càlcul, Optimització.

Abstract

Axle body is one of the most relevant components in the bogie design process for the railway sector. Although design and calculation requirements are defined in the applicable railway regulations, the integration between both processes is not automated in working environment, leading to multiple iterations in order to obtain an optimal geometry for the axle body.

This project describes an integration method of design and calculation requirements included on railway regulations for the bogie axle body, allowing to obtain an optimized geometry and its associated drawings automatically from the input data provided by the designer.

Chapter 1 introduces some useful concepts about the railway wheelsets and its components, applicable regulations to axle body and the scope and objectives of this project. Design, calculation and drawing requirements included on the applicable standards and considered for the development of this project are described in Chapters 2 and 3. Next, methodology proposed in this report for design, calculation and drawing automation of railway axles is described in Chapter 4. Finally, Chapter 5 includes conclusions of the project and describes the lines of future development.

Keywords: Railway, Bogie, Wheelset, Automation, Design, Calculation, Optimization.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
I Memoria	1
1 Introducción	3
1.1 Eje montado ferroviario.	3
1.2 Componentes de un eje montado.	5
1.2.1 Cuerpo de eje.	5
1.2.2 Rueda.	6
1.2.3 Cajas de grasa.	6
1.2.4 Equipamiento de freno.	7
1.2.5 Equipamiento motriz.	8
1.3 Cuerpo de eje. Normativa aplicable.	9
1.4 Alcance y objetivo del TFM.	10
2 Diseño de ejes. Requisitos normativos	11
2.1 Requisitos geométricos.	12
2.1.1 Transiciones entre secciones del eje.	12
2.1.2 Relación de diámetros y longitudes de calado.	14
2.1.3 Voladizos y longitudes de componentes calados.	14
2.2 Requisitos planimetría.	16
2.2.1 Acabados superficiales.	16
2.2.2 Tolerancias geométricas.	17
2.2.3 Tolerancias dimensionales.	18
3 Cálculo de ejes. Requisitos normativos	19
3.1 Definición de tipología de eje montado y componentes equipados	20
3.2 Definición de las secciones de cálculo en la geometría del eje.	21

3.3	Cálculo de momentos en el cuerpo de eje.	22
3.3.1	Fuerzas y momentos debidos a masas en movimiento.	23
3.3.2	Fuerzas y momentos debidos a equipamiento de freno.	27
3.3.3	Fuerzas y momentos debidos al equipo motriz.	28
3.3.4	Momento resultante.	29
3.4	Cálculo de tensión.	29
3.5	Tensión máxima admisible.	31
4 Método para la automatización del diseño y cálculo de ejes.		33
4.1	Herramientas de software.	35
4.2	Módulo de entrada de datos.	36
4.2.1	Datos de entrada 1: Definición de la tipología de eje montado.	36
4.2.2	Datos de entrada 2: Parámetros de cálculo asociados al equipamiento.	38
4.2.3	Datos de entrada 3: Definición dimensiones interfases.	39
4.3	Automatización geométrica del eje.	41
4.3.1	Definición de transiciones normativas.	42
4.3.2	Geometría completa de una tipología de eje.	44
4.3.3	Definición de restricciones geométricas.	46
4.4	Automatización del cálculo y optimización geométrica.	47
4.4.1	Secciones de cálculo.	47
4.4.2	Cálculo de momentos.	49
4.4.3	Tensión de la sección y máxima admisible.	53
4.4.4	Optimización geométrica.	55
4.5	Automatización de planimetría.	57
4.5.1	Definición geométrica en NX.	57
4.5.2	Exportación geométrica a software de diseño.	58
4.5.3	Planimetría asociada.	59
5 Conclusiones y propuestas de desarrollo		61
5.1	Conclusiones.	61
5.2	Limitaciones y propuestas de desarrollo.	62
II Pliego de condiciones		63
II.1	Normativa específica.	65
II.2	Especificaciones de materiales y equipos	66
II.2.1	Especificaciones de hardware.	66
II.2.2	Especificaciones de software.	66
III Presupuesto		67
III.1	Coste de licencias informáticas.	69
III.2	Costes del hardware.	69
III.3	Costes del material bibliográfico.	70
III.4	Costes de personal.	70
III.5	Otros costes.	71
III.6	Coste resultante del proyecto.	71

IV Planos	73
Bibliografía	75

Índice de figuras

1.1. Eje montado ferroviario. [6]	3
1.2. Ejes montados independientes (superior) y ejes montados integrados en bogie (inferior).	3
1.3. Parámetros característicos de un eje montado.	4
1.4. Componentes principales del eje montado. [7]	5
1.5. Cuerpo de eje ferroviario. [8]	5
1.6. Rueda monobloque.	6
1.7. Rueda con discos de freno integrados. [9].	6
1.8. Conjunto caja de grasa. [8]	7
1.9. Bloque de freno en llanta. [10]	7
1.10. Pinza o Caliper de freno. [10]	7
1.11. Equipo motriz. [11]	8
2.1. Transición. Superficie calada - Superficie no calada. [1][2]	12
2.2. Transición. Superficies caladas adyacentes. [1][2]	13
2.3. Transición. Asiento rodamiento - mangueta - asiento rueda (Cajas de grasa externas). [1]	13
2.4. Relación diámetros superficies cilíndricas consecutivas.	14
2.5. Voladizo en condición nueva (izq.) y en condición límite de mecanizado(der.). . .	15
2.6. Longitud y diámetro de calado.	15
2.7. Planimetría cuerpo de eje. Acabados superficiales. [4]	16
2.8. Planimetría cuerpo de eje. Tolerancias geométricas. [4]	17
2.9. Planimetría cuerpo de eje. Tolerancias dimensionales. [4]	18

3.1. Sistema de coordenadas para el cálculo de momentos.	22
3.2. Momento generado por masas en movimiento.	23
3.3. Distribución de fuerzas. Eje montado de cajas de grasa externas. [1]	25
3.4. Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa externas - Ancho estándar. [1]	25
3.5. Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa externas - Ancho métrico. [1]	25
3.6. Momento masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa externas. [1]	25
3.7. Distribución de fuerzas. Eje montado de cajas de grasa internas. [2]	26
3.8. Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa internas - Ancho estándar. [2]	26
3.9. Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa internas - Ancho métrico. [2]	26
3.10. Momento masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa internas. [2]	26
3.11. Momentos generados por el equipo de freno.	27
3.12. Momentos generados por el equipo motriz.	28
3.13. Concentrador tensiones para secciones tipo 1T. [1]	30
3.14. Concentrador tensiones para secciones tipo 1G. [1]	30
3.15. Tensiones máximas admisibles $[N/mm^2]$. [1]	31
4.1. Diagrama de flujo. Automatización propuesta.	33
4.2. Habilitar Solver y Visual Basic (VBA) en opciones Excel.	35
4.3. Habilitar Solver en el entorno Visual basic (VBA).	35
4.4. Datos de entrada 1. Definición de tipología de eje montado.	36
4.5. Datos de entrada 1. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	37
4.6. Interfases requeridas para un eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	37
4.7. Datos de entrada 2. Parámetros de cálculo.	38
4.8. Datos de entrada 2. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	38
4.9. Datos de entrada 3. Definición dimensional de interfases. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	39
4.10. Datos de entrada 3. Visualización de la geometría del eje.	40
4.11. Datos de entrada 3. Comprobación restricciones diseño en módulo de entrada.	40

4.12. Diagrama de flujo automatización Excel.	41
4.13. Cajas de grasa externas. [1] Transición rodamiento - mangueta.	42
4.14. Cajas de grasa externas. [1] Transición mangueta - cubo rueda.	42
4.15. Ejemplo: Definición de los parámetros en puntos característicos de una transición.	43
4.16. Ejemplo: Representación de los puntos característicos de una transición.	43
4.17. Transiciones requeridas. Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	44
4.18. Secuencia de transiciones. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	44
4.19. Geometría completa del eje. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	45
4.20. Restricciones geométricas. Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	46
4.21. Puntos de cálculo en transiciones.	47
4.22. Tabla simplificada secciones de cálculo. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	48
4.23. Cargas y zonas del eje. Cajas de grasa externas. [1]	49
4.24. Cargas y zonas del eje. Cajas de grasa internas. [2]	49
4.25. Momentos secciones de cálculo. Ejemplo: Eje remolque cajas de grasa externas sin discos calados	50
4.26. Zonas del eje. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	50
4.27. Diagrama de momentos. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	52
4.28. Parámetros de cálculo para la tensión de la sección.	53
4.29. Cálculo de tensión, factor de seguridad y sección crítica. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	54
4.30. Ubicación sección crítica del eje. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	54
4.31. Diámetros optimizables. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	55
4.32. Restricciones adicionales solver. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	56
4.33. Transición. Cubo rueda - Caña eje 1. Cajas de grasa externas.	57
4.34. Modelo 3D NX. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.	57
4.35. Parámetros exportación Excel. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	58

4.36. Fichero de exportación. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.	58
4.37. Módulo de expresiones de NX. Importación del fichero de datos de Excel.	58
4.38. NX - Planimetría asociada a tipología de cuerpo de eje.	59
4.39. NX. Requerimientos planimetría asociados automáticamente a la geometría.	59

Índice de tablas

II.1. Especificaciones técnicas del hardware.	66
III.1. Costes asociados a licencias informáticas.	69
III.2. Costes asociados a hardware.	69
III.3. Costes asociados al material bibliográfico.	70
III.4. Costes asociados al personal técnico.	70
III.5. Otros costes.	71
III.6. Coste resultante del proyecto.	71

Parte I

Memoria

Introducción.

1.1 Eje montado ferroviario.

El eje montado es uno de los conjuntos principales del sector ferroviario debido a su relevancia en la seguridad y comportamiento dinámico del vehículo. Está formado por un conjunto de componentes cuyas principales funciones son transmitir las cargas del vehículo a la vía, permitir la transferencia de esfuerzos de tracción y frenado, y asegurar el guiado del vehículo.

Un eje montado puede estar integrado en el vehículo de forma aislada, o formando parte de un conjunto denominado bogie. En la actualidad predominan los diseños de ejes montados integrados en bogies, debido a su mayor coeficiente de confort respecto a ejes montados instalados directamente en el vehículo.

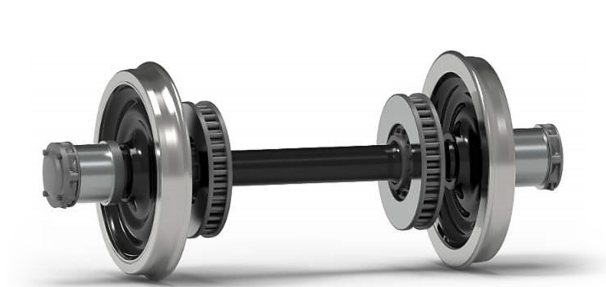


Figura 1.1: Eje montado ferroviario. [6]

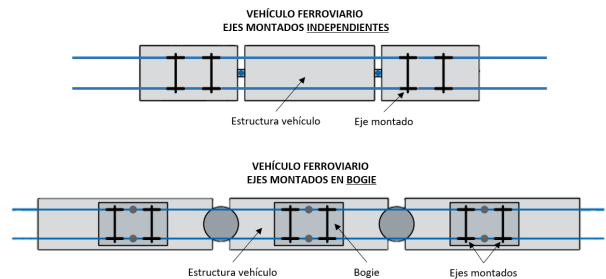


Figura 1.2: Ejes montados independientes (superior) y ejes montados integrados en bogie (inferior).

El ámbito de operación de un eje montado se determina por su tipología, carga por eje y ancho de vía.

- **Tipología de eje montado:** Los requerimientos de tracción y freno determinan los componentes que constituyen el eje montado y, por tanto, la tipología del mismo. En el capítulo 1.2 se incluye la descripción detallada de los componentes principales que conforman un eje montado ferroviario.
- **Carga por eje:** Es la carga transmitida por cada eje del vehículo a la vía y está determinada por la carga de tara del vehículo, la capacidad de carga en el interior del mismo y el número total de ejes. Las aplicaciones ferroviarias actuales incluyen cargas por eje comprendidas entre las 14 t (metros ligeros) y 40 t (vagones de mercancías pesadas).
- **Ancho de vía:** El ancho de vía es la distancia entre las caras internas del carril. Existen múltiples anchos de vía en el ámbito ferroviario, siendo de especial relevancia en el contexto del presente Trabajo Fin de Máster el ancho internacional o UIC (1.435 mm), ancho ibérico (1.668 mm) y ancho métrico (1.000 mm).

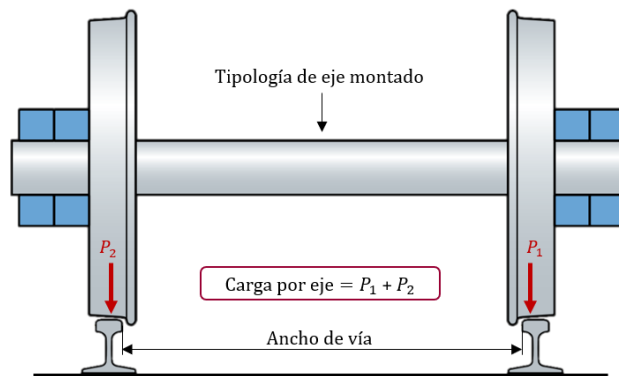


Figura 1.3: Parámetros característicos de un eje montado.

Garantizar la seguridad de operación del eje montado es un aspecto fundamental en el proceso de diseño y cálculo de los componentes que integran el eje montado. El fallo de alguno de sus componentes puede ocasionar graves consecuencias como el descarrilo del vehículo, la pérdida de estabilidad dinámica u ocasionar daños estructurales en la unidad.

La vida de los componentes del eje montado está condicionada por las exigentes condiciones de servicio a las que se someten. La integridad de estos componentes se ve alterada por daños superficiales ocasionados por proyecciones de balasto, aparición de fenómenos de corrosión o desgaste de los componentes por micro-desplazamientos (*fretting*). Estos fenómenos implican un incremento local de la tensión en las zonas afectadas y, en el peor de los casos, la aparición de grietas que pueden desencadenar en el fallo del componente.

La normativa ferroviaria sintetiza la experiencia en servicio asociada a los fenómenos mencionados y establece los métodos de diseño y planes de mantenimiento e inspección para garantizar la seguridad de operación de los componentes del eje montado.

1.2 Componentes de un eje montado.

La relevancia en la integridad del vehículo que recae sobre el eje montado, conlleva que la correcta definición de los componentes principales que lo integran adquiera gran importancia en su procedimiento de diseño.

Los componentes principales que conforman el eje montado son el cuerpo de eje, las ruedas, las cajas de grasa, el equipamiento de freno y el equipamiento motriz.

Otros componentes de menor relevancia para el desarrollo del trabajo son aquellos que conforman el equipamiento auxiliar del eje montado, el cual suele equiparse en las testas del eje y está formado por sensores, retornos de corriente o equipos de puesta a tierra del vehículo.

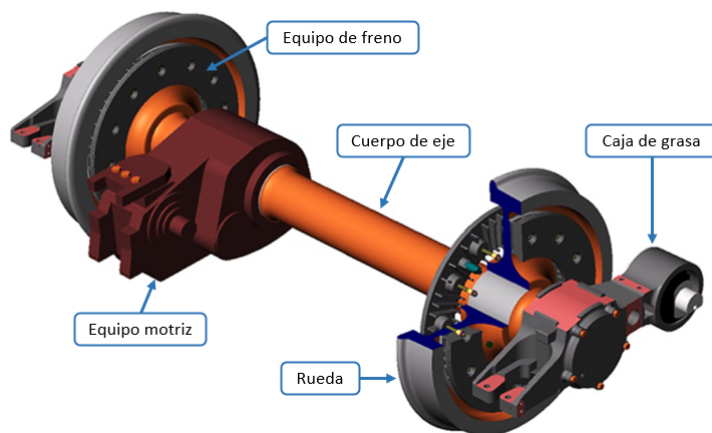


Figura 1.4: Componentes principales del eje montado. [7]

1.2.1 *Cuerpo de eje.*

El cuerpo es uno de los componentes de mayor relevancia en el eje montado. Integra las interfases de montaje con los distintos componentes del eje montado y transfiere los esfuerzos entre ellos.

La geometría del cuerpo de eje está claramente determinada por la distribución del resto de componentes del eje montado. Se trata de un cuerpo de revolución con las interfases de los distintos componentes interconectadas por transiciones que siguen requerimientos normativos.

Las cargas aplicadas en el eje y los requerimientos de mantenimiento determinan que el eje sea macizo o hueco. Los ejes macizos son aptos para aplicaciones ferroviarias con grandes cargas, mientras que los ejes huecos son recomendables en aplicaciones con cargas más reducidas, optimizando la masa del eje y permitiendo su inspección con equipos de ultrasonidos.



Figura 1.5: Cuerpo de eje ferroviario. [8]

1.2.2 Rueda.

Las ruedas se encuentran caladas en el cuerpo del eje y transfieren los los esfuerzos del vehículo al carril. El diámetro de rueda adquiere relevancia para la capacidad de tracción y freno del vehículo, así como influye en la magnitud de las cargas debidas a masas en movimiento del vehículo aplicadas sobre el cuerpo del eje.

Las rueda se divide en tres partes principales:

- **Cubo:** Es la parte de la rueda en contacto con el cuerpo de eje. Su geometría define las longitudes y diámetros de la interfase de calado del eje, asegurando la correcta transmisión de esfuerzos entre ambos componentes.
- **Velo:** El velo conecta la llanta con la banda de rodadura. Puede incluir la integración de distintos sistemas de atenuación del ruido de rodadura o equipar frenos de discos integrados en la rueda.
- **Llanta:** Es la parte de la rueda en contacto con el carril. La geometría de la llanta incluye el perfil de rueda, esencial en la caracterización del comportamiento dinámico del vehículo y su impacto en vía.



Figura 1.6: Rueda monobloque.

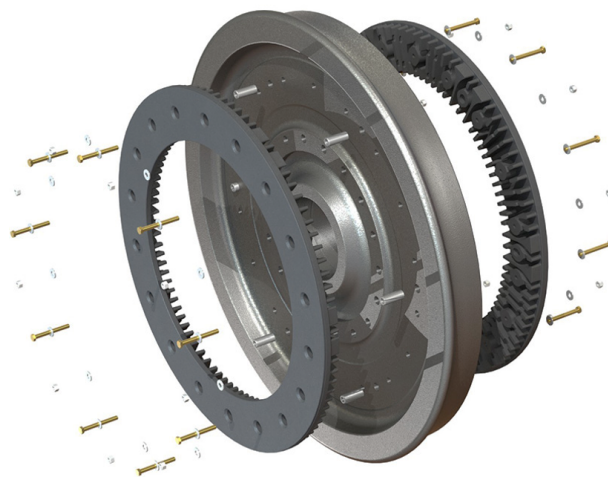


Figura 1.7: Rueda con discos de freno integrados. [9].

1.2.3 Cajas de grasa.

La caja de grasa sirve de enlace entre los componentes rotativos del eje y la estructura del bogie o vehículo. Están formadas por el cuerpo de caja de grasa, el rodamiento y los componentes de la suspensión primaria.

El componente principal de la caja de grasa es el rodamiento, el cual permite la rotación del cuerpo del eje respecto a las estructuras quasi-estáticas del bogie o vehículo. La pista interna del rodamiento se encuentra calada al cuerpo del eje, mientras que la exterior se fija al cuerpo de la caja de grasa, transfiriendo las cargas laterales y radiales entre ambos componentes.

Las dimensiones y características del rodamiento empleado están determinadas por el espectro de cargas del vehículo y las velocidades de operación. El diámetro de calado del rodamiento en el eje limita el diámetro máximo admisible para el agujero interno del mismo, con el objetivo de evitar un desgaste prematuro debido a fenómenos de *fretting*. Este valor máximo para el diámetro interno del eje suele ser proporcionado por el suministrador de rodamientos basado en su experiencia en servicio.

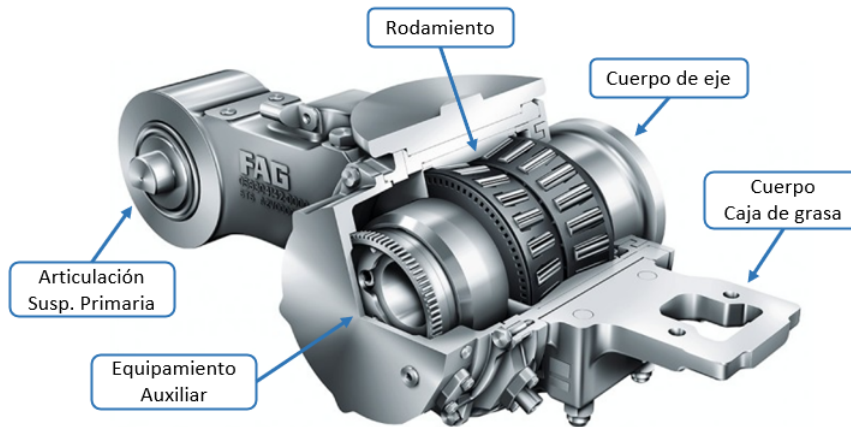


Figura 1.8: Conjunto caja de grasa. [8]

1.2.4 Equipamiento de freno.

El equipamiento de freno instalado en el bogie determina la distribución de esfuerzos en el cuerpo del eje. Los equipos de freno más habituales en el sector ferroviario son los bloques de freno en llanta, los frenos de disco y el freno motor o electro-motriz.

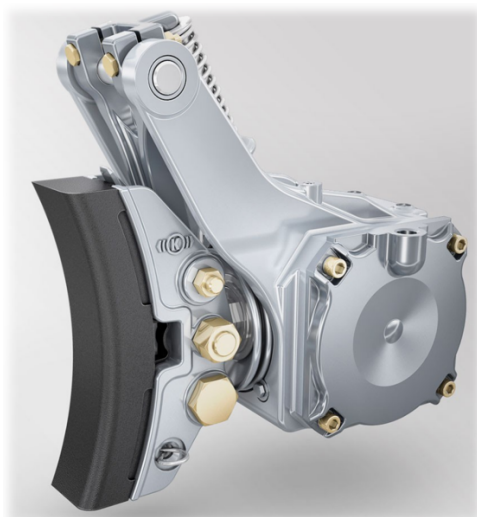


Figura 1.9: Bloque de freno en llanta. [10]

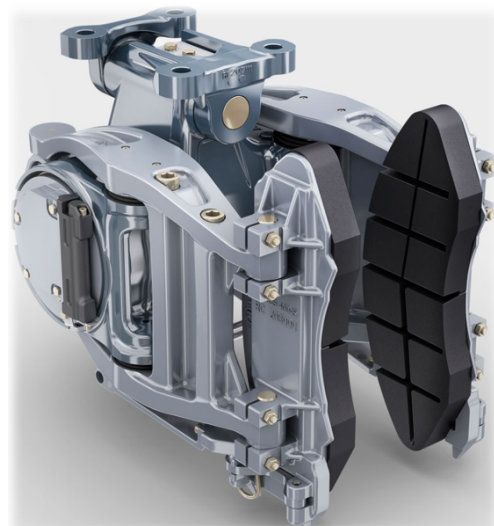


Figura 1.10: Pinza o Caliper de freno. [10]

El bloque de freno en llanta es el equipamiento de freno tradicionalmente empleado en el sector ferroviario. Su funcionamiento se basa en una zapata de fricción accionada sobre el perfil de rodadura de la rueda. En la actualidad su uso en nuevos desarrollos no está tan extendido debido a su impacto en la vida de la rueda, aunque sigue empleándose en algunas aplicaciones donde se requieren esfuerzos de frenado muy elevados (combinando frenos de disco y bloques de freno en el mismo eje montado).

Las pinzas de freno o *calipers* accionan sobre las superficies de los discos de freno equipados en el eje montado (integrados en las ruedas o calados en el cuerpo de eje) generando el par de frenado. Las principales ventajas de los frenos de disco respecto a los bloques de freno son su mayor rendimiento de frenado (debido a sus mayores fuerzas de accionamiento y capacidad de disipación térmica) y el aumento en la vida en servicio de las ruedas.

El freno electromotriz solo es posible en ejes montados con equipamiento motriz instalado, el motor actúa como un generador introduciendo un par de frenado en el cuerpo de eje.

1.2.5 Equipamiento motriz.

El equipamiento motriz de un eje montado comprende el conjunto de componentes encargados de generar la tracción y por tanto el movimiento del vehículo. Está compuesto por los siguientes componentes:

- **Motor:** Máquina eléctrica que genera el momento de tracción o de frenado (freno electro-mecánico).
- **Reductor:** Transmisión comprendida entre el motor y el cuerpo de eje que amplifica el par generado en el motor para mejorar las prestaciones de tracción y frenado.
- **Acoplamiento:** Componente encargado de la transmisión del par entre los componentes no suspendidos y los suspendidos de bogie o caja del vehículo.

Existen multitud de tipologías de equipamiento motriz en función de las características requeridas por la aplicación ferroviaria. La tipología equipamiento motriz determina las interfaces y momentos generados en el cuerpo de eje.

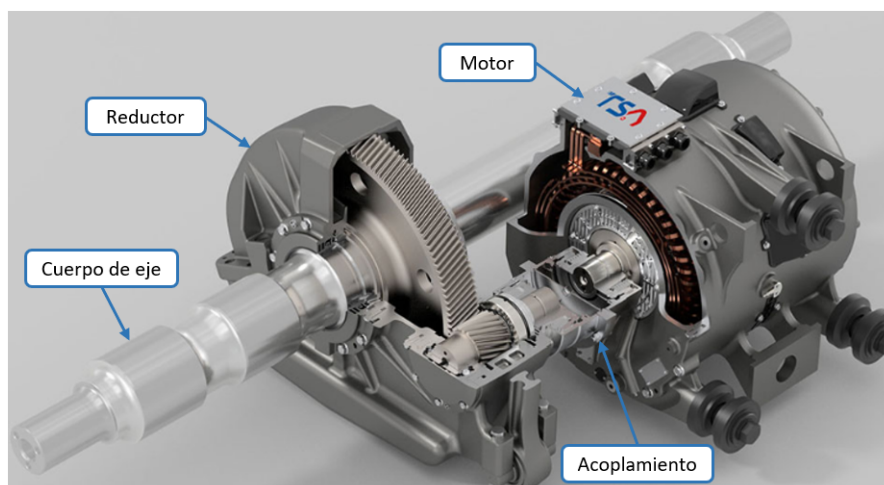


Figura 1.11: Equipo motriz. [11]

1.3 Cuerpo de eje. Normativa aplicable.

Los procedimientos de diseño y cálculo de ejes ferroviarios puedan estar sujetos a distintas normativas específicas del país o región prevista para su operación.

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster se enfoca en la integración de los procedimientos de diseño y cálculo de ejes incluidos en la normativa EN (European Standard) expuesta a continuación, ampliamente extendida en el ámbito europeo para la validación de ejes ferroviarios.

- **EN 13103-1. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Parte 1: Método de diseño para ejes con cajas de grasa externas. [1]**

Define el procedimiento de cálculo aplicable (secciones de cálculo, fuerzas, momentos y esfuerzos máximos admisibles en el eje) y los requerimientos geométricos para transiciones y diámetros de las distintas secciones en ejes de cajas de grasa externas.

- **EN 13103-2. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Parte 1: Método de diseño para ejes con cajas de grasa internas. [2]**

Define el procedimiento de cálculo aplicable (secciones de cálculo, fuerzas, momentos y esfuerzos máximos admisibles en el eje) y los requerimientos geométricos para transiciones y diámetros de las distintas secciones en ejes de cajas de grasa internas.

- **EN 13260. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ejes montados. Requisitos de producto. [3]**

Establece requerimientos aplicables a la integración entre los distintos componentes del eje montado. En lo que respecta al cuerpo de eje, adquiere especial relevancia los requerimientos relacionados con sus interfaces de calado con los distintos componentes equipados.

- **EN 13261. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ejes . Requisitos de producto. [4]**

Define los requerimientos de fabricación aplicables al cuerpo de eje ferroviario. En el ámbito de estudio del presente Trabajo Fin de Máster, adquiere especial relevancia la definición de requisitos relacionados con rugosidades superficiales, tolerancias geométricas y tolerancias dimensionales de las distintas superficies del cuerpo de eje.

La relevancia en la seguridad del vehículo que recae en el cuerpo del eje conlleva que además de la normativa expuesta, algunos países de la Unión Europea también exijan normativas adicionales con demandas específicas (BS - Reino Unido; DIN - Alemania; NF - Francia, etc.). La comprobación de éstas normativas adicionales no se incluye en el alcance del presente Trabajo Fin de Máster.

1.4 Alcance y objetivo del TFM.

Este trabajo es un aporte investigador basado en la experiencia laboral personal en el sector ferroviario, concretamente en el ámbito de diseño de bogies.

El flujo de trabajo actual para el desarrollo de nuevas geometrías de ejes ferroviarios es un proceso claramente optimizable, debido a que el proceso de diseño y cálculo se realizan en software independientes sin una conexión automática entre los datos de ambos. Este hecho se identifica como una posible fuente de error y conlleva elevados tiempos de comprobación de datos entre sucesivas iteraciones de cálculo y diseño.

El objetivo principal del presente trabajo es definir un método para la integración de los requerimientos de diseño y cálculo establecidos en la normativa ferroviaria europea vigente (Normativa EN) para obtener una geometría optimizada del cuerpo de eje, sus cálculos y planimetría asociada de forma automática a partir de unos datos iniciales característicos de la aplicación ferroviaria deseada.

Para una correcta comprensión del procedimiento, se exponen previamente los principales requerimientos de diseño, cálculo y planimetría establecidos en la normativa aplicable. Por último, expondrán las conclusiones alcanzadas, limitaciones del método propuesto y se propondrán posibles líneas de desarrollo futuras.

Diseño de ejes. Requisitos normativos.

Los requisitos de diseño de la normativa ferroviaria actual se basan en la experiencia adquirida en servicio y establecen un conjunto de recomendaciones para garantizar la seguridad, mantenimiento y correcto rendimiento de los nuevos desarrollos de ejes ferroviarios.

Los requisitos geométricos de la normativa EN (European Standard) aplicable a ejes ferroviarios se definen en las normas EN 13103-1 [1], EN 13103-2 [2] y EN 13260 [3] e incluyen las siguientes recomendaciones, a ser consideradas en el proceso de diseño del eje:

- Transiciones recomendadas entre secciones del cuerpo de eje.
- Relaciones diametrales entre secciones consecutivas del cuerpo eje.
- Longitudes de calado recomendadas.
- Voladizos mínimos recomendados entre superficies de calado.

Los requisitos aplicables a la planimetría asociada al cuerpo del eje se definen en la norma EN 13261 [4], estableciendo requisitos de obligado cumplimiento en los siguientes aspectos de la planimetría:

- Acabados superficiales.
- Tolerancias geométricas.
- Tolerancias dimensionales.

2.1 Requisitos geométricos.

2.1.1 Transiciones entre secciones del eje.

Las normas de diseño y cálculo de ejes de cajas de grasa externas (EN 13103-1 [1]) e internas (EN 13103-2 [2]) establecen un conjunto de transiciones recomendadas entre las distintas zonas del eje.

Las transiciones incluidas en la normativa se tratan de una recomendación de diseño, por lo que no son de obligado cumplimiento. No obstante, suele ser una práctica habitual emplear las transiciones recomendadas siempre que el diseño lo permita, pues aseguran una correcta correlación con el método de cálculo definido en las citadas normativas.

Transición superficie calada - superficie no calada

La transición entre una superficie calada y una superficie no calada debe realizarse mediante dos radios tangentes de 15 y 75 mm (ver figura 2.1).

La distancia entre el final de la superficie calada y el centro del radio de 75 mm tiene que ser superior al valor obtenido en la Ecuación 2.1 para asegurar que el punto de tensión máxima no se encuentra en la transición entre ambos radios. [5]

$$C_{min} = -3,8 + 0,0385 \cdot d + 0,381 \cdot r_{max} + 0,0279 \cdot D \quad (2.1)$$

Donde:

d : Diámetro en mm de la superficie no calada.

r_{max} : Radio máximo de la transición.

D : Diámetro en mm de la superficie calada.

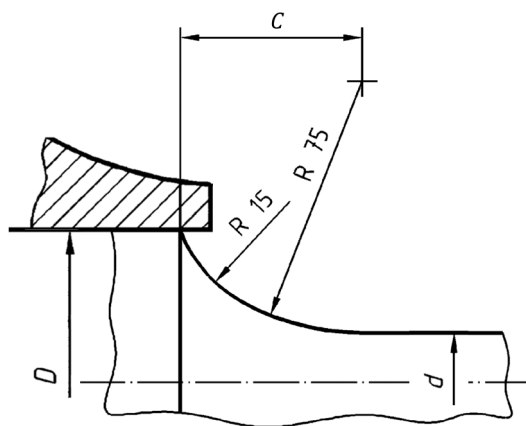


Figura 2.1: Transición. Superficie calada - Superficie no calada. [1][2]

Transición entre superficies caladas adyacentes.

Se entiende por superficies caladas adyacentes a dos superficies cuyos componentes calados se encuentran en contacto entre ellos. No deben considerarse como componentes calados anillos distanciadores ni collarines de rodamientos.

La transición entre ambas superficies caladas debe realizarse mediante una ranura constituida por una combinación de radios de profundidad máxima ligeramente inferior al desgaste previsto en los asientos (siempre que sea posible, es preferible emplear una ranura constituida por un único radio de 16mm). La ranura tiene el propósito de evitar posibles entallas en el eje debido a la diferencia de diámetros entre los componentes calados adyacentes.

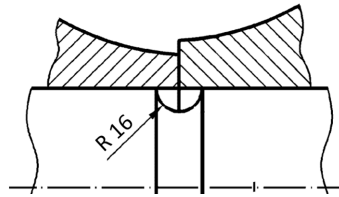


Figura 2.2: Transición. Superficies caladas adyacentes. [1][2]

Transición asiento rodamiento - mangueta - asiento rueda (Específica para cajas de grasa externas).

La norma de cálculo y diseño de ejes de cajas de grasa externas (EN13103-1 [1]) incluye una recomendación para la transición entre el asiento de rodamiento y la mangueta, y para la transición entre la mangueta y el asiento de la rueda.

La transición entre el asiento de la pista interna del rodamiento y la superficie de la mangueta (apoyo del collarín del rodamiento) es recomendable realizarla mediante dos radios de 40 mm separados una distancia a (siempre que sea posible $a=0$).

La transición entre la mangueta y el asiento calado de la rueda debe realizarse con un único radio de 25 mm.

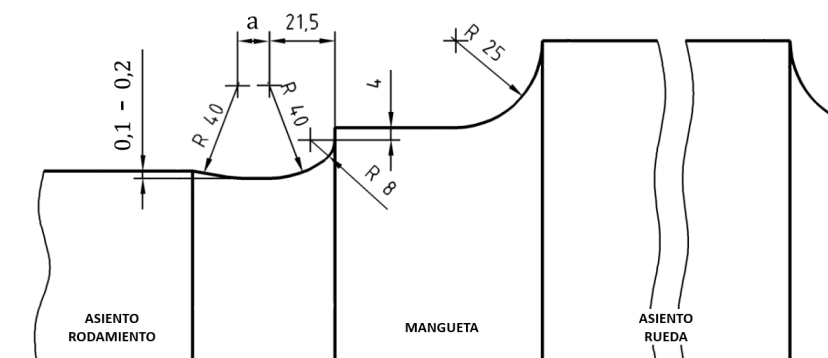


Figura 2.3: Transición. Asiento rodamiento - mangueta - asiento rueda (Cajas de grasa externas). [1]

2.1.2 Relación de diámetros y longitudes de calado.

Las normas EN 13103-1 [1] y EN 13103-2 [2] establecen una relación mínima entre los diámetros de dos superficies cilíndricas consecutivas de 1.12, siendo el valor recomendable 1.15. La relación diametral mínima constituye un requisito indispensable para la validez de los valores de tensión admisible en las secciones de cálculo definidos en la normativa (ver capítulo 3.5).

El incumplimiento de la relación diametral mínima obliga a realizar ensayos representativos de la transición para validar la geometría, por lo que es una restricción cuyo cumplimiento tiene una especial relevancia y debe respetarse siempre que sea posible.

$$\frac{d_2}{d_1} > 1,2 \quad (1,5 \text{ recomendado}) \quad (2.2)$$

Donde:

d_2 : Diámetro de la superficie cilíndrica superior.

d_1 : Diámetro de la superficie cilíndrica inferior.

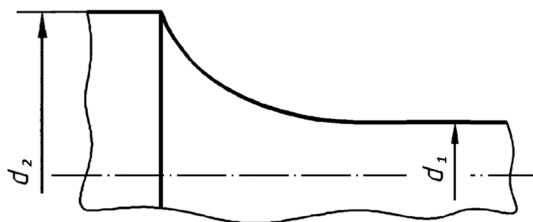


Figura 2.4: Relación diámetros superficies cilíndricas consecutivas.

2.1.3 Voladizos y longitudes de componentes calados.

Para todos los componentes calados en el eje, deben asegurarse que sus voladizos en ambos lados del eje son positivos (el componente vuela sobre el eje) considerando todas las posibles condiciones de la superficie de calado (condición nueva / condición límite de re-mecanizado).

Siempre que sea posible, en superficies caladas afectadas por reservas de mecanizado, la transición entre diámetros debe de terminar en el diámetro previsto para la condición de máximo re-mecanizado. De esta forma se evita la reducción en el voladizo del calado, debido a que el re-mecanizado afecta a la superficie de transición y se aseguran los voladizos con tolerancias de montaje menos restrictivas (ver figura 2.5).

Respetar los voladizos de los componentes calados sobre el eje es crucial para asegurar su correcto mantenimiento (operaciones de montaje / desmontaje) y para asegurar una transferencia correcta de los esfuerzos a la geometría del eje.

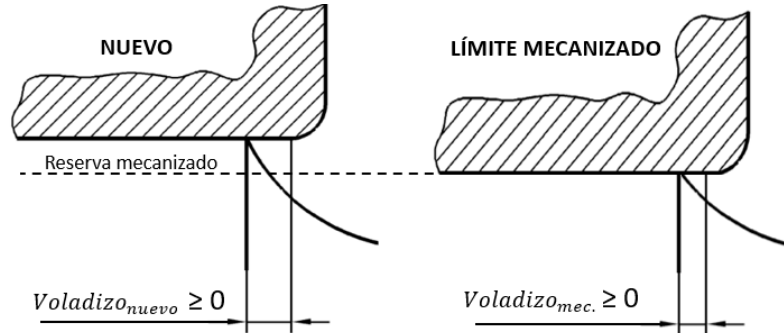


Figura 2.5: Voladizo en condición nueva (izq.) y en condición límite de mecanizado(der.).

La norma EN 13260 [3] establece un rango objetivo para la relación entre la longitud de una superficie calada y el diámetro del calado.

$$0,8 \cdot d_{calado} \leq L_{calado} \leq 1,1 \cdot d_{calado} \quad (2.3)$$

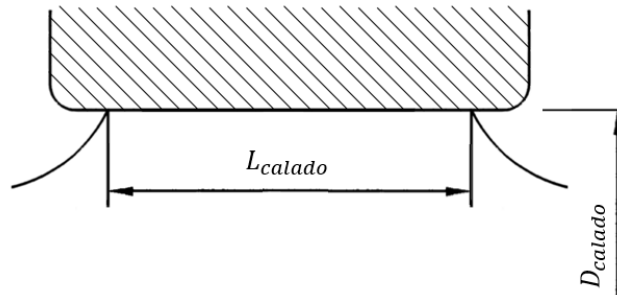


Figura 2.6: Longitud y diámetro de calado.

2.2 Requisitos planimetría.

2.2.1 Acabados superficiales.

El cumplimiento de los acabados superficiales establecidos en la normativa es un requisito de obligado cumplimiento en la planimetría de un eje, debido a su influencia directa en la seguridad, durabilidad y proceso de montaje del eje.

La figura 2.7 define las superficies del eje con requerimientos superficiales normativos. Los valores de rugosidad superficial en cada una de dichas superficies puede consultarse en la *Tabla 7* de la normativa EN 13261 [4].

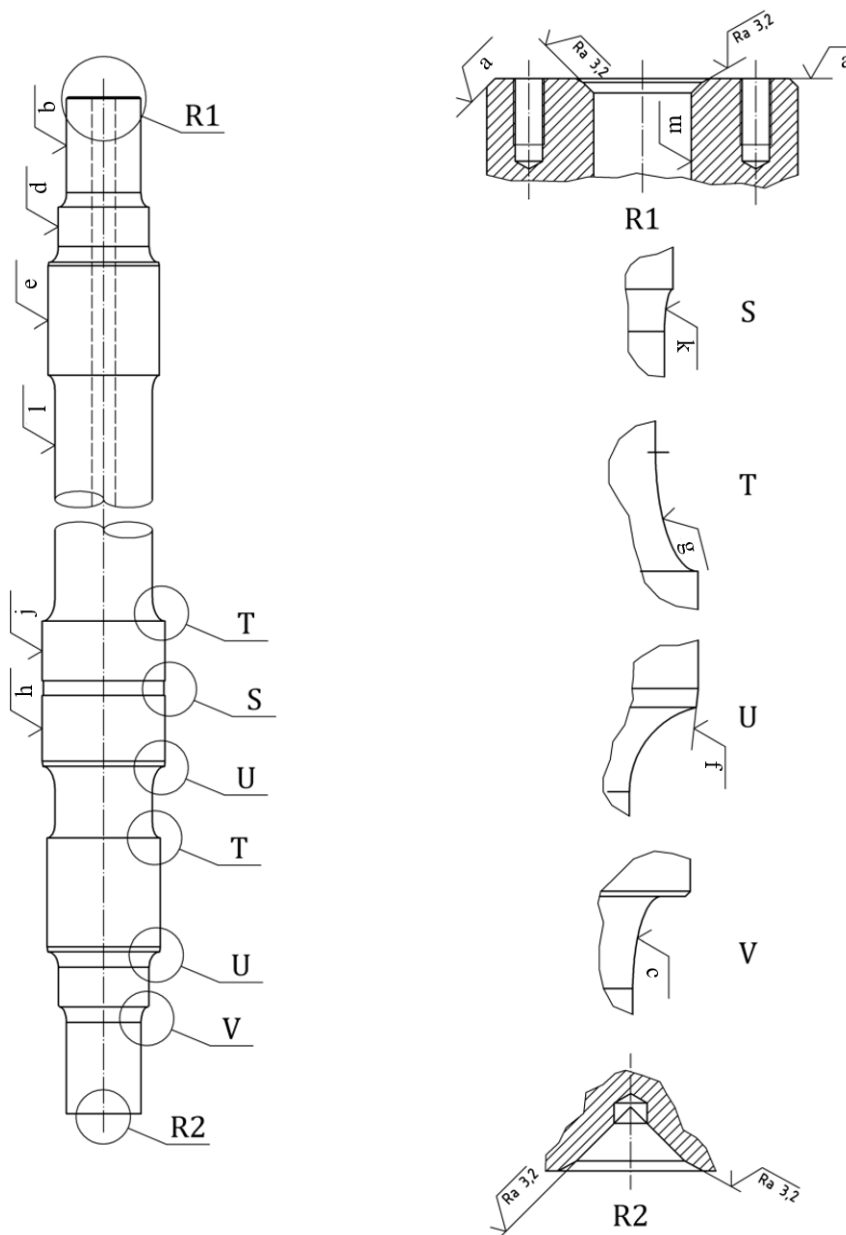


Figura 2.7: Planimetría cuerpo de eje. Acabados superficiales. [4]

2.2.2 Tolerancias geométricas.

El cumplimiento de las tolerancias geométricas establecidas en la normativa es un requisito de obligado cumplimiento en la planimetría de un eje debido a su influencia en la seguridad, estabilidad y generación de ruido durante la operación del eje montado.

La figura 2.8 define las tolerancias geométricas aplicables a cada una de las superficies del eje. El valor admisible para cada una de las tolerancias debe consultarse en la *Tabla 9* de la normativa EN 13261 [4].

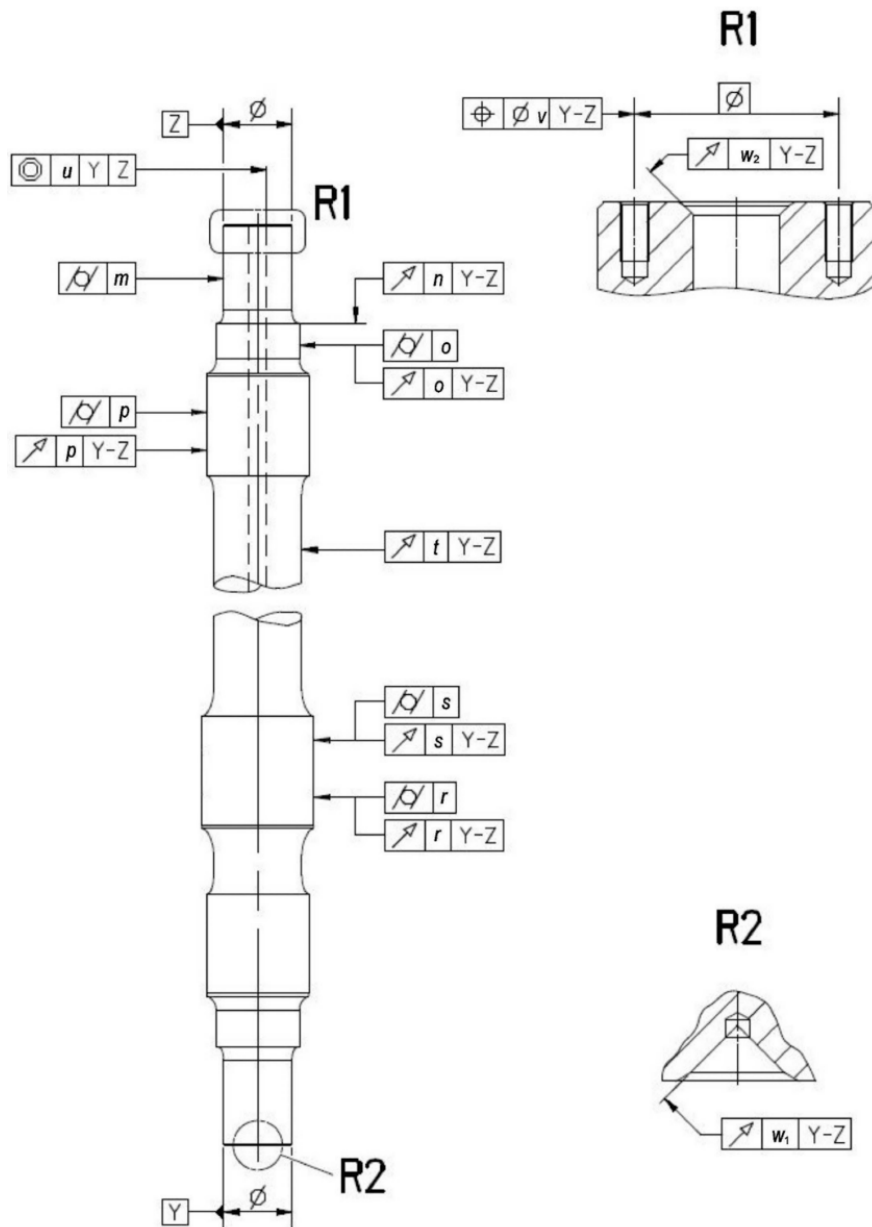


Figura 2.8: Planimetría cuerpo de eje. Tolerancias geométricas. [4]

2.2.3 Tolerancias dimensionales.

El cumplimiento de las tolerancias dimensionales establecidas en la normativa es un requisito de obligado cumplimiento en la planimetría de un eje debido a su influencia en procedimientos de montaje e interoperabilidad.

La figura 2.8 define las dimensiones del eje afectadas por tolerancias dimensionales. El valor del intervalo de tolerancia en cada una de las dimensiones se encuentra reflejado en la *Tabla 10* de la normativa EN 13261 [4].

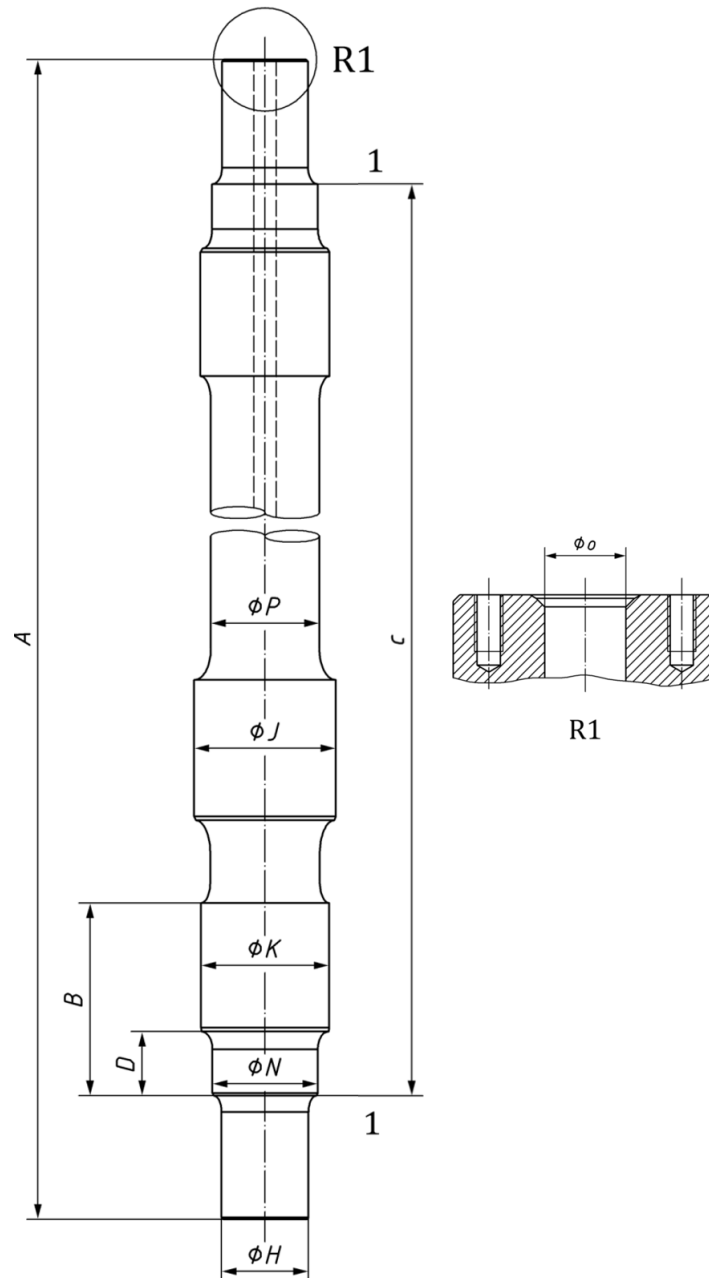


Figura 2.9: Planimetría cuerpo de eje. Tolerancias dimensionales. [4]

Cálculo de ejes. Requisitos normativos.

El cuerpo de eje es uno de los componentes críticos en la seguridad de operación ferroviaria que ha experimentado una mayor tasa de fallos mecánicos asociados con fenómenos de fatiga.

Su dimensionamiento y optimización han sido objeto de recurrentes estudios y se han desarrollado múltiples métodos para su diseño y cálculo, basados en la experiencia en servicio, inspecciones de fallo y su correlación con ensayos de fatiga en laboratorio.

Los procedimientos de cálculo empleados en el presente Trabajo Fin de Máster son acordes a los requerimientos establecidos en la normativa EN (European Standard) aplicable:

- EN13103-1: Método de diseño y cálculo para ejes de cajas de grasa externas. [1]
- EN13103-2: Método de diseño y cálculo para ejes de cajas de grasa internas. [2]

Ambas normas establecen un método de cálculo basado en las tensiones nominales de la teoría de vigas. Las tensiones obtenidas en el cuerpo de eje, generadas por las cargas definidas en las normativas, se multiplican por factores de corrección determinados experimentalmente y se comparan con las tensiones máximas admisibles, también definidas por experimentación.

Las principales fases en el cálculo de un eje ferroviario son:

1. Identificar la tipología de eje montado y las características de los componentes equipados.
2. Definición de las secciones de cálculo en la geometría del eje.
3. Cálculo de los momentos resultantes en cada sección, considerando las cargas asociadas a las masas en movimiento sobre el eje y condiciones de tracción y freno.
4. Cálculo de la tensión en cada sección.
5. Comparación de la tensión obtenida con la tensión máxima admisible.

3.1 Definición de tipología de eje montado y componentes equipados

Partiendo de una geometría de cuerpo de eje que cumpla los requisitos de diseño requeridos en la normativa aplicable (ver capítulo 2), para la correcta aplicación del método de cálculo asociado es necesario identificar las siguientes características del eje montado:

- Tipo de cajas de grasa (externas / internas).
- Tipo de eje (motor / remolque no guía / remolque guía).
- Equipo de freno instalado.
- Equipamiento motriz instalado (sólo en ejes motores).

El tipo de cajas de grasa del eje montado determina si la normativa de cálculo aplicable es la referente a cajas de grasa externas (EN13103-1 [1]) o la referente a cajas de grasa internas (EN13103-2 [2]), por lo que es el primer parámetro a identificar para comenzar el procedimiento de cálculo.

La tipología de eje influye en la magnitud de las fuerzas debidas al movimiento de las masas sobre el eje (capítulo 3.3.1), y en los límites de tensión admisibles sus secciones de cálculo (capítulo 3.5).

Las tipologías de equipamiento de freno y motriz instalado influyen en la distribución de los esfuerzos generados en las distintas zonas del eje, y los requerimientos de tracción y frenado determinan la magnitud de los mismos (capítulos 3.3.2 y 3.3.3).

3.2 Definición de las secciones de cálculo en la geometría del eje.

Una vez identificada la tipología de eje montado, se deben definir las secciones que requieren ser analizadas según establece el método de cálculo de ejes ferroviarios.

El nivel de tensión en el eje está determinado por los diámetros exteriores e interiores presentes en su longitud, así como por el efecto de los distintos concentradores de tensiones generados en las transiciones entre dichos diámetros. Por ello, el método de cálculo de la normativa aplicable requiere secciones de cálculo en los siguientes puntos del eje:

- Diámetros exteriores del eje.
- Puntos inferiores de radios de transición entre distintos diámetros.
- Puntos de intersección entre dos radios de transición.

Para cada una de las secciones resultantes es necesario identificar su tipología, la cual determina los parámetros de cálculo para el factor de concentrador de tensiones (ver figuras 3.13 y 3.14) y la tensión máxima admisible en la la sección (ver capítulo 3.5). Los tipos de secciones establecidos en la norma son los siguientes:

- Sección tipo 1: Cojinetes de deslizamiento, áreas no caladas, radios de transición y diámetro inferior en ranuras de calados.
 - Sección tipo 1T: Aplicable a radios de transición entre secciones caladas y no caladas.
 - Sección tipo 1G: Aplicable a gargantas entre dos secciones caladas adyacentes.
- Sección tipo 2: Todos los diámetros calados con la excepción de asientos de rodamientos y cojinetes de deslizamiento.
- Sección tipo 3: Asientos de rodamientos.
- Sección tipo 4: Agujero del eje.

3.3 Cálculo de momentos en el cuerpo de eje.

Las normativas EN13103-1 [1] y EN13103-2 [2] establecen los esfuerzos a considerar en cada una de las zonas del eje en función de la tipología de eje montado y los componentes que lo conforman.

El sistema de coordenadas a considerar como referencia en los momentos descritos en el presente capítulo se define en la figura 3.1.

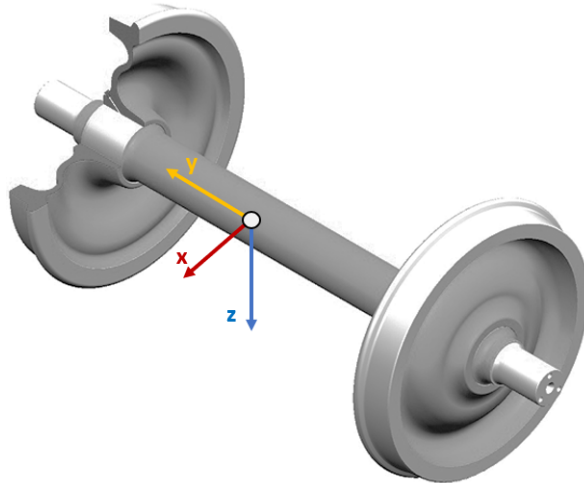


Figura 3.1: Sistema de coordenadas para el cálculo de momentos.

En el presente capítulo se describirá la metodología de cálculo para obtener los esfuerzos asociados a las cargas presentes durante la operación de un eje montado:

- Movimiento de las masas sobre el eje.
- Esfuerzos de frenado.
- Esfuerzos de tracción.

La metodología normativa de cálculo requiere calcular la contribuciones de esfuerzos de cada una de las fuentes citadas y posteriormente obtener el momento resultante en cada una de las secciones de cálculo del eje que caracteriza su nivel tensional.

3.3.1 Fuerzas y momentos debidos a masas en movimiento.

El movimiento de las masas soportadas por el eje montado (m_1) introduce en el cuerpo de eje un conjunto de fuerzas contenidas en el plano vertical de simetría del eje montado (plano YZ), dando como resultado un momento perpendicular a dicho plano que intersecta la línea central del eje (M_x).

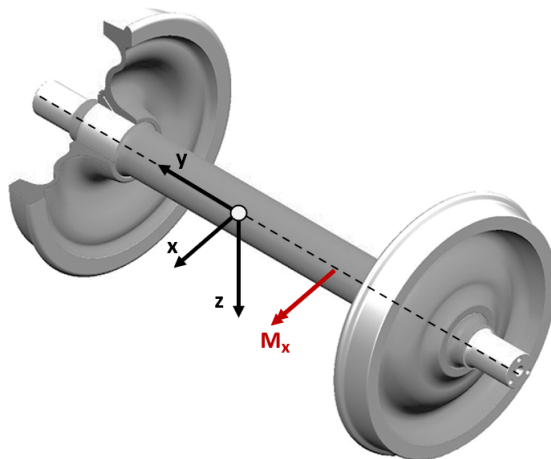


Figura 3.2: Momento generado por masas en movimiento.

La carga generada por los movimientos de las masas sobre el eje montado se transfiere al cuerpo de eje a través de los rodamientos (fuerzas $P1$ y $P2$). El cuerpo de eje transfiere dicha carga a la vía a través del punto de contacto rueda carril (fuerzas $Q1$ y $Q2$). La diferencia de carga vertical entre los dos puntos de contacto rueda carril, junto con la conicidad del perfil de rueda, ocasiona una diferencia entre las fuerzas horizontales de contacto rueda carril ($Y1$ e $Y2$) que es compensada por la fuerza horizontal H . Por último, los componentes calados al cuerpo del eje entre las ruedas (discos de freno, coronas de reductores, etc.) introducen en el eje fuerzas internas (F_i) proporcionales a la masa del componente instalado.

Las notorias diferencias constructivas entre ejes montados de cajas de grasa externas e internas, conlleva que la distribución de las fuerzas debidas a las masas en movimiento a lo largo del eje difiera entre ambas tipologías de eje montado. La distribución de fuerzas para ejes montados de cajas de grasa externas se representa en la figura 3.3 y para ejes montados de cajas de grasa internas en la figura 3.7. Los sentidos de las fuerzas establecidos en dichas figuras deben respetarse, ya que representan el peor escenario de carga para cada tipología de eje.

Las ecuaciones para el cálculo de las fuerzas asociadas a las masas en movimiento para ejes montados de cajas de grasa externas se incluyen en las figuras 3.4 y 3.5, mientras que las aplicables a cajas de grasa internas se incluyen en las figuras 3.8 y 3.9.

Para seleccionar las ecuaciones aplicables al cálculo de las fuerzas asociadas a las masas en movimiento, deben considerarse los siguientes aspectos:

- Las ecuaciones difieren entre ejes montados de cajas de grasa externas e internas.
- La posición del origen a considerar en la aplicación de las ecuaciones es diferente en cada una de las tipologías del eje.
- En ejes montados de cajas de grasa externas, las ecuaciones difieren entre ejes remolques no guía y el resto de tipologías.
- En ejes montados de cajas de grasa internas, se definen dos casos de carga que deben de analizarse (recta y curva) , sea cual sea la tipología de eje.
- Para ambas tipologías de eje montado, se definen ecuaciones específicas para anchos de vía reducidos (ancho métrico e inferior). Las ecuaciones a aplicar para ejes montados de cajas de grasa internas y anchos métricos, no se encuentran definidas en la norma, quedando declarado que serán incluidas en versiones próximas.
- Las ecuaciones son válidas para configuraciones suspensión estándar (no válidas para vehículos con suspensiones pendulares).

Una vez calculadas las cargas debidas a las masas en movimiento para la configuración de eje montado aplicable, debe calcularse el momento M_x en cada una de las secciones del eje en función de la zona del eje donde se ubica la sección.

Las ecuaciones para el cálculo del momento M_x en ejes montados de caja de grasa externas se incluyen en la figura 3.6 y las equivalentes para ejes montados de cajas de grasa internas en la figura 3.10.

Ejes montados de caja de grasa externas.

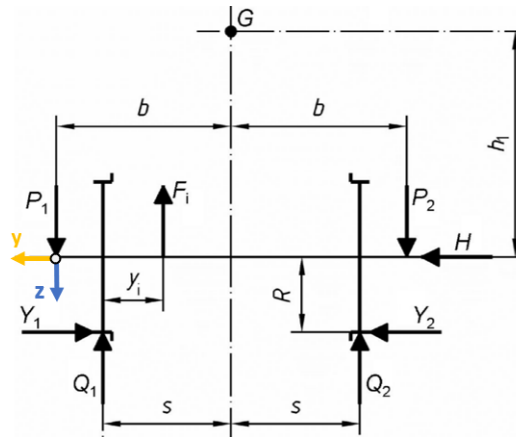


Figura 3.3: Distribución de fuerzas. Eje montado de cajas de grasa externas. [1]

Non guiding non powered axles	$P_1 = (0,625 + 0,075h_i / b)m_i g$ $P_2 = (0,625 - 0,075h_i / b)m_i g$ $Y_1 = 0,30m_i g$ $Y_2 = 0,15m_i g$ $H = Y_1 - Y_2 = 0,15m_i g$
Guiding axles and all powered axles	$P_1 = (0,625 + 0,0875h_i / b)m_i g$ $P_2 = (0,625 - 0,0875h_i / b)m_i g$ $Y_1 = 0,35m_i g$ $Y_2 = 0,175m_i g$ $H = Y_1 - Y_2 = 0,175m_i g$
For all axles	$Q_1 = \frac{1}{2s} [P_1(b+s) - P_2(b-s) + (Y_1 - Y_2)R - \Sigma_i F_i(2s - y_i)]$ $Q_2 = \frac{1}{2s} [P_2(b+s) - P_1(b-s) - (Y_1 - Y_2)R - \Sigma_i F_i y_i]$

Figura 3.4: Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa externas - Ancho estándar. [1]

For non-guiding non-powered axles	$P_1 = (0,65 + 0,0975 h_i / b) m_i g$ $P_2 = (0,65 - 0,0975 h_i / b) m_i g$ $Y_1 = 0,35 m_i g$ $Y_2 = 0,15 m_i g$ $H = Y_1 - Y_2 = 0,20 m_i g$
For all other axles in the scope of this standard	$P_1 = (0,65 + 0,114 h_i / b) m_i g$ $P_2 = (0,65 - 0,114 h_i / b) m_i g$ $Y_1 = 0,40 m_i g$ $Y_2 = 0,175 m_i g$ $H = Y_1 - Y_2 = 0,225 m_i g$
For all axles	$Q_1 = \frac{1}{2s} [P_1(b+s) - P_2(b-s) + (Y_1 - Y_2)R - \Sigma_i F_i(2s - y_i)]$ $Q_2 = \frac{1}{2s} [P_2(b+s) - P_1(b-s) - (Y_1 - Y_2)R - \Sigma_i F_i y_i]$

Figura 3.5: Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa externas - Ancho métrico. [1]

General outline of M_x variations	Between loading plane and rolling circle	Between rolling circles
	<p style="text-align: center;">$M_x = P_1 y$</p>	<p style="text-align: center;">$M_x = P_1 y - Q_1(y - b + s) + Y_1 R - \Sigma_i F_i(y - b + s - y_i)$</p>

Figura 3.6: Momento masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa externas. [1]

Ejes montados de caja de grasa internas.

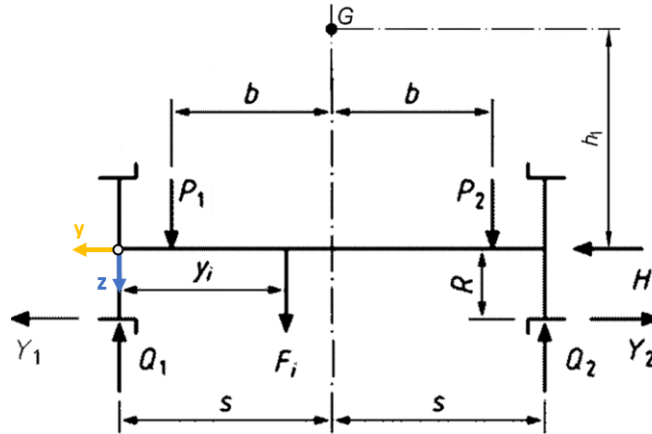


Figura 3.7: Distribución de fuerzas. Eje montado de cajas de grasa internas. [2]

Load case 1: Straight track	$P_1 = 0,8m_1g$ $P_2 = 0,8m_1g$ $Y_1 = 0$ $Y_2 = 0$ $H = 0$
Load case 2: Curve	$P_1 = (0,5625 + 0,0375h_1 / b)m_1g$ $P_2 = (0,5625 - 0,0375h_1 / b)m_1g$ $Y_1 = 0,135m_1g$ $Y_2 = 0,21m_1g$ $H = Y_2 - Y_1 = 0,075m_1g$
For load cases 1 and 2	$Q_1 = \frac{1}{2s} \left[P_1(s+b) + P_2(s-b) + (Y_2 - Y_1)R + \sum_i F_i y_i (2s - y_i) \right]$ $Q_2 = \frac{1}{2s} \left[P_1(s-b) + P_2(s+b) - (Y_2 - Y_1)R + \sum_i F_i y_i \right]$
* Valid for guiding and non-guiding axles.	

Figura 3.8: Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa internas - Ancho estándar. [2]

Load case 1: Straight track	$P_1 = 0,8m_1g$ $P_2 = 0,8m_1g$ $Y_1 = 0$ $Y_2 = 0$ $H = 0$
Load case 2: Curve	$P_1 = (0,5625 + 0,0375h_1 / b)m_1g$ $P_2 = (0,5625 - 0,0375h_1 / b)m_1g$ $H = Y_2 - Y_1 = 0,075m_1g$
For load cases 1 and 2	$Q_1 = \frac{1}{2s} \left[P_1(s+b) + P_2(s-b) + (Y_2 - Y_1)R + \sum_i F_i y_i (2s - y_i) \right]$ $Q_2 = \frac{1}{2s} \left[P_1(s-b) + P_2(s+b) - (Y_2 - Y_1)R + \sum_i F_i y_i \right]$
* Valid for guiding and non-guiding axles.	

No definido
CEN/TS 13103-2:2020

Figura 3.9: Fuerzas masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa internas - Ancho métrico. [2]

General outline of M_x variations	Between rolling circle and loading plane	Between loading planes
	$M_x = Q_1 y + Y_1 R$	$M_x = Q_1 y + Y_1 R - P_1 (y - s + b) - \sum_i (F_i (y - y_i))$

Figura 3.10: Momento masas en movimiento. Eje montado cajas de grasa internas. [2]

3.3.2 Fuerzas y momentos debidos a equipamiento de freno.

El equipamiento de freno instalado en el eje montado introduce momentos de frenado en las tres componentes del eje.

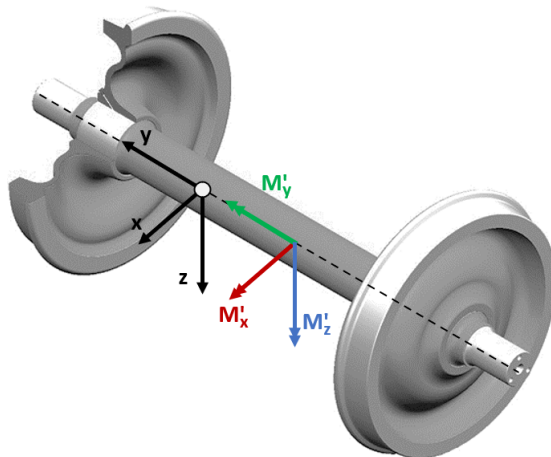


Figura 3.11: Momentos generados por el equipo de freno.

La tipología de cajas de grasa, así como el equipo de freno instalado y su posicionamiento en el eje, determinan la distribución de momentos aplicable. En caso de equipar distintas tipologías de freno en un mismo eje montado, los momentos resultantes para cada una de las componentes pueden obtenerse superponiendo las componentes de las distribuciones de momentos que se obtendrían individualmente para cada una de las tipologías de freno.

El equipamiento de freno puede estar constituido por frenos de fricción, freno electro-motriz (solo en ejes motores), o la combinación de ambos.

- **Equipo de freno de fricción:** Se caracteriza por introducir momentos de frenado en los ejes x y z directamente proporcionales a la fuerza de frenado ejercida por el actuador de freno y al factor de fricción, mientras que la componente en el eje y es proporcional a la masa a frenar. Las fórmulas normativas aplicables al cálculo de momentos de freno de fricción en las distintas zonas del eje se encuentran reflejadas en la *Tabla 5* de las normativas EN13103-1 [1] y EN13103-2 [2].
- **Equipo de freno electromotriz:** En ejes montados con equipamiento motriz (ejes motores), es necesario incluir la contribución del freno electromotriz en cada una de las componentes del momento resultante. Las componentes de momento asociadas al freno electromotriz no se encuentran definidas en la normativa aplicable, pero establece que deben ser consideradas para el cálculo del eje. Las múltiples tipologías existentes de equipamiento motriz y su fuerte influencia sobre la distribución de momentos generada en el eje, conlleva que el análisis de los momentos introducidos en el eje suela realizarse por los tecnólogos del equipamiento motriz.

En el caso de que el eje montado no incluya ningún equipamiento de freno, debe de considerarse un único momento en el eje y que cuantifica el efecto de diferencias de diámetro de rueda y el efecto de paso por curva.

$$M'_y = 0,2 \cdot P \cdot R \quad (3.1)$$

Donde:

$P = 0,5 \cdot (m_1 + m_2) \cdot g$: Mitad de la carga por eje.

R : Radio de rueda.

3.3.3 Fuerzas y momentos debidos al equipo motriz.

El equipamiento motriz instalado en el eje montado genera momentos en todas las componentes del eje, cuyas magnitudes y distribución en las distintas zonas del eje dependen fuertemente de la tipología de equipo motriz empleada.

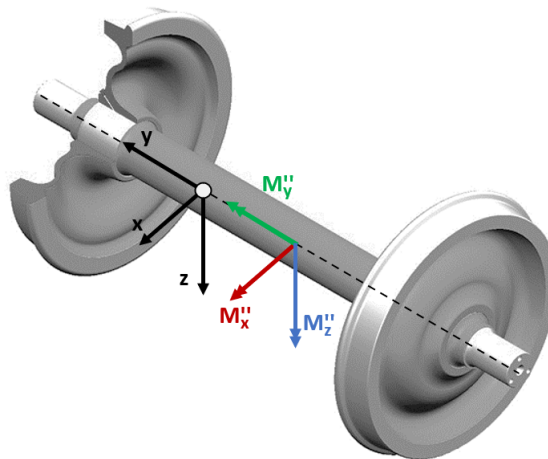


Figura 3.12: Momentos generados por el equipo motriz.

En ejes montados con equipos motrices estándar, el orden de magnitud de los esfuerzos de tracción es significativamente inferior a los de frenado. Además, el control de tracción y freno del vehículo asegura que no puedan ocurrir simultáneamente los escenarios de tracción y freno. Esto conlleva sea una práctica habitual despreciar los esfuerzos de tracción en el procedimiento de cálculo de ejes ferroviarios.

En ejes montados con equipamiento motriz de alto par tractor, el par de tracción puede ser relevante en el procedimiento de cálculo. La normativa de cálculo de ejes no define las ecuaciones a emplear en dichas aplicaciones, debido al elevado número de configuraciones de equipamiento motriz existentes en el mercado. En la práctica habitual, la magnitud y distribución en las distintas zonas del eje a considerar para los momentos de tracción suelen ser proporcionados por el tecnólogo del equipo motriz.

3.3.4 Momento resultante.

Una vez obtenidas las componentes de los momentos en cada una de las secciones del eje, el momento resultante en cada sección se calcula según la Ecuación 3.2 (válida para ejes montados con una capacidad de tracción estándar).

$$M_R = \sqrt{(M_x + M'_{xElec} + \sum M'_{xMec})^2 + (M'_{yElec} + \sum M'_{yMec})^2 + (M'_{zElec} + \sum M'_{zMec})^2} \quad (3.2)$$

Donde:

M_x : Momento en dirección x debido a masas en movimiento.

M'_{iElec} : Momentos de freno electromecánico (motor) en las direcciones $i = x/y/z$.

M'_{iMec} : Momentos de freno mecánico (equipo de freno) en las direcciones $i = x/y/z$.

Para ejes montados con par de tracción muy elevado, el *Apartado 6.5* de la EN13103-1 [1] y de la EN13103-2 [2] define los escenarios a evaluar para determinar los momentos en el cuerpo del eje.

3.4 Cálculo de tensión.

Los cambios de diámetro entre las distintas secciones del eje conllevan un incremento de la tensión en la sección de estudio. La normativa aplicable incluye este fenómeno por medio del factor corrector de tensiones K , el cual depende de relaciones entre diámetros y radios de transición, así como de la clase de transición (ver capítulo 3.2).

En una transición entre dos superficies cilíndricas, la sección asociada al diámetro máximo tiene un factor K igual a 1. Para secciones asociadas al diámetro mínimo e intermedio de una transición (en el caso de transiciones compuestas por dos radios), las expresiones a emplear para calcular el factor de corrección de tensión se definen en la figura 3.13 y en la figura 3.14.

Una vez obtenido el factor K , se calcula la tensión en la superficie exterior e interior del eje según las ecuaciones Ecuación 3.3 y Ecuación 3.4

$$\sigma_{ext} = \frac{32 \cdot K \cdot M_R \cdot d}{\pi \cdot (d^4 - d'^4)} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{int} = \frac{32 \cdot K \cdot M_R \cdot d'}{\pi \cdot (d^4 - d'^4)} \quad (3.4)$$

σ_{ext} : Tensión máxima en la superficie exterior del eje.

σ_{int} : Tensión en la superficie interior del eje (sólo en ejes huecos).

K : Factor concentrador de tensiones (figura 3.13 y figura 3.14).

M_R : Momento en el eje según la Ecuación 3.2.

d : Diámetro exterior de la sección.

d' : Diámetro del agujero de la sección (sólo en ejes huecos).

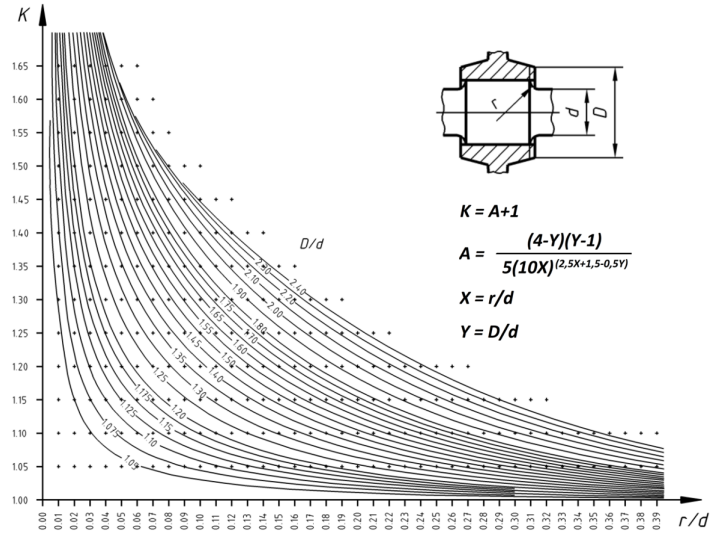


Figura 3.13: Concentrador tensiones para secciones tipo 1T. [1]

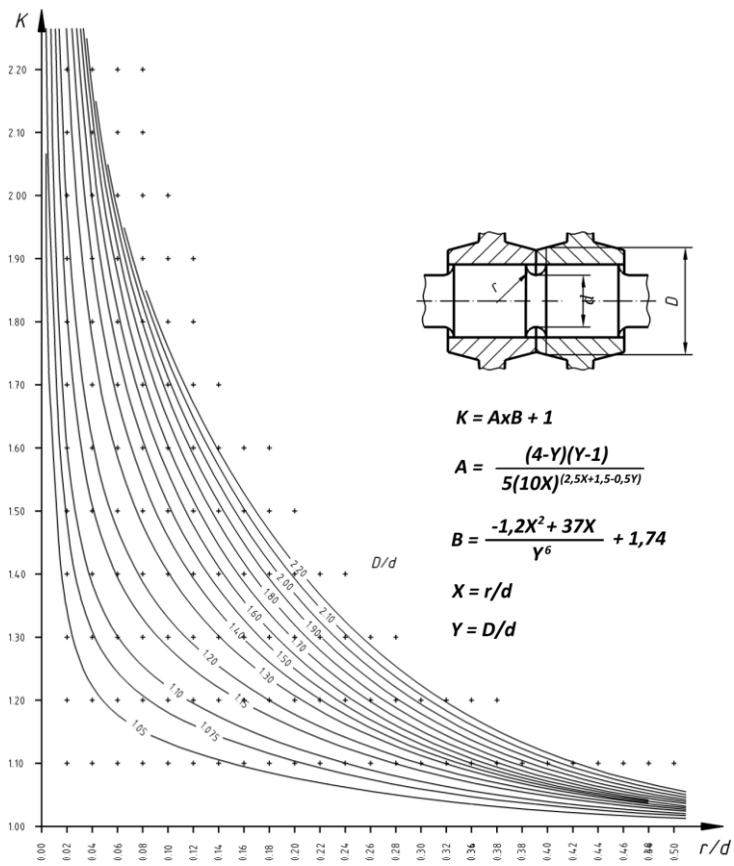


Figura 3.14: Concentrador tensiones para secciones tipo 1G. [1]

3.5 Tensión máxima admisible.

Una vez obtenida la tensión en cada una de las secciones de cálculo de la geometría del eje, el último paso establecido en el procedimiento de cálculo consiste en comparar el valor de tensión obtenido con la tensión admisible en la sección.

La tensión máxima admisible en una determinada sección de cálculo del eje está determinada por los siguientes parámetros:

- Material empleado (EA1N / EA1T / EA4T).
- Geometría del eje (Eje hueco / Eje macizo).
- Tipo de eje del eje (Eje remolque / Eje con equipo motriz calado por interferencia / Eje con equipo motriz sin calado).
- Tipo de sección de cálculo (Tipo 1 / Tipo 2 / Tipo 3 / Tipo 4).

Los valores de tensión admisible incluidos en la normativa en función de los parámetros mencionados se resumen en la figura 3.15.

Material	Tipo de eje	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	
EA1N	Ejes motores con calado por interferencia	133	80	80	-	
	Eje macizo Ejes motores sin calado por interferencia	154	92	92	-	
	Ejes remolque	166	100	100	-	
EA1T	Ejes motores con calado por interferencia	133	73	63	53	
	Eje hueco Ejes motores sin calado por interferencia	154	85	72	62	
	Ejes remolque	166	92	78	67	
EA4T	Ejes motores con calado por interferencia	145	87	87	-	
	Eje macizo Ejes motores sin calado por interferencia	167	101	101	-	
	Ejes remolque	180	110	180	-	
	Eje hueco	Ejes motores con calado por interferencia	145	80	68	58
		Ejes motores sin calado por interferencia	167	92	78	67
		Ejes remolque	180	99	85	72

Figura 3.15: Tensiones máximas admisibles [N/mm^2]. [1]

Método para la automatización del diseño y cálculo de ejes.

En este capítulo se describe el método propuesto en el presente Trabajo Fin de Máster para automatizar los procedimientos de diseño y cálculo según la normativa ferroviaria aplicable descrita en los capítulos 2 y 3.

El método propuesto comprende la ampliación progresiva de dos ficheros de datos, uno en Excel y otro en NX. La figura 4.1 representa el diagrama de flujo de la automatización desarrollada. Las nuevas tipologías de eje montado requieren ser pre-configuradas en ambos ficheros la primera vez que son diseñadas. La pre-configuración de nuevas tipologías en Excel se realiza empleando una base de datos normativos con el objetivo de simplificar el proceso. Una vez establecida la pre-configuración de una tipología de eje en el fichero de datos, el diseño y cálculo de nuevos diseños asociados a dicha tipología se realiza de forma automática a partir de los datos proporcionados en el módulo de entrada.

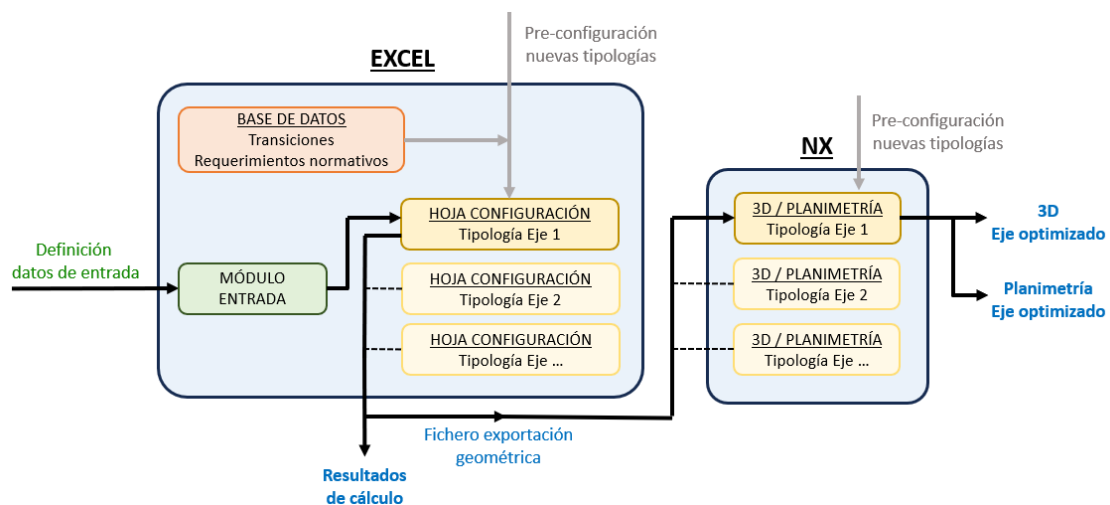


Figura 4.1: Diagrama de flujo. Automatización propuesta.

Las fases del método propuesto para la automatización del proceso de diseño y cálculo de un eje ferroviario se resumen en:

1. **Definición del módulo de entrada de datos:** El diseño de un eje montado comienza con la identificación de sus componentes principales (determinados fundamentalmente por la aplicación ferroviaria deseada para el eje) y sus posicionamientos en el eje para asegurar una correcta integración con el resto de equipamiento del bogie. Estos datos son introducidos en un módulo de entrada del programa, el cual solicita los datos requeridos secuencialmente en diversas pantallas de datos para su correcta definición.
2. **Automatización geométrica del eje:** Una vez definidas las interfaces y posicionamientos de los componentes principales del eje montado, la geometría preliminar del cuerpo del eje se define conectando las interfases requeridas por el equipamiento mediante transiciones y secciones que cumplen los requisitos de diseño establecidos en la normativa.
3. **Automatización del cálculo y optimización geométrica:** Las secciones de cálculo son extraídas de la geometría del eje automáticamente y los requerimientos normativos de cálculo se integran en el programa para obtener los coeficientes de seguridad de cada una de las secciones.

El procedimiento de optimización se basa en un proceso iterativo partiendo de la geometría inicial del cuerpo del eje, modificando los diámetros de sus distintas secciones hasta conseguir un factor de seguridad definido en los datos de entrada.

4. **Automatización de la planimetría en software diseño CAD:** Las dimensiones del eje optimizado se transfieren al programa de diseño CAD para la obtención del modelo 3D y planimetría asociada de forma automática.

4.1 Herramientas de software.

El método para la automatización del diseño y cálculo de ejes ferroviarios descrito en el presente Trabajo Fin de Máster emplea un software para la entrada, procesamiento y exportación de los datos optimizados (Excel) y un software de diseño CAD para la obtención del modelo 3D y su planimetría asociada (Siemens NX).

La elección de Excel como programa de procesamiento de datos se basa en su universalidad, permitiendo que la herramienta desarrollada sea fácilmente accesible. Los datos de entrada del eje montado se introducen en una hoja de Excel, donde son procesados hasta obtener los cálculos y dimensiones optimizadas para el eje.

El procedimiento detallado en el presente Trabajo Fin de Máster emplea macros, funciones avanzadas y el módulo Solver de Excel, por lo que para su correcta implementación se recomienda emplear una versión actualizada del software, habilitar el módulo de Solver y la ejecución de macros Visual Basic en las opciones de la hoja de cálculo (figura 4.2), así como la ejecución de Solver en el entorno de Visual Basic (figura 4.3).

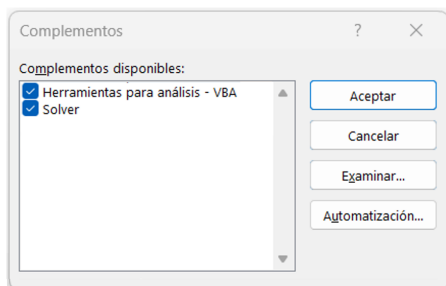


Figura 4.2: Habilitar Solver y Visual Basic (VBA) en opciones Excel.

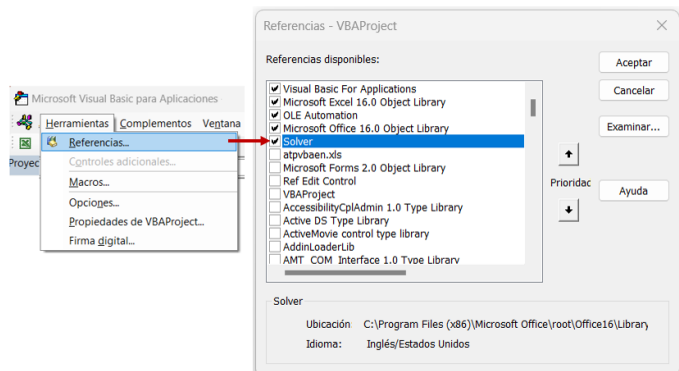


Figura 4.3: Habilitar Solver en el entorno Visual basic (VBA).

El software de diseño CAD empleado es Siemens NX por su uso ampliamente extendido en el sector ferroviario. El módulo de expresiones de Siemens NX permite la exportación e importación de expresiones predefinidas por el usuario, por lo que habilita una fácil parametrización de la geometría del eje.

Las geometrías de los ejes son definidas en Siemens NX, integrando las transiciones normativas y parametrizando sus dimensiones características por medio de expresiones. La parametrización de las dimensiones del eje permite la importación de los resultados optimizados obtenidos en el software de procesamiento de datos (Excel), generando la geometría y planimetría asociada al eje optimizado de forma automática.

4.2 Módulo de entrada de datos.

El programa Excel desarrollado en el presente Trabajo Fin de Máster incluye un módulo de entrada de datos con el objetivo de guiar al diseñador en éste proceso.

Los datos definidos en el módulo de entrada determinan la hoja de configuración aplicable a la tipología de eje a analizar, así como las dimensiones y características principales del equipamiento a integrar en el cuerpo de eje.

Se establecen diversas pantallas de datos en las que se solicitan secuencialmente los datos de entrada, incluyendo celdas de validación en las transiciones entre distintas pantallas que comprueban que los datos introducidos se encuentran correctamente definidos antes de avanzar a la siguiente pantalla.

Por último, el módulo de entrada de datos también se emplea como interfaz para la validación de resultados de cálculo, su optimización y exportación de la geometría optimizada al software de diseño.

4.2.1 Datos de entrada 1: Definición de la tipología de eje montado.

La primera pantalla de datos de entrada (ver figura 4.4) incluye los campos relacionados con el equipamiento instalado en el eje montado que determinan la hoja de configuración aplicable.

La selección de la tipología de caja de grasa (externas / internas) adquiere especial relevancia, debido a que determina la normativa para el diseño y cálculo del eje según lo expuesto en el Capítulo 2 y Capítulo 3.

El equipamiento de freno y motriz definido como datos de entrada determinan las superficies de calado requeridas a lo largo del eje, así como las fórmulas a emplear para el cálculo de momentos dentro de la normativa aplicable según lo descrito en los capítulos 3.3.2 y 3.3.3.

DEFINICIÓN - Eje montado	
Tipo caja de grasa	(Externas / Internas)
Tipo de eje	(Motor / Remolque)
Eje guia	(Si / No)

DEFINICIÓN - Equipo de freno	
Bloques de freno en llanta	(Si / No)
Discos integrados rueda	(Si / No)
Dos discos calados en eje (sim)	(Si / No)

DEFINICIÓN - Equipo motriz	
Tipo de equipo motriz	
Calado drive	(Si / No)

Figura 4.4: Datos de entrada 1. Definición de tipología de eje montado.

Tras la definición de los datos requeridos en la figura 4.4, se obtiene toda la información necesaria para establecer las interfases requeridas en la geometría del eje, las cuales determinan tipología de eje asociada y, por tanto, la hoja de configuración a emplear en el proceso de diseño y cálculo del eje.

De forma ilustrativa, la figura 4.5 incluye los datos de entrada requeridos para una tipología de *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*, estableciendo de forma automática la hoja de configuración asociada a dicha tipología de eje, la cual incluye las interfases requeridas a lo largo del cuerpo de eje para la integración del equipamiento de eje montado (ver figura 4.6) y los requerimientos normativos asociados (*EN 13103-1. Método de diseño para ejes de cajas de grasa externas* [1]).

Reiniciar Borrar Validar

DEFINICIÓN - Eje montado		
Tipo caja de grasa	(Externas / Internas)	Externas
Tipo de eje	(Motor / Remolque)	Remolque
Eje guía	(Si / No)	No

DEFINICIÓN - Equipo de freno		
Bloques de freno en llanta	(Si / No)	No
Discos integrados rueda	(Si / No)	Si
Dos discos calados en eje (sim)	(Si / No)	No

DEFINICIÓN - Equipo motriz	

Figura 4.5: Datos de entrada 1. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

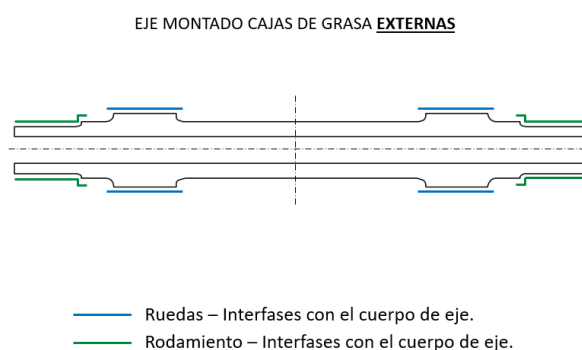


Figura 4.6: Interfases requeridas para un eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

4.2.2 Datos de entrada 2: Parámetros de cálculo asociados al equipamiento.

En la segunda pantalla de entrada se definen diversos parámetros asociados a las características del equipamiento del eje montado (ver figura 4.7).

Los campos de entrada solicitados en la segunda pantalla de datos se ajustan al equipamiento requerido para la configuración de eje montado establecida y determinan la magnitud de los esfuerzos en las distintas zonas del eje, de acuerdo a lo descrito en Capítulo 3.

The screenshot shows a software interface with three buttons at the top: 'Reiniciar' (orange), 'Volver' (orange), and 'Validar' (green). Below are four calculation parameter tables:

CÁLCULO - Eje montado	
Material del eje (EA1T / EA1N / EA4T)	
Diámetro - Rueda nueva [mm]	
Carga por eje (m1+m2) [kg]	
Masas no suspendidas (m2) [kg]	
Centro gravedad vehículo respecto a TOR [mm]	

CÁLCULO - Bloques de freno en llanta (1 Bloque / Rueda)	
Equipado (Si / No)	
Fuerza máxima bloque de freno [N]	
Factor fricción bloque freno	

CÁLCULO - Disco integrado en rueda (1 Disco / Rueda)	
Equipado (Si / No)	
Fuerza máxima caliper freno [N]	
Radio de aplicación de la fuerza de frenado [mm]	
Factor fricción guarnición caliper freno [-]	

CÁLCULO - Discos calados en eje (2 Discos / Eje)	
Equipados (Si / No)	
Masa por disco [kg]	
Fuerza máxima por caliper freno [N]	
Radio de aplicación de la fuerza de frenado [mm]	
Factor fricción bloque freno [-]	

CÁLCULO - Equipo motriz	
Equipado (Si / No)	
Masa no suspendida por equipo motriz [kg]	
Par motor [N.m]	

Figura 4.7: Datos de entrada 2. Parámetros de cálculo.

De forma ilustrativa, la figura 4.8 muestra los datos de equipamiento requeridos para un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados* (definido previamente según la figura 4.5), donde se puede observar como los campos de asociados al equipamiento motriz o a los discos calados en eje no se encuentran habilitados.

The screenshot shows the same software interface as Figure 4.7, but with some fields disabled (greyed out) for a trailer axle configuration:

CÁLCULO - Eje montado	
Material del eje (EA1T / EA1N / EA4T)	
Diámetro - Rueda nueva [mm]	
Carga por eje (m1+m2) [kg]	
Masas no suspendidas (m2) [kg]	
Centro gravedad vehículo respecto a TOR [mm]	

CÁLCULO - Bloques de freno en llanta (1 Bloque / Rueda)	
Equipado (Si / No)	No
Fuerza máxima bloque de freno [N]	
Factor fricción bloque freno	

CÁLCULO - Disco integrado en rueda (1 Disco / Rueda)	
Equipado (Si / No)	Si
Fuerza máxima caliper freno [N]	
Radio de aplicación de la fuerza de frenado [mm]	
Factor fricción guarnición caliper freno [-]	

CÁLCULO - Discos calados en eje (2 Discos / Eje)	
Equipados (Si / No)	No
Masa por disco [kg]	
Fuerza máxima por caliper freno [N]	
Radio de aplicación de la fuerza de frenado [mm]	
Factor fricción bloque freno [-]	

CÁLCULO - Equipo motriz	
Equipado (Si / No)	No
Masa no suspendida por equipo motriz [kg]	
Par motor [N.m]	

Figura 4.8: Datos de entrada 2. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

4.2.3 Datos de entrada 3: Definición dimensiones interfases.

En la última pantalla de entrada de datos se definen las dimensiones y posicionamientos de las distintas interfases del equipamiento del eje montado (dimensiones y / diámetros) según la figura 4.9.

El programa Excel desarrollado integra dimensiones pre-establecidas asociadas a la tipología de eje definida previamente con los datos de la figura 4.4, las cuales deben ser ajustadas al posicionamiento deseado para el equipamiento del eje montado a desarrollar.

DIMENSIONES - Rueda [mm]	
Dimensión Y - Caras internas ruedas	1594,0
Dimensión Y - Cara interna rueda a punto contacto carril	70,0
Dimensión Y - Distancia Interior llanta a interior cubo rueda	36,5
Dimensión Y - Longitud cubo rueda	196,0
Diámetro - Calado cubo rueda	235,0
Diámetro - Diámetro maximo cubo rueda Exterior (cálculo)	302,0
Diámetro - Diámetro maximo cubo rueda Interior (cálculo)	302,0

DIMENSIONES - Rodamiento [mm]	
Dimensión Y - Centro rodamientos	2314,0
Dimensión Y - Longitud calada del rodamiento	207,0
Dimensión Y - Centro rodamiento a mangueta	105,0
Dimensión Y - Longitud del collarin rodamiento	16,0
Diámetro - Calado rodamiento	150,0
Diámetro - Mangueta	180,0
Diámetro - Pista interna rodamiento (cálculo)	200,0
Diámetro - Collarín rodamiento (cálculo)	218,0
Diámetro - Maximo interior del eje admisible	90,0
Diámetro - Minimo interior del eje admisible	81,0

DIMENSIONES - Discos de freno [mm]	

DIMENSIONES - Drive [mm]	

DIMENSIONES - Optimizables [mm]	
Diámetro - Agujero interno eje	80,0
Diámetro - Exterior caña eje	170,0

Figura 4.9: Datos de entrada 3. Definición dimensional de interfases. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

Las dimensiones y posicionamientos introducidos actualizan de forma automática la geometría del eje en la hoja de configuración correspondiente a la tipología definida según el procedimiento descrito en el capítulo 4.3, permitiendo la representación de la geometría del eje y la comprobación de las restricciones de diseño en el módulo de entrada de datos.

Los datos de entrada asociados a las dimensiones de las interfases de los componentes principales del eje montado (rodamiento, rueda, discos calados y calados del equipo motriz) requieren la comprobación de sus restricciones de diseño asociadas en el momento de ser introducidos. Las dimensiones asociadas a la definición de interfases de equipamiento se consideran fijas y no pueden ser incluidas en el alcance de optimización del programa desarrollado.

Con el objetivo de la sencilla identificación de incoherencias en la definición de componentes principales, la pantalla de datos incluye:

- Una gráfica dinámica de la sección del eje (figura 4.10), la cual se actualiza con los datos de entrada definidos para ofrecer una ayuda visual en el proceso.
- Una ventana de visualización con las restricciones de diseño aplicables (figura 4.11) determinadas por la tipología de eje montado (ver capítulo 4.3.3).

En caso de detectar un incumplimiento en alguna de las restricciones, se identifica con un mensaje de error que indica las posibles acciones para solventarlo.

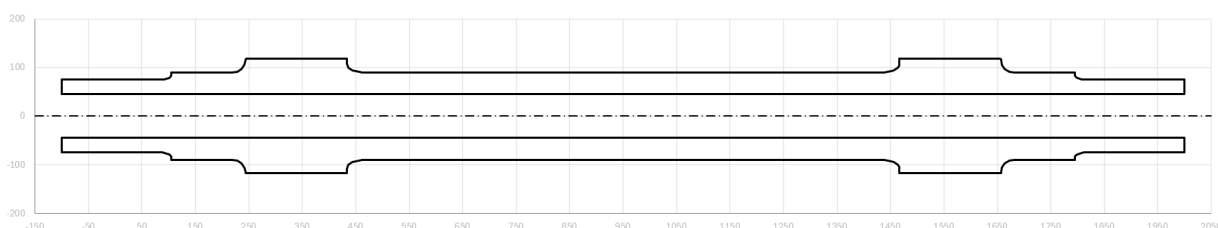


Figura 4.10: Datos de entrada 3. Visualización de la geometría del eje.

RESTRICCIONES DE DISEÑO		
ID	Resultado	Mensaje
1	Ok	Posicionamiento Y correcto: Rueda izquierda - derecha.
2	Ok	Posicionamiento Y correcto: Rueda - Rodamiento.
3	Ok	Diámetro correcto: Interior del eje.
4	No ok	Reducir diámetro interior eje / Aumentar el diámetro máximo admisible.
5	Ok	Diametro correcto: Calado rodamiento.
6	No ok	Aumentar diámetro collarín del rodamiento.
7	No ok	Relación diámetros incorrecta: Calado - collarín rodamiento.
8	Ok	Diámetro correcto: Calado rueda.
9	Ok	Relación diámetros correcta: Calado rueda - mangueta.
10	Ok	Diámetro correcto: Diamátro exterior eje.
11	Ok	Relación diámetros correcta: Calado rueda - diametro exterior eje.
12	Ok	Diámetro correcto: Exterior eje.

Figura 4.11: Datos de entrada 3. Comprobación restricciones diseño en módulo de entrada.

Una vez los datos introducidos cumplan todas las restricciones asociadas, el programa habilita las siguientes opciones de procesamiento de datos:

- **Optimizar geometría:** Ejecuta método de optimización para la geometría del eje según el capítulo .
- **Exportar informe de cálculo:** Genera una hoja de cálculo con los datos geométricos y resultados de cálculo asociados al eje mostrado en la pantalla de datos.

4.3 Automatización geométrica del eje.

La automatización geométrica del eje comprende aquellas integraciones establecidas para obtener una geometría del eje que cumpla los requisitos normativos (ver capítulo 2) y que se adapte a la tipología de eje y posicionamiento de equipamiento definidos en el módulo de entrada (ver capítulo 4.2) de forma automática.

El proceso de automatización geométrica se puede dividir en tres fases:

- Definición de transiciones normativas en base de datos: Las transiciones definidas en la normativa se incluyen en una base de datos para que puedan ser empleadas en distintas distintas tipologías del eje simultáneamente.
- Configuración de la geometría completa del eje en la hoja asociada a su tipología: En la hoja de configuración asociada a cada tipología de eje, se definen las transiciones normativas requeridas para conformar la geometría completa del eje.
- Configuración de las restricciones geométricas asociadas a la tipología de eje: En la hoja de configuración asociada a cada tipología de eje, se definen las restricciones geométricas para la validación geométrica del eje.

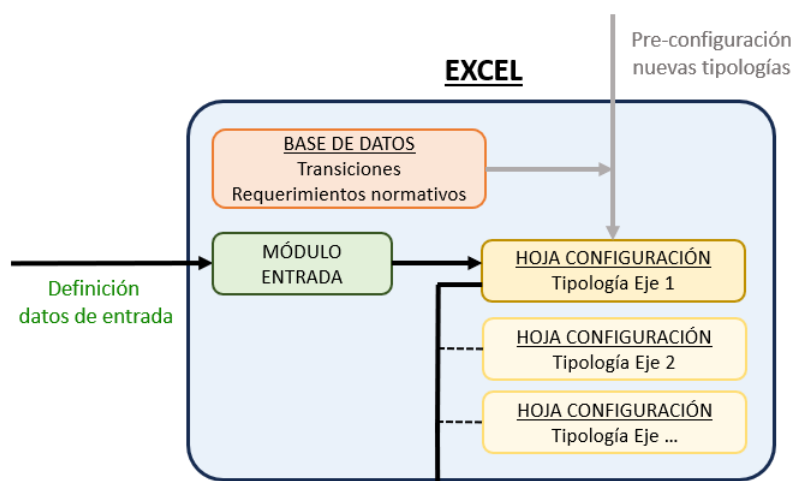


Figura 4.12: Diagrama de flujo automatización Excel.

4.3.1 Definición de transiciones normativas.

En el programa Excel desarrollado, las transiciones recomendadas por las normativas aplicables (ver capítulo 2.1.1) se definen en una hoja de cálculo independiente (base de datos), con el objetivo de que puedan ser empleadas en múltiples tipologías de eje de forma simultánea.

Las distintas geometrías que definen una transición pueden tratarse de cotas fijas definidas por normativa o cotas parametrizadas ajustables para que sus dimensiones y posicionamientos a lo largo del eje se ajusten con los datos introducidos en los datos de entrada (ver figura 4.9).

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran las cotas que definen dos transiciones de ejemplo, observándose que pueden tratarse de cotas fijas definidas por normativa (marcadas en negro), ajustables con los parámetros definidos en el módulo de entrada (marcadas en verde) o cotas de referencia requeridas para la obtención de los puntos (marcadas en rojo).

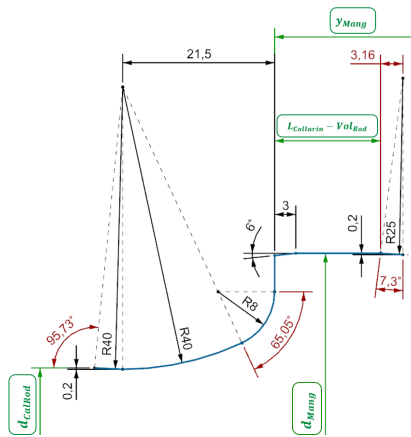


Figura 4.13: Cajas de grasa externas. [1] Transición rodamiento - mangueta.

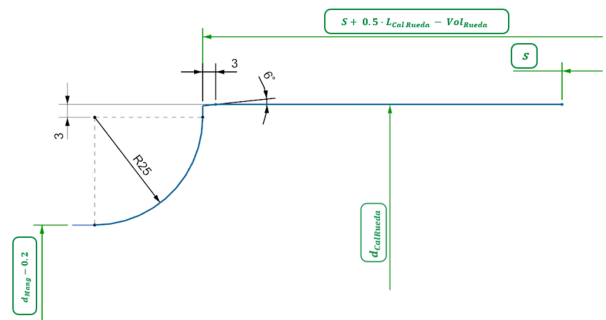


Figura 4.14: Cajas de grasa externas. [1] Transición mangueta - cubo rueda.

La definición de las transiciones en la base de datos de Excel se realiza mediante una secuencia de puntos característicos. Con el objetivo de que los puntos que conforman la sección tengan la información requerida en fases posteriores de la automatización, para cada punto característico es necesario definir los parámetros listados a continuación:

- Posición (y, z) del punto: El posicionamiento de los puntos que definen la sección se emplea para la representación y verificación geométrica de la transición, tanto en términos de viabilidad geométrica (solapamientos) como en cumplimiento de requisitos normativos.
- Identificación del punto como sección de cálculo: Deben identificarse los puntos a ser calculados, considerando los criterios definidos en la normativa aplicable (ver capítulo 3.2).
- Definición de la zona del eje: Se identifica la zona del eje en la que se encuentra ubicado el punto de la sección, determinando los momentos a los que se encuentra sometida la sección según lo descrito en el capítulo 4.4.2.
- Tipo de sección: De acuerdo a lo descrito en la sección 3.2, el tipo de sección determina el factor del concentrador de tensiones aplicable y la tensión admisible en la sección.
- Parámetros para el cálculo de la tensión y concentrador de tensiones en la sección (d, D, r) .

A modo de ejemplo, la figura 4.15 muestra la definición realizada en la base de datos para los puntos de una *transición mangueta-cubo de rueda para ejes de cajas de grasa externas*. Los valores de posición de los puntos característicos se definen según las restricciones indicadas en la figura 4.14. La figura 4.16 incluye la representación parametrizada en Excel para dicha transición.

Tabla_Ext_Tr_Mang_Rued_Norm											
ID	Punto	y	ynorm	z+	z-	Secc	Z.Eje	Tip. Sec.	d	D	r
1	E-TMC1	-978,50	178,50	74,80	-74,80	Si	2	1T	149,60	302,00	25,00
2	E-TMC12-1	-978,50	178,50	74,80	-74,80	No	-	-	-	-	-
3	E-TMC12-2	-968,93	188,07	76,70	-76,70	No	-	-	-	-	-
4	E-TMC12-3	-960,82	196,18	82,12	-82,12	No	-	-	-	-	-
5	E-TMC12-4	-955,40	201,60	90,23	-90,23	No	-	-	-	-	-
6	E-TMC12-5	-953,50	203,50	99,80	-99,80	No	-	-	-	-	-
7	E-TMC2	-953,50	203,50	99,80	-99,80	No	-	-	-	-	-
8	E-TMC3	-953,50	203,50	117,29	-117,29	Si	2	2	234,58	-	-
9	E-TMC4	-951,50	205,50	117,50	-117,50	Si	2	2	235,00	-	-
10	E-TMC5	-867,00	290,00	117,50	-117,50	Si	2	2	235,00	-	-

Figura 4.15: Ejemplo: Definición de los parámetros en puntos característicos de una transición.

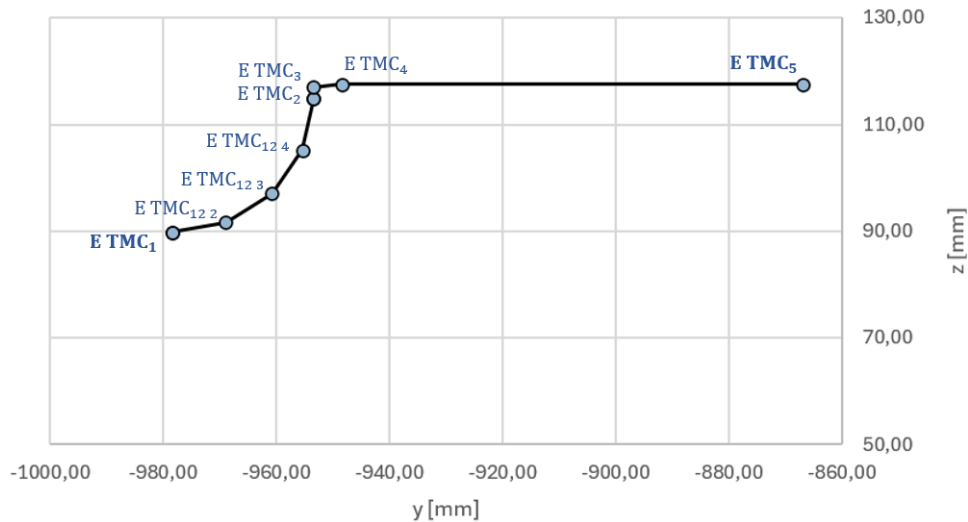


Figura 4.16: Ejemplo: Representación de los puntos característicos de una transición.

Una vez definidos los puntos característicos de la transición, ésta puede ser integrada en distintas tipologías de cuerpo de eje, ya que contiene toda la información requerida para su representación geométrica y aplicación automática de los procedimientos de cálculo.

El procedimiento expuesto en el presente capítulo para la definición de una transición en la base de datos debe de repetirse hasta tener definidas todas las transiciones que conforman la geometría completa de la tipología de eje a automatizar.

4.3.2 Geometría completa de una tipología de eje.

La información requerida para la definición de la geometría completa de una determinada tipología de eje se incluye en la hoja de configuración de Excel asociada a la tipología del eje. En dicha hoja de configuración, también se incluyen las restricciones geométricas y procedimientos de cálculos descritos en los capítulos 4.3.3 y 4.4 asociados a la tipología de eje.

La obtención de la geometría completa del cuerpo de eje se basa en integrar las distintas transiciones requeridas por las interfases del equipamiento del eje montado y establecer la interconexión entre ellas asegurando el cumplimiento de los requerimientos normativos de diseño descritos en el capítulo 2.

En cada hoja de configuración asociada a una tipología de eje montado, se incluye un campo de configuración para definir la secuencia de transiciones que lo caracteriza. Los datos de puntos característicos de las distintas transiciones requeridas se importan de la base de datos con la secuencia definida, conformando de forma automática el conjunto de puntos característicos de la geometría completa del cuerpo de eje.

De forma ilustrativa, a continuación se describe el procedimiento aplicado a un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*. En primer lugar, en la figura 4.17 se identifican las transiciones requeridas para conformar el cuerpo de eje montado deseado.

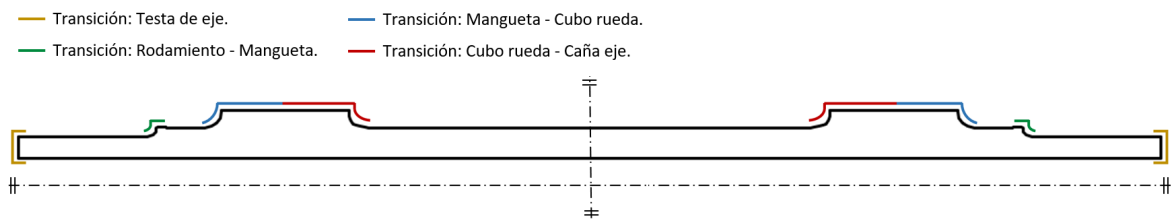


Figura 4.17: Transiciones requeridas. Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

En la hoja de configuración asociada a la tipología de *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*, se definen las transiciones requeridas y su secuencia según la figura 4.18. Las secciones se definen recorriendo el cuerpo de eje de izquierda a derecha hasta la línea central del eje, mientras de las secciones simétricas se definen recorriendo el eje en orden inverso.

DEFINICIÓN DE TRANSICIONES DEL EJE	
Extremo izquierdo	Extremo derecho
Tabla_Ext_Tr_TestaEje	Tabla_Ext_Tr_TestaEje_Sim
Tabla_Ext_Tr_Rod_Mang	Tabla_Ext_Tr_Rod_Mang_Sim
Tabla_Ext_Tr_Mang_Rued_Norm	Tabla_Ext_Tr_Mang_Rued_Norm_Sim
Tabla_Ext_Tr_Rued_Eje_Norm	Tabla_Ext_Tr_Rued_Eje_Norm_Sim

Figura 4.18: Secuencia de transiciones. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

Una vez definida la secuencia de transiciones en el registro de configuración, el programa Excel concatena las respectivas tablas de puntos característicos de las transiciones (definidas en la base de datos normativos) para obtener la matriz de puntos característicos de la geometría completa del eje (ver figura 4.19).

GEOMETRÍA COMPLETA DEL EJE											
ID	Punto	y	ynorm	z+	z-	Secc	ZEje	Tip. Sec.	d	D	r
1	E-0-0	0,00	1157,00	42,19	-42,19	No	-	-	-	-	-
2	E-0-1	-1257,00	-100,00	42,19	-42,19	No	-	-	-	-	-
3	E-0-2	-1257,00	-100,00	75,00	-75,00	No	-	-	-	-	-
4	E-0	-1157,00	0,00	75,00	-75,00	Si	1	3	150,00	-	-
1	E-TRM1	-1077,49	79,51	75,00	-75,00	Si	2	3	150,00	-	-
2	E-TRM12-1	-1077,49	79,51	75,00	-75,00	No	-	-	-	-	-
3	E-TRM12-2	-1076,50	80,50	74,91	-74,91	No	-	-	-	-	-
4	E-TRM12-3	-1075,50	81,50	74,85	-74,85	No	-	-	-	-	-
5	E-TRM12-4	-1074,50	82,50	74,81	-74,81	No	-	-	-	-	-
6	E-TRM12-5	-1073,50	83,50	74,80	-74,80	No	-	-	-	-	-
7	E-TRM2	-1073,50	83,50	74,80	-74,80	Si	2	1T	149,60	200,00	40,00
8	E-TRM3	-1073,50	83,50	74,80	-74,80	Si	2	1T	149,60	218,00	40,00
9	E-TRM34-1	-1073,50	83,50	74,80	-74,80	No	-	-	-	-	-
.
.
.
9	E-TRM34-1	1073,50	2230,50	74,80	-74,80	No	-	-	-	-	-
8	E-TRM3	1073,50	2230,50	74,80	-74,80	Si	8	1T	149,60	218	40
7	E-TRM2	1073,50	2230,50	74,80	-74,80	Si	8	1T	149,60	200	40
6	E-TRM12-5	1073,50	2230,50	74,80	-74,80	No	-	-	-	-	-
5	E-TRM12-4	1074,50	2231,50	74,81	-74,81	No	-	-	-	-	-
4	E-TRM12-3	1075,50	2232,50	74,85	-74,85	No	-	-	-	-	-
3	E-TRM12-2	1076,50	2233,50	74,91	-74,91	No	-	-	-	-	-
2	E-TRM12-1	1077,49	2234,49	75,00	-75,00	No	-	-	-	-	-
1	E-TRM1	1077,49	2234,49	75,00	-75,00	Si	8	3	150,00	-	-
4	E-0	1157,00	2314,00	75,00	-75,00	Si	9	3	150,00	-	-
3	E-0-2	1257,00	2414,00	75,00	-75,00	No	-	-	-	-	-
2	E-0-1	1257,00	2414,00	42,19	-42,19	No	-	-	-	-	-
1	E-0-0	0	1157	42,1889	-42,1889	No	-	-	-	-	-

Figura 4.19: Geometría completa del eje. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

Con el procedimiento expuesto, la geometría asociada a un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados* queda definida en el programa, por lo que al seleccionar los datos de entrada de la figura 4.5 el programa selecciona su hoja de configuración para la representación geométrica en la pantalla de entrada.

4.3.3 Definición de restricciones geométricas.

Una vez obtenidos los puntos que definen la geometría completa del eje montado, debe procederse a su validación considerando los requerimientos normativos expuestos en el Capítulo 2.

En la hoja de Excel específica de la tipología de eje se establece una región de entrada para la configuración de las restricciones aplicables a la geometría del eje. Las restricciones geométricas deben de asociarse a los puntos de la matriz completa de geometría del eje con el objetivo de que se actualicen automáticamente.

Dichas restricciones se emplean en dos procesos del método implementado:

- Validación de datos de entrada: Las restricciones establecidas se muestran en un cuadro de diálogo en la ventana de entrada de datos (ver figura 4.11) para guiar al diseñador y asegurar la coherencia de los datos de entrada.
- Restricciones para el proceso de optimización: Las restricciones son incluidas en la automatización de la optimización geométrica de Solver para asegurar que la geometría optimizada cumple los requerimientos normativos (ver capítulo 4.4.4).

RESTRICCIONES GEOMÉTRICAS				ID	Resultado	Mensaje
REQUISITO						
C_E_TCC =	40,00	>	38,23 = Cmin_E_TCC	1	Ok	Transición TCC correcta
dMang / dCalRod =	1,20	>	1,15 -	2	Ok	R. Diam. correcta: Calado - collarin rodamiento
dCalRued / (2*ext_zTMC1) =	1,31	>	1,15 -	3	Ok	R. Diam. correcta: Calado rueda - mangueta
dCalRueda / dEjeExt1 =	1,31	>	1,15 -	4	Ok	R. Diam. correcta: Calado rueda - diámetro exterior eje 1
LongEjeCalRued / dCalRueda =	0,81	>	0,80 -	5	Ok	Calado correcto: Rueda
-	1,10	>	0,81 = LongEjeCalRued / dCalRueda	6	Ok	Calado correcto: Rueda
-	-	-	-	-	-	-
0	0,00	>	-728,50 = ext_yTCC4	7	Ok	Posicionamiento Y correcto: Rueda izquierda - derecha
ext_yTMC1 =	-978,50	>	-1033,84 = ext_Ytrm9	8	Ok	Posicionamiento Y correcto: Rueda - Rodamiento
dEjeIntMax =	90,00	>	84,38 = _di	9	Ok	Diámetro correcto: Interior del eje
dCalRod =	150,00	>	84,38 = _di	10	Ok	Diámetro correcto: Calado rodamiento
ext_zTRM6 =	89,68	>	85,79 = ext_zTRM5	11	Ok	Diámetro correcto: Collarin rodamiento
ext_zTMC3 =	116,97	>	114,80 = ext_zTMC2	12	Ok	Diámetro correcto: Calado rueda
dCalRueda =	235,00	>	215,97 = 2*ext_zTCC2	13	Ok	Diámetro correcto: Diámetro exterior eje 1
dEjeExt1 =	179,11	>	84,38 = _di	14	Ok	Diámetro correcto: Diámetro exterior eje 1
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

	TRANSICIONES (EN13103-1 / EN13103-2)		LONGITUDES CALADO (EN13103-1 / EN13103-2)
	RELACIONES DIAMETRALES (EN13103-1 / EN13103-2)		COHERENCIA GEOMÉTRICA

Figura 4.20: Restricciones geométricas. Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

A modo de ejemplo, en la figura 4.20 se definen las restricciones geométricas configuradas para un eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados, entre las que se incluyen:

- Restricciones de validación para el valor C de transiciones entre superficies caladas y libres (según capítulo 2.1.1).
- Restricciones de validación para las relaciones diametrales (según capítulo 2.1.2).
- Restricciones de validación de longitudes de calado (según capítulo 2.1.2).
- Restricciones para la comprobación del posibles solapamientos e incoherencias entre puntos clave de las transiciones definidas.

4.4 Automatización del cálculo y optimización geométrica.

La automatización del cálculo de eje se basa integrar los procedimientos de cálculo requeridos en la normativa aplicable (ver capítulo 3) para obtener el factor de seguridad en cada una de las secciones del eje.

Partiendo de los puntos característicos previamente configurados para la geometría completa del eje (ver figura 4.19), se identifican las secciones de cálculo a analizar y se calculan los esfuerzos normativos a considerar en el cuerpo de eje y nivel de tensión asociado. El factor de seguridad de las secciones se obtiene comparando el nivel de tensión obtenido con el máximo admisible por la normativa aplicable.

En base a los resultados obtenidos en cada una de las secciones, se integra un proceso de optimización geométrica para ajustar la geometría del eje un factor de seguridad establecido como dato de entrada.

4.4.1 Secciones de cálculo.

Para comenzar con el procedimiento de cálculo, es necesario identificar las secciones de la geometría del eje que requieren ser analizadas. El método de cálculo de la normativa aplicable (ver capítulo 3.2) identifica las transiciones entre distintas zonas cilíndricas del eje como puntos críticos de concentración de tensiones.

La figura 4.21 representa una transición de ejemplo. Según los requerimientos de cálculo de la normativa aplicable, deben definirse secciones de cálculo en los siguientes puntos característicos de las transiciones del eje:

- Diámetros exteriores del eje (P_{c1} / P_{c5}).
- Puntos inferiores de radios de transición entre distintos diámetros (P_{c2} / P_{c3}).
- Puntos de intersección entre dos radios de transición (P_{c4}).

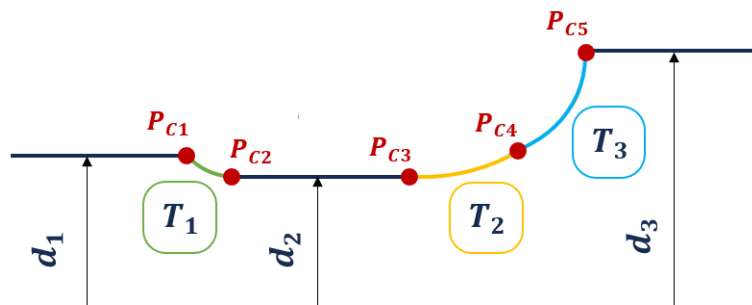


Figura 4.21: Puntos de cálculo en transiciones.

En el programa de Excel desarrollado, los puntos a considerar como secciones de cálculo se extraen automáticamente de los puntos característicos previamente configurados para la geometría completa del eje (ver figura 4.19).

Al definir la transición en la base de datos normativos (según el procedimiento descrito en el capítulo 4.3.1), se identifican los puntos de cálculo en su correspondiente columna, quedando automatizado su proceso de extracción respecto al conjunto total de puntos del eje.

Los puntos característicos de las secciones de cálculo se extraen automáticamente, junto con los parámetros de cálculo predefinidos, en una tabla simplificada dentro de la hoja de configuración de la tipología del eje.

SECCIONES							
Sección	Punto	ynorm	Z. Eje	Tip. Sec.	d	D	r
1	E-0	0,00	1	3,00	150,00	-	-
2	E-TRM1	79,51	2	3,00	150,00	-	-
3	E-TRM2	83,50	2	1T	149,60	200,00	40,00
4	E-TRM3	83,50	2	1T	149,60	218,00	40,00
5	E-TRM4	100,38	2	1T	157,07	218,00	8,00
6	E-TRM6	105,00	2	2,00	179,37	-	-
.
.
.
29	E-TRM6	2209,00	8	2,00	179,37	-	-
30	E-TRM4	2213,62	8	1T	157,07	218,00	8,00
31	E-TRM3	2230,50	8	1T	149,60	218,00	40,00
32	E-TRM2	2230,50	8	1T	149,60	200,00	40,00
33	E-TRM1	2234,49	8	3,00	150,00	-	-
34	E-0	2314,00	9	3,00	150,00	-	-

Figura 4.22: Tabla simplificada secciones de cálculo. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

Continuando el ejemplo de aplicación expuesto en anteriores capítulos, la figura 4.22 muestra la tabla simplificada de secciones de cálculo aplicables a un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*, las cuales incluyen únicamente los datos requeridos para realizar las distintas operaciones de cálculo definidas en la normativa.

Esta tabla simplificada es el resultado de la extracción automática de los puntos característicos identificados como secciones de cálculo en la figura 4.19.

4.4.2 Cálculo de momentos.

Los momentos a los que se encuentra sometida una sección de cálculo están determinados por la zona del eje donde se encuentra ubicada, entendiéndose por zona de eje al conjunto de secciones comprendidas entre dos cargas aplicadas.

El método de cálculo desarrollado en el presente Trabajo Fin de Máster integra las formulas para el cálculo de los distintos momentos requeridos en la normativa aplicable de acuerdo con lo descrito en el capítulo 3.3. Las zonas del eje resultantes de dichas distribuciones de carga se muestran en la figura 4.23 para cajas de grasa externas y en la figura 4.24 para ejes de cajas de grasa internas

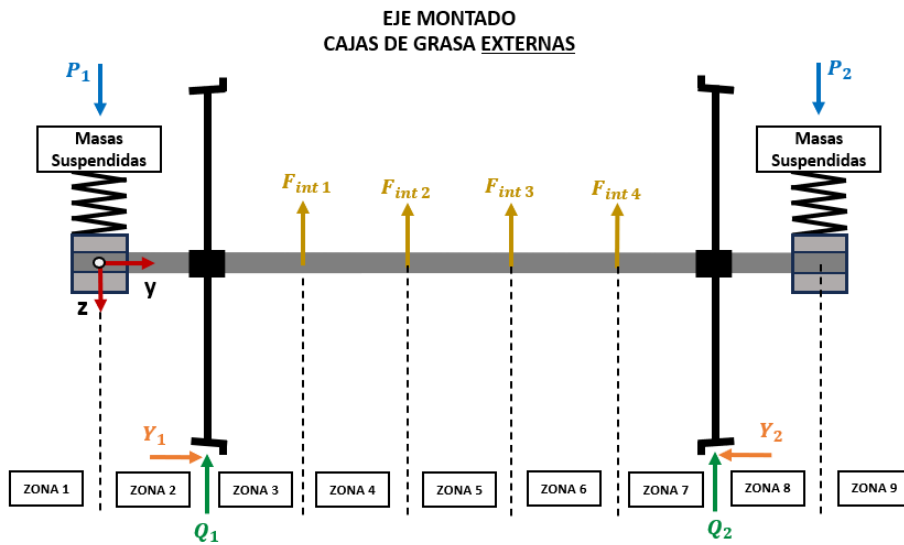


Figura 4.23: Cargas y zonas del eje. Cajas de grasa externas. [1]

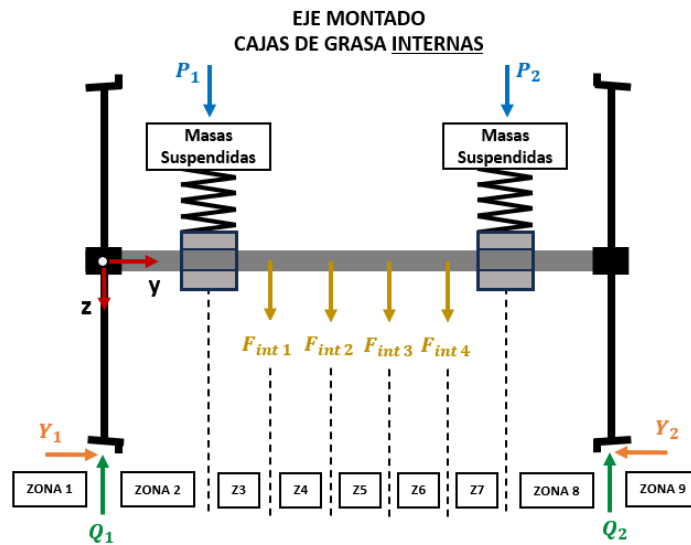


Figura 4.24: Cargas y zonas del eje. Cajas de grasa internas. [2]

Para cada una de las secciones del eje se automatizan los momentos aplicables en función de la zona a la que pertenece (predefinida en la base de datos de transiciones - capítulo 4.3.1) y de la tipología de eje montado asociada.

A modo de ejemplo, la figura 4.25 muestra la tabla de cálculo de momentos para un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*, en la cual se pueden identificar los parámetros de cálculo de momento en las secciones, las distintas fuentes de momento consideradas y el momento resultante para cada una de las secciones.

SECCIONES				MASAS EN MOVIMIENTO	FRENO			FRENO			NO FRENO	RESULTADO FRENO			MR
Seccion	Punto	ynorm [mm]	Z.Eje	Mx (P1P2) [kN-m]	Discos integrados rueda	Bloques freno llanta	NO FRENO	RESULTADO FRENO			MR				
					M'x [kN-m]	M'y [kN-m]	M'z [kN-m]	M'x [kN-m]	M'y [kN-m]	M'z [kN-m]		M'y [kN-m]	M'x [kN-m]	M'y [kN-m]	M'z [kN-m]
1	E-0	0,00	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	E-TRM1	79,51	2	11,19	1,59	0,00	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	1,59	0,00	0,91	12,82
3	E-TRM2	83,50	2	11,76	1,67	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	0,00	0,96	13,46
4	E-TRM3	83,50	2	11,76	1,67	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	0,00	0,96	13,46
5	E-TRM4	100,38	2	14,13	2,01	0,00	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	1,15	16,18
6	E-TRM6	105,00	2	14,78	2,10	0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10	0,00	1,21	16,93
.
.
29	E-TRM6	2209,00	8	11,35	2,10	0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10	0,00	1,21	13,51
30	E-TRM4	2213,62	8	10,85	2,01	0,00	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	1,15	12,91
31	E-TRM3	2230,50	8	9,03	1,67	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	0,00	0,96	10,74
32	E-TRM2	2230,50	8	9,03	1,67	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	0,00	0,96	10,74
33	E-TRM1	2234,49	8	8,60	1,59	0,00	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	1,59	0,00	0,91	10,23
34	E-0	2314,00	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 4.25: Momentos secciones de cálculo. Ejemplo: Eje remolque cajas de grasa externas sin discos calados

Las zonas de un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados* se muestran en la figura 4.26. El equipamiento de freno se encuentra instalado en rueda y no hay equipamiento motriz (eje remolque), por lo que no hay fuerzas internas F_{int} y las zonas 3 y 7 son equivalentes-

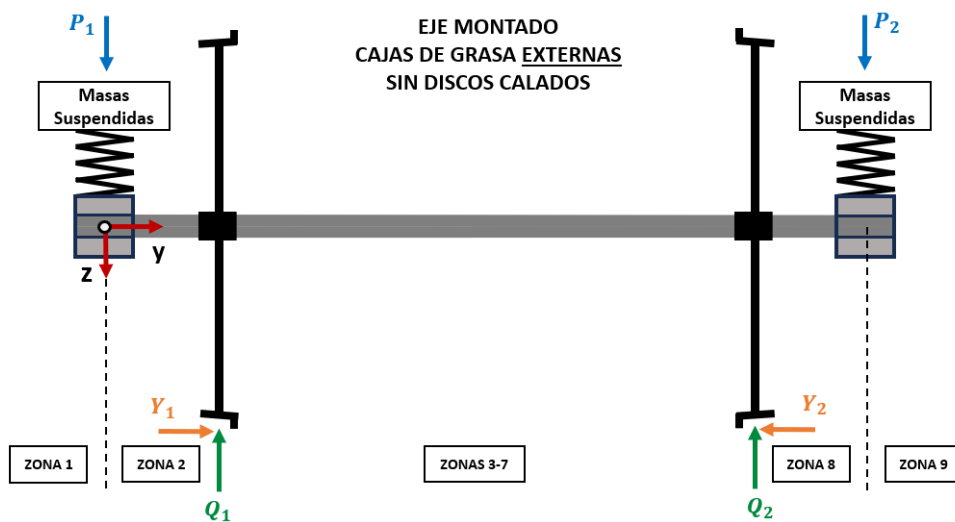


Figura 4.26: Zonas del eje. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

Los momentos debidos a las masas en movimiento (M_x) se definen en las distintas zonas del eje considerando los requerimientos normativos para cajas de grasa externas (ver figura 3.6).

$$M_x = \begin{cases} 0 & \text{Zona 1: } y < 0 \\ P_1 \cdot y & \text{Zona 2: } y \in (0, b - s) \\ P_1 \cdot y - Q_1 \cdot (y - b + s) + Y_1 \cdot R - \sum_{i=1}^4 F_{int_i} \cdot (y - y_i) & \text{Zonas 3 - 7: } y \in (b - s, b + s) \\ P_2 \cdot (2b - y) & \text{Zona 8: } y \in (b + s, 2b) \\ 0 & \text{Zona 9: } y > 2b \end{cases}$$

Donde:

y : Posición y de la sección respecto al origen definido en la normativa aplicable.

b, s, R : Parámetros asociados a la geometría del eje. Se calculan automáticamente a partir de los datos definidos en el módulo de entrada.

P_1, P_2, Q_1, Y_1 : Las cargas normativas se calculan de forma automática considerando las expresiones definidas en la figura 3.4 para anchos de vía estándar, o las definidas en la figura 3.5 para anchos de vía estrechos (métrico e inferiores).

F_{int_i}, y_i : Fuerzas internas asociadas a componentes calados y sus posiciones en el eje. Su cálculo se automatiza en función de los datos definidos en el módulo de entrada.

El momento asociado al equipamiento de freno se obtiene sumando las contribuciones de momento de cada una de las tipologías de freno instaladas.

En el ejemplo de cálculo mostrado en la figura 4.25, se considera un equipo de freno de *discos integrados en rueda*, cuyos momentos normativos en las distintas zonas del eje se exponen a continuación (ver capítulo 3.3.2).

$$M'_{xDiscos Rueda} = \begin{cases} 0 & \text{Zona 1: } y < 0 \\ F_{caliper_{max}} \cdot \Gamma \cdot y & \text{Zona 2: } y \in (0, b - s) \\ F_{caliper_{max}} \cdot \Gamma \cdot (b - s) & \text{Zonas 3 - 7: } y \in (b - s, b + s) \\ F_{caliper_{max}} \cdot \Gamma \cdot (2b - y) & \text{Zona 8: } y \in (b + s, 2b) \\ 0 & \text{Zona 9: } y > 2b \end{cases}$$

$$M'_{yDiscos Rueda} = \begin{cases} 0,3 \cdot P' \cdot R & \text{Zonas 3 - 7: } y \in (b - s, b + s) \\ 0 & \text{Zonas restantes.} \end{cases}$$

$$M'_{xDiscos Rueda} = \begin{cases} 0 & \text{Zona 1: } y < 0 \\ F_{caliper_{max}} \cdot \Gamma \cdot \frac{R_f}{R} \cdot y & \text{Zona 2: } y \in (0, b - s) \\ F_{caliper_{max}} \cdot \Gamma \cdot \frac{R_f}{R} \cdot (b - s) & \text{Zonas 3 - 7: } y \in (b - s, b + s) \\ F_{caliper_{max}} \cdot \Gamma \cdot \frac{R_f}{R} \cdot (2b - y) & \text{Zona 8: } y \in (b + s, 2b) \\ 0 & \text{Zona 9: } y > 2b \end{cases}$$

Donde:

$F_{caliper_{max}}$: Fuerza máxima ejercida por el bloque de freno sobre las guarniciones.

F : Factor de fricción de las guarniciones de freno.

R_f : Radio efectivo de aplicación de la fuerza de frenado.

Una vez calculadas las distintas contribuciones de momento reflejadas en la normativa, el momento resultante en cada una de las secciones de cálculo del eje se obtiene aplicando la Ecuación 3.2, en la cual los momentos asociados a la tracción y freno electro-mecánico son nulos al tratarse de un eje remolque.

$$M_R = \sqrt{(M_x + M'_{xDiscosRueda})^2 + (M'_{yDiscosRueda})^2 + (M'_{zDiscosRueda})^2} \quad (4.1)$$

Donde:

M_x : Momento en dirección x debido a masas en movimiento.

$M'_{iDiscosRueda}$: Momentos de freno mecánico (Discos integrados en rueda). $i = x, y, z$.

La contribución de cada uno de los momentos en las distintas secciones del eje, así como el momento resultante empleado en el capítulo 4.4.3 para el cálculo de la tensión en las secciones del eje se muestran en la figura 4.27.

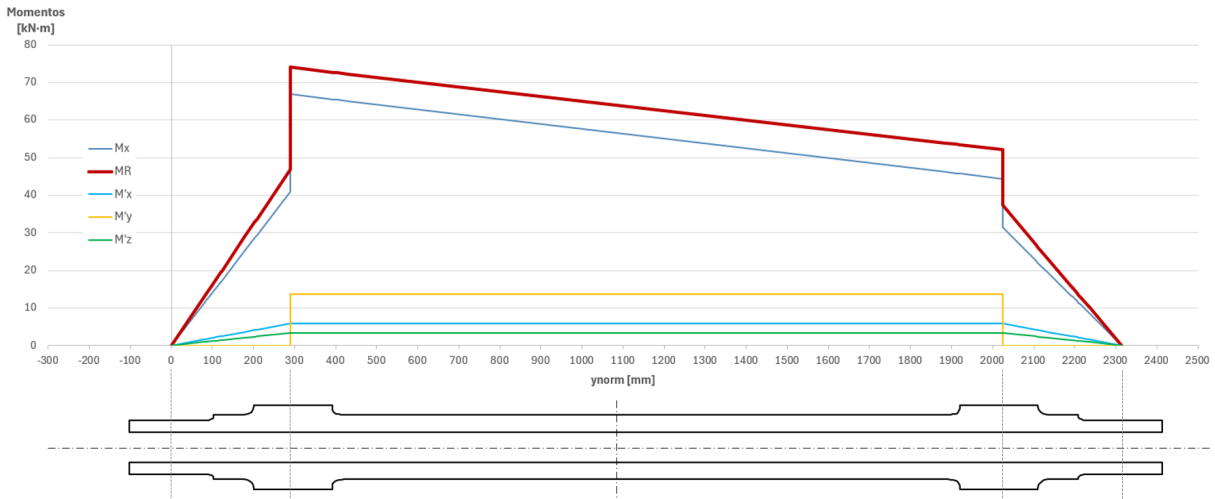


Figura 4.27: Diagrama de momentos. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

4.4.3 Tensión de la sección y máxima admisible.

El último paso en el procedimiento de cálculo de un eje consiste en obtener el factor de seguridad de cada una de las secciones de cálculo, definido por la relación entre la tensión de la sección y la tensión máxima admisible para el tipo de sección.

La tensión en una sección del eje está determinada por el momento resultante (ver capítulo 4.4.2), el factor de concentración de tensiones asociado a la transición y los diámetros de la sección.

Los datos requeridos para el cálculo de la tensión en cada una de las secciones se extraen de la tabla simplificada de secciones de cálculo (figura 4.22) y de la tabla de cálculo de momentos (figura 4.25).

SECCIONES							MR
Seccion	Punto	ynorm	Tip. Sec.	d	D	r	
1	E-0	0,00	3	150,00	-	-	0,00
2	E-TRM1	79,51	3	150,00	-	-	12,91
3	E-TRM2	83,50	1T	149,60	200,00	40,00	13,56
4	E-TRM3	83,50	1T	149,60	218,00	40,00	13,56
5	E-TRM4	100,38	1T	157,07	218,00	8,00	16,31
6	E-TRM6	105,00	2	179,37	-	-	17,06
.
.
.
29	E-TRM6	2209,00	2	179,37	-	-	13,32
30	E-TRM4	2213,62	1T	157,07	218,00	8,00	12,74
31	E-TRM3	2230,50	1T	149,60	218,00	40,00	10,60
32	E-TRM2	2230,50	1T	149,60	200,00	40,00	10,60
33	E-TRM1	2234,49	3	150,00	-	-	10,09
34	E-0	2314,00	3	150,00	-	-	0,00

Figura 4.28: Parámetros de cálculo para la tensión de la sección.

El cálculo del factor de concentración de tensiones, de acuerdo a lo requerido en la normativa aplicable (ver capítulo 3.4), se automatiza para secciones del tipo 1T y 1G (transiciones y gargantas), siendo el valor para el resto de secciones de cálculo igual a 1.

Conocida la geometría, factor de concentración y momento resultante, se calcula la tensión en la superficie exterior e interior del eje según las ecuaciones normativas 3.3 y 3.4.

La máxima tensión admisible en cada una de las secciones se automatiza considerando datos de entrada (tipo de eje y material) y el tipo de sección establecida (capítulo 4.3.1). Su valor depende del tipo de eje (motor con transmisión de esfuerzo calada / motor sin calados / remolque), del material escogido para el eje y del tipo de sección (ver sección 3.2). Por tanto, una vez introducidos los datos en el módulo de entrada, los límites de tensión admisible para cada una de las secciones se establecen automáticamente en el programa de cálculo.

El factor de seguridad de cada sección se calcula como el mínimo factor de seguridad de la superficie externa e interna. La sección con un factor de seguridad más reducido se denomina sección crítica del eje y se identifica como la sección objetivo en el proceso de optimización del eje (ver capítulo 4.4.4).

A modo de ejemplo, la figura 4.29 muestra los resultados obtenidos para un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*. en la cual se pueden identificar los parámetros de cálculo de las secciones, las tensiones obtenidas en la parte interior y exterior del eje, la tensión admisible para dichas secciones, y el factor de seguridad obtenido.

SECCIONES							MR [kN-m]	CONCENTRADOR TENSIONES					FACTORES SEGURIDAD					SECCIÓN CRÍTICA		
Secc.	Punto	ynorm [mm]	Tip. Sec.	d [mm]	D [mm]	r [mm]		X r/d	Y D/d	A	B	K	σ ext [N/mm2]	σ ext max [N/mm2]	SF ext	σ int [N/mm2]	σ int max [N/mm2]	SF int	SF min	SC
1	E-0	0,00	3	150,00	-	-	0,00	-	-	-	1,000	0,00	78,00	-	0,00	67,00	-	-	-	
2	E-TRM1	79,51	3	150,00	-	-	12,91	-	-	-	1,000	43,31	78,00	1,80	24,37	67,00	2,75	1,80	-	
3	E-TRM2	83,50	1T	149,60	200,00	40,00	13,56	0,27	1,34	0,04	1,00	1,041	47,80	166,00	3,47	25,90	67,00	2,59	2,59	-
4	E-TRM3	83,50	1T	149,60	218,00	40,00	13,56	0,27	1,46	0,06	1,00	1,056	48,50	166,00	3,42	25,90	67,00	2,59	2,59	-
5	E-TRM4	100,38	1T	157,07	218,00	8,00	16,31	0,05	1,39	0,38	1,00	1,380	64,54	166,00	2,57	25,12	67,00	2,67	2,57	-
6	E-TRM6	105,00	2	179,37	-	-	17,06	-	-	-	-	1,000	31,66	92,00	2,91	14,89	67,00	4,50	2,91	-
7	E-TRM7	108,00	2	180,00	-	-	17,54	-	-	-	-	1,000	32,20	92,00	2,86	15,09	67,00	4,44	2,86	-
8	E-TRM8	120,00	2	180,00	-	-	19,49	-	-	-	-	1,000	35,77	92,00	2,57	16,77	67,00	4,00	2,57	-
9	E-TRM9	123,16	1T	179,60	218,00	25,00	20,01	0,14	1,21	0,08	1,00	1,079	39,90	166,00	4,16	17,37	67,00	3,86	3,86	-
10	E-TMC1	178,50	1T	179,60	302,00	25,00	29,00	0,14	1,68	0,23	1,00	1,226	65,73	166,00	2,53	25,18	67,00	2,66	2,53	-
11	E-TMC3	203,50	2	233,95	-	-	33,06	-	-	-	-	1,000	26,75	92,00	3,44	9,65	67,00	6,94	3,44	-
12	E-TMC4	208,50	2	235,00	-	-	33,87	-	-	-	-	1,000	27,03	92,00	3,40	9,71	67,00	6,90	3,40	-
13	E-TMC5	290,00	2	235,00	-	-	47,11	-	-	-	-	1,000	37,60	92,00	2,45	13,50	67,00	4,96	2,45	-
14	E-TCC0	290,00	2	235,00	-	-	74,08	-	-	-	-	1,000	59,13	92,00	1,56	21,23	67,00	3,16	1,56	-
15	E-TCC1	393,50	2	235,00	-	-	72,72	-	-	-	-	1,000	58,04	92,00	1,59	20,84	67,00	3,22	1,59	-
16	E-TCC3	403,50	1T	187,69	302,00	15,00	72,59	0,08	1,61	0,36	1,00	1,356	158,10	166,00	1,05	52,42	67,00	1,28	1,05	X
17	E-TCC4	428,50	1T	179,11	302,00	75,00	72,26	0,42	1,69	0,03	1,00	1,028	138,46	166,00	1,20	63,47	67,00	1,06	1,06	-
18	E-TCC4	1885,50	1T	179,11	302,00	75,00	53,28	0,42	1,69	0,03	1,00	1,028	102,08	166,00	1,63	46,80	67,00	1,43	1,43	-
19	E-TCC3	1910,50	1T	187,69	302,00	15,00	52,95	0,08	1,61	0,36	1,00	1,356	115,33	166,00	1,44	38,24	67,00	1,75	1,44	-
20	E-TCC1	1920,50	2	235,00	-	-	52,82	-	-	-	-	1,000	42,16	92,00	2,18	15,14	67,00	4,43	2,18	-
21	E-TCC0	2024,00	2	235,00	-	-	51,49	-	-	-	-	1,000	41,10	92,00	2,24	14,76	67,00	4,54	2,24	-
22	E-TMC5	2024,00	2	235,00	-	-	36,80	-	-	-	-	1,000	29,37	92,00	3,13	10,55	67,00	6,35	3,13	-
23	E-TMC4	2105,50	2	235,00	-	-	26,46	-	-	-	-	1,000	21,12	92,00	4,36	7,58	67,00	8,84	4,36	-
24	E-TMC3	2110,50	2	233,95	-	-	25,82	-	-	-	-	1,000	20,90	92,00	4,40	7,54	67,00	8,89	4,40	-
25	E-TMC1	2135,50	1T	179,60	302,00	25,00	22,65	0,14	1,68	0,23	1,00	1,226	51,35	166,00	3,23	19,67	67,00	3,41	3,23	-
26	E-TRM9	2190,84	1T	179,60	218,00	25,00	15,63	0,14	1,21	0,08	1,00	1,079	31,17	166,00	5,33	13,57	67,00	4,94	4,94	-
27	E-TRM8	2194,00	2	180,00	-	-	15,23	-	-	-	-	1,000	27,94	92,00	3,29	13,10	67,00	5,11	3,29	-
28	E-TRM7	2206,00	2	180,00	-	-	13,70	-	-	-	-	1,000	25,15	92,00	3,66	11,79	67,00	5,68	3,66	-
29	E-TRM6	2209,00	2	179,37	-	-	13,32	-	-	-	-	1,000	24,73	92,00	3,72	11,63	67,00	5,76	3,72	-
30	E-TRM4	2213,62	1T	157,07	218,00	8,00	12,74	0,05	1,39	0,38	1,00	1,380	50,42	166,00	3,29	19,62	67,00	3,41	3,29	-
31	E-TRM3	2230,50	1T	149,60	218,00	40,00	10,60	0,27	1,46	0,06	1,00	1,056	37,89	166,00	4,38	20,23	67,00	3,31	3,31	-
32	E-TRM2	2230,50	1T	149,60	200,00	40,00	10,60	0,27	1,34	0,04	1,00	1,041	37,34	166,00	4,45	20,23	67,00	3,31	3,31	-
33	E-TRM1	2234,49	3	150,00	-	-	10,09	-	-	-	-	1,000	33,84	78,00	2,31	19,03	67,00	3,52	2,31	-
34	E-0	2314,00	3	150,00	-	-	0,00	-	-	-	-	1,000	0,00	78,00	-	0,00	67,00	-	-	-

Figura 4.29: Cálculo de tensión, factor de seguridad y sección crítica. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

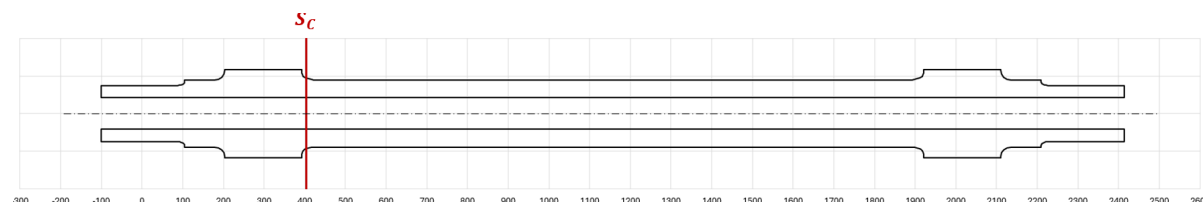


Figura 4.30: Ubicación sección crítica del eje. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

4.4.4 Optimización geométrica.

Una vez realizada la automatización de la geometría del eje y de sus cálculos asociados, se procede a la implementación de un método de optimización sobre los datos obtenidos.

El presente Trabajo Fin de Máster propone una optimización de la geometría del cuerpo del eje iterando con los diámetros disponibles en la tipología de eje (aquellos no restringidos por las dimensiones del equipamiento) con el objetivo minimizar el factor de seguridad promedio obtenido en las distintas secciones de cálculo.

El proceso de optimización se integra en el programa Excel mediante el módulo de Solver, el cual permite encontrar valores óptimos (máximos o mínimos) de una celda objetivo modificando las celdas identificadas como variables de decisión y cumpliendo con unas restricciones predefinidas.

La naturaleza del problema de cálculo conlleva que el método de resolución GRG No Lineal (Generalized Reduced Gradient) sea adecuado para su resolución.

A continuación, se expone la definición del problema de optimización, incluyendo ejemplos específicos asociados a un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*.

Función objetivo.

Considerando los factores de seguridad obtenidos en cada una de las secciones del eje, se establece una celda objetivo que calcula el promedio de los resultados obtenidos.

El objetivo del método de optimización se establece en minimizar el valor promedio del factor de seguridad, iterando con las variables de decisión y cumpliendo las restricciones del problema.

Variables de decisión.

Se establecen como variables de decisión aquellos diámetros que no se encuentran restringidos por interfaces con componentes del equipamiento definido en el módulo de entrada.

A modo de ejemplo, para un tipología de *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados* las variables de decisión son los diámetros de la caña central del eje y el diámetro del agujero interno del eje. El resto de geometrías que configuran esta tipología de eje se encuentran completamente restringidas por las dimensiones del equipamiento definidos en el módulo de entrada.

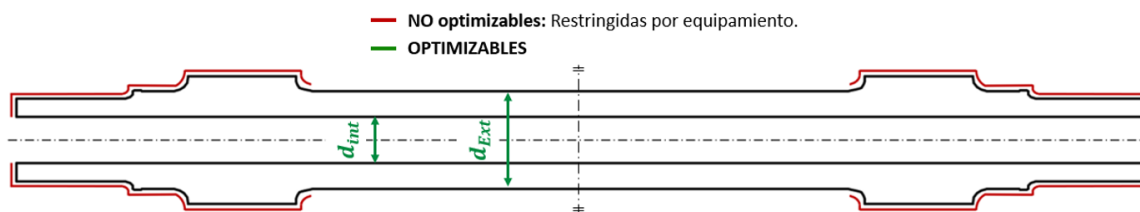


Figura 4.31: Diámetros optimizables. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

Restricciones del problema.

Las restricciones del problema acotan la validez de las soluciones obtenidas en las distintas iteraciones del proceso de optimización.

La coherencia de las geometrías obtenidas en las iteraciones de cálculo debe asegurarse incluyendo las restricciones geométricas del cuerpo de eje descritas en el capítulo 4.3.3

La validez de cálculo de las iteraciones se asegura mediante la introducción de una restricción sobre el factor de seguridad mínimo admisible. El valor mínimo admisible para el factor de seguridad se establece en el módulo de entrada de datos, mientras que el factor de seguridad mínimo obtenido en cada iteración se extrae del valor de la sección crítica del eje.

Para asegurar la viabilidad de fabricación de los resultados obtenidos, también se incluyen restricciones de números enteros a los diámetros optimizados.

RESTRICCIONES SOLVER					
REQUISITO					Resultado
SFmin_E_R_NDC	1,02	>	1,00	Sfmin	Ok
opt_dint_E_R_NDC	100	Entero			
opt_dExt1_E_R_NDC	187,00	Entero			

Figura 4.32: Restricciones adicionales solver. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

4.5 Automatización de planimetría.

En el presente capítulo se describe el procedimiento para automatizar la delineación de la planimetría en el software de diseño CAD (Siemens NX) asociada al cuerpo de eje optimizado en el programa de Excel.

Empleado un concepto equivalente al de automatización del diseño y cálculo (capítulo 4.4), en el cual se genera un fichero o programa en Excel con toda la información requerida, para la automatización de la planimetría se genera un fichero de NX en el cual deben definirse las distintas tipologías parametrizadas de cuerpo de eje a integrar.

4.5.1 Definición geométrica en NX.

Para cada una de las tipologías de eje establecidas en la base de datos de Excel, debe generarse en el fichero de NX una geometría para la tipología del eje definida con una parametrización idéntica a la establecida en el programa Excel.

La parametrización del eje en NX consiste en un conjunto de dimensiones controladas por expresiones e interconectadas entre ellas por las transiciones requeridas en la normativa aplicable.

A modo de ejemplo, la figura 4.33 muestra la parametrización realizada para un tipología de *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*, en la cual las dimensiones del eje varían con los valores definidos sus expresiones. Las dimensiones marcadas en azul están relacionadas con la definición del equipamiento del eje montado, mientras que las verdes son dimensiones libres que pueden ser objeto de optimización mediante cálculo.

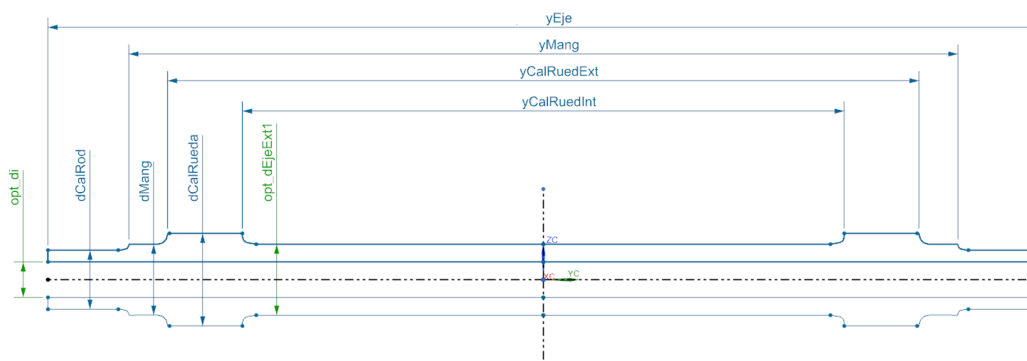


Figura 4.33: Transición. Cubo rueda - Caña eje 1. Cajas de grasa externas.

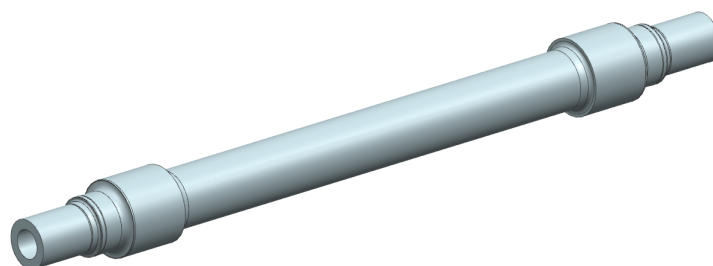


Figura 4.34: Modelo 3D NX. Ejemplo: Eje remolque de caja de grasa externas sin discos calados.

4.5.2 Exportación geométrica a software de diseño.

Para la exportación de los datos geométricos, se generan en Excel variables con la misma designación que las expresiones empleadas en NX.

La exportación de datos debe generarse en un fichero .exp con la estructura de datos requerida por NX para actualizar los valores de las expresiones.

Para ello, en la hoja de configuración de cada tipología de eje montado, se define una región de procesamiento de los datos de exportación en la que se concatenan las expresiones requeridas y sus valores. La creación del fichero .exp asociado se realiza mediante la ejecución de una macro con un botón habilitado en el módulo de entrada de datos, la cual genera un fichero de exportación con el formato de datos y extensión requeridos por NX.

PARÁMETROS DE EXPORTACIÓN		
Dimensión	Valor	Expresion NX
dCalRod	150	[mm]dCalRod=150
dCalRueda	235	[mm]dCalRueda=235
dMang	180	[mm]dMang=180
opt_dEjeExt1	187	[mm]opt_dEjeExt1=187
opt_di	100	[mm]opt_di=100
yCalRuedExt	1907	[mm]yCalRuedExt=1907
yCalRuedInt	1527	[mm]yCalRuedInt=1527
yEje	2514	[mm]yEje=2514
yMang	2104	[mm]yMang=2104

Figura 4.35: Parámetros exportación Excel. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

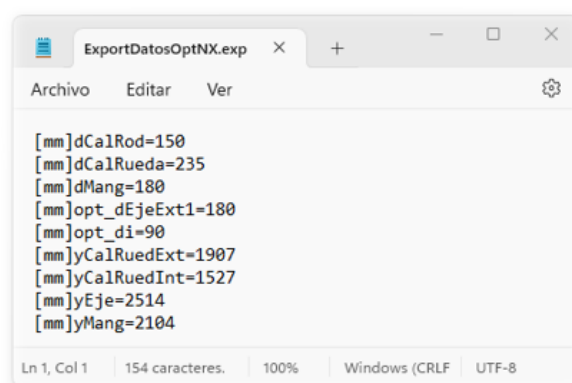


Figura 4.36: Fichero de exportación. Ejemplo: Eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados.

La importación de datos en NX se realiza importando el fichero generado por Excel en el módulo de expresiones (Ctrl + E). Una vez ejecutada la importación, la geometría asociada a la tipología de eje en NX actualiza sus dimensiones de forma automática, obteniendo el modelo 3D optimizado del cuerpo de eje (figura 4.34).

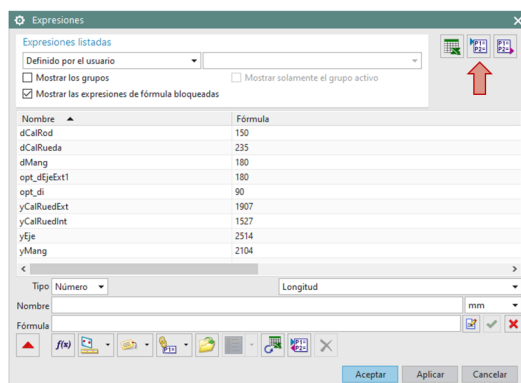


Figura 4.37: Módulo de expresiones de NX. Importación del fichero de datos de Excel.

4.5.3 Planimetría asociada.

El fichero de NX contiene una hoja de dibujo asociada a cada una de las geometrías de las distintas tipologías de eje integradas.

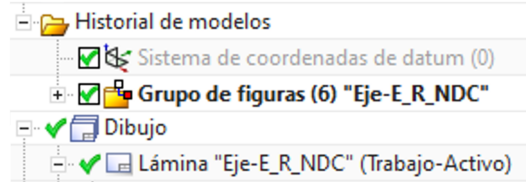


Figura 4.38: NX - Planimetría asociada a tipología de cuerpo de eje.

El dibujo asociado incluye todos los requisitos de planimetría definidos en la normativa vigente (ver capítulo 2.2) asociados a la geometría de la tipología de eje optimizada.

Las dimensiones, tolerancias y acabados superficiales se encuentran correctamente asociadas al modelo 3D del eje, permitiendo la actualización automática del plano con las dimensiones optimizadas importadas del programa Excel.

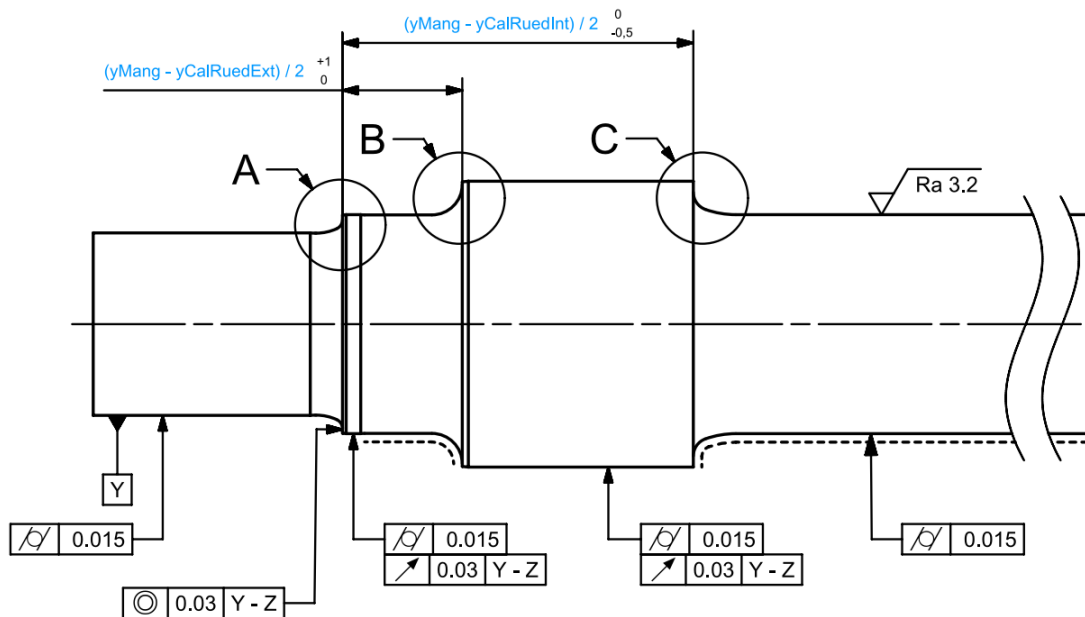


Figura 4.39: NX. Requerimientos planimetría asociados automáticamente a la geometría.

A modo de ejemplo, en la planimetría anexada al presente Trabajo Fin de Máster, se incluye la planimetría generada de forma automática para un tipología de *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados*.

Conclusiones y propuestas de desarrollo.

5.1 Conclusiones.

El presente Trabajo Fin de Máster es un aporte investigador basado en la experiencia laboral en el sector ferroviario, con el objetivo de establecer un método para la automatización del diseño y cálculo de ejes ferroviarios que integre los requerimientos de la normativa ferroviaria europea.

Como introducción a la temática de estudio, se han descrito conceptos generales sobre ejes montados ferroviarios, incluyendo los componentes que lo componen, sus distintas tipologías y la función que desempeñan en su funcionamiento. Para el correcto entendimiento del trabajo, se ha definido la normativa europea aplicable en la metodología desarrollada (Normativa EN) y se han descrito los requisitos relevantes de diseño, cálculo y planimetría de ejes ferroviarios.

Para la implementación del método propuesto, se han descrito en profundidad el procedimiento para establecer la automatización de una tipología de eje montado, sirviéndose ejemplos para una clara comprensión de cada uno de los pasos realizados.

Considerando los resultados obtenidos en la implementación del método de automatización propuesto, pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- El método propuesto permite obtener de forma automática los resultados de cálculo y planimetría asociada a la geometría optimizada de un eje ferroviario a partir de unos datos de entrada definidos por la tipología de eje montado y los componentes que lo integran.
- La automatización lograda reduce significativamente el tiempo requerido para el desarrollo de nuevas geometrías de eje, especialmente si la tipología de eje montado se encuentra previamente definida en la base de datos del programa.
- La metodología propuesta permite una definición sencilla de nuevas tipologías de ejes en la base de datos.

- La integración lograda entre los procedimientos normativos de cálculo y diseño suprime la existencia de incoherencias de definición entre en los parámetros de las secciones de la geometría del eje (diseño) y las secciones de cálculo.

5.2 Limitaciones y propuestas de desarrollo.

A continuación se exponen las limitaciones experimentadas en el desarrollo del proyecto y propuestas para futuras líneas investigadoras:

- Tipologías de eje implementadas: El presente Trabajo Fin de Máster se ha centrado en la descripción del método de automatización empleando como ejemplo la integración de un *eje remolque de cajas de grasa externas sin discos calados* en la base de datos del programa. Como línea de desarrollo futura, se propone la inclusión de nuevas tipologías al programa con el objetivo de ampliar la base de datos predefinida en el mismo.
- Esfuerzos de freno electro-mecánico: La normativa ferroviaria vigente no incluye la definición de ecuaciones asociadas a los esfuerzos de cálculo del freno electro-mecánico (freno motor). Para futuros desarrollos basados en el presente Trabajo Fin de Máster, se propone el estudio detallado de los momentos de frenado introducidos por tipologías comunes de equipamiento motriz en las distintas zonas del eje.
- Interfaz de entrada de datos: El programa desarrollado incluye una interfaz de entrada de datos sencilla basada en la verificación de los requerimientos normativos asociados a los datos de entrada. En futuros desarrollos del programa se propone incluir una interfaz dinámica de datos de entrada, con el objetivo de hacer más intuitivos los datos de entrada requeridos.
- Ecuaciones de cálculo para ejes con cajas de grasa internas de ancho métrico: La normativa vigente [2] declara que las ecuaciones de cálculo para esta tipología de eje montado se definirán en futuras ediciones de la misma. En futuros desarrollos, se recomienda revisar posibles nuevas versiones de la normativa para la integración de las restricciones de cálculo asociadas.
- Implementar método de cálculo para aplicaciones de alto par tractor: La normativa ferroviaria vigente declara que, en aplicaciones ferroviarias estándar, los escenarios de cálculo asociados a fenómenos de tracción no son relevantes. Para futuros desarrollos basados en el presente Trabajo Fin de Máster, se propone establecer un procedimiento de cálculo para aplicaciones ferroviarias de alto par tractor, en el que se definan los momentos asociados a la tracción introducidos por tipologías comunes de equipamiento motriz en en las distintas zonas del eje.

Parte II

Pliego de condiciones

En el presente apartado se especifica la normativa y equipamiento requerido para la realización del proyecto de forma satisfactoria.

El Trabajo de Fin de Máster se basa en el desarrollo de una metodología de automatización para el diseño de ejes ferroviarios, por lo que su pliego de condiciones está fundamentalmente constituido por las normativas ferroviarias aplicables y las características técnicas de los componentes informáticos y software empleados.

Dado que el Trabajo de Fin de Máster no ha requerido la realización de ensayos de laboratorio, no se requiere normativa de seguridad ni condiciones facultativas.

El incumplimiento de las especificaciones indicadas a continuación, no implica la pérdida de validez de la metodología expuesta, pero puede conllevar problemas para su realización.

II.1 Normativa específica.

Las normas relacionadas con el objeto de desarrollo del Trabajo de Fin de Máster se listan a continuación.

- EN 13260:2020. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ejes montados. Requisitos de producto.
- EN 13261:2021. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ejes. Requisitos de producto.
- EN 13103-1:2017 + A1:2022. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Parte 1: Método de diseño de los ejes con manguetas exteriores.
- CEN/TS 13103-2:2020. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Parte 2: Método de diseño de los ejes con manguetas interiores.
- ISO 128-1:2020. Documentación técnica de productos (TPD). Principios generales de representación. Parte 1: Introducción y requisitos fundamentales.
- ISO 129-1:2019. Documentación técnica de los productos (TPD). Representación de dimensiones y tolerancias. Parte 1: Principios generales.
- EN 22768-1:1994. Tolerancias generales. Parte 1: tolerancias para cotas dimensionales lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia.

II.2 Especificaciones de materiales y equipos

En esta sección se describen las especificaciones técnicas del equipo y los programas de software empleados.

II.2.1 *Especificaciones de hardware.*

Para el desarrollo del trabajo y la elaboración de la memoria se ha empleado un equipo informático con las características indicadas en la tabla II.1.

HARDWARE	
Componente	MSI Prestige 14 AI EVO
S. Operativo	Windows 11 Pro
Procesador	Intel Core Ultra 7
Controlador Gráfico	Intel Arc Graphics
RAM	32 GB
SSD	1 TB

Tabla II.1: Especificaciones técnicas del hardware.

II.2.2 *Especificaciones de software.*

A continuación se indican los programas de software requeridos y su propósito de empleo:

- **Microsoft Office 365- Excel:** Herramienta ofimática empleada para realizar la automatización del diseño y cálculo del presente Trabajo Fin de Máster
- **Siemens NX:** Herramienta de diseño 3D y delineación para importar las geometrías optimizadas y obtener la planimetría asociada.
- **TeXworks:** Software de distribución libre para edición de texto en LaTeX.

Parte III

Presupuesto

Con el objetivo de aportar una estimación clara de los costes asociados a la realización del presente Trabajo Fin de Máster, se exponen a continuación agrupados en función de su naturaleza.

La duración del Trabajo Fin de Máster ha sido de 4 meses, en los que se estima que se ha logrado la asignación de horas asociada a los créditos ETCS del Trabajo Fin de máster (15 ETCS = 375 horas).

III.1 Coste de licencias informáticas.

En esta sección se resumen los gastos asociados a los distintos programas software requeridos para el desarrollo de la automatización descrita en el presente Trabajo Fin de Máster. Para determinar el coste real asociado al uso de cada uno de los productos, se considera el precio de la licencia anual, su porcentaje de uso anual y la duración del Trabajo fin de Máster.

COSTES DE LICENCIAS INFORMÁTICAS					
Artículo	Proveedor	N Licencias	Precio [€/año]	Uso estimado [%]	Coste [€]
NX	Siemens	1	9.800	30	735,00
Excel 365	Microsoft	1	140	50	23,33
TeXworks	OpenSource	1	0	20	0
TOTAL [€]					758,33

Tabla III.1: Costes asociados a licencias informáticas.

III.2 Costes del hardware.

A continuación se listan los componentes de hardware requeridos para del trabajo. Para estimar el coste asociado a su uso durante los meses de duración del proyecto, se ha tenido en cuenta su depreciación considerando como referencia un tiempo de obsolescencia de 6 años (72meses).

COSTES DEL HARDWARE					
Artículo	Proveedor	Unidades	Precio [€/unidad]	Meses de uso	Coste [€]
MSI Prestige 14 AI EVO: Intel Core Ultra 7 / 32GB / 1TB	PC Componentes	1	1699,00	4	94,39
Ratón Logi MX Máster	PC Componentes	1	84,99	4	4,67
TOTAL [€]					99,06

Tabla III.2: Costes asociados a hardware.

III.3 Costes del material bibliográfico.

En esta tabla se recoge el coste del material bibliográfico empleado para el desarrollo del trabajo. Debido al carácter normativo en el que está enfocado el trabajo, la bibliografía se compone principalmente por la normativa EN aplicable al cálculo de ejes ferroviarios.

COSTES MATERIAL BIBLIOGRÁFICO	
Título	Coste [€]
EN 13103-1:2017+A1:2022. Railway applications - Wheelsets and bogies - Part 1: Design method for axles with external journals.	93
CEN/TS 13103-2:2020. Railway applications - Wheelsets and bogies - Part 2: Design method for axles with internal journals.	75
EN 13260:2020. Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheelsets - Product requirements.	83
EN 13261:2021. Railway applications - Wheelsets and bogies - Axles - Product requirements.	112
TOTAL [€]	363,00

Tabla III.3: Costes asociados al material bibliográfico.

III.4 Costes de personal.

Para la obtención del coste de personal se considera el XX Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos (aprobado en 2024), para un nivel de 'Titulado Medio (Nivel salarial 2)'. En el citado convenio se regula que para dicha categoría profesional el salario anual es 22.224,26 € y está asociado a un cómputo anual de 1792 horas laborales, lo que equivale a coste de 12,40 €/hora.

Teniendo en cuenta el tiempo asociado a los créditos del Trabajo Fin de Máster, las horas consideradas a la realización del trabajo son 375 horas. Para determinar el coste total del personal, hay que considerar el salario bruto y el coste de seguridad social asociado (30 % del bruto).

COSTES PERSONAL TÉCNICO			
Descripción	Tiempo de trabajo [h]	Salario [€/h]	Coste [€]
Ingeniero técnico	375	12,40	4.650,00
Seguridad Social (30 %)			1.395,00
		TOTAL [€]	6.045,00

Tabla III.4: Costes asociados al personal técnico.

III.5 Otros costes.

El remanente de gastos se incluyen en la siguiente tabla, comprendiendo fundamentalmente los costes de la electricidad para el funcionamiento de los equipos y los gastos de internet de los mismos. Se representan como un promedio de las facturas recibidas a lo largo de los meses de realización del proyecto.

OTROS COSTES			
Coste	Periodo [mes]	Precio [€/mes]	Coste [€]
Electricidad	4	65,90	263,60
Internet	4	29,99	119,96
TOTAL [€]			383,56

Tabla III.5: Otros costes.

III.6 Coste resultante del proyecto.

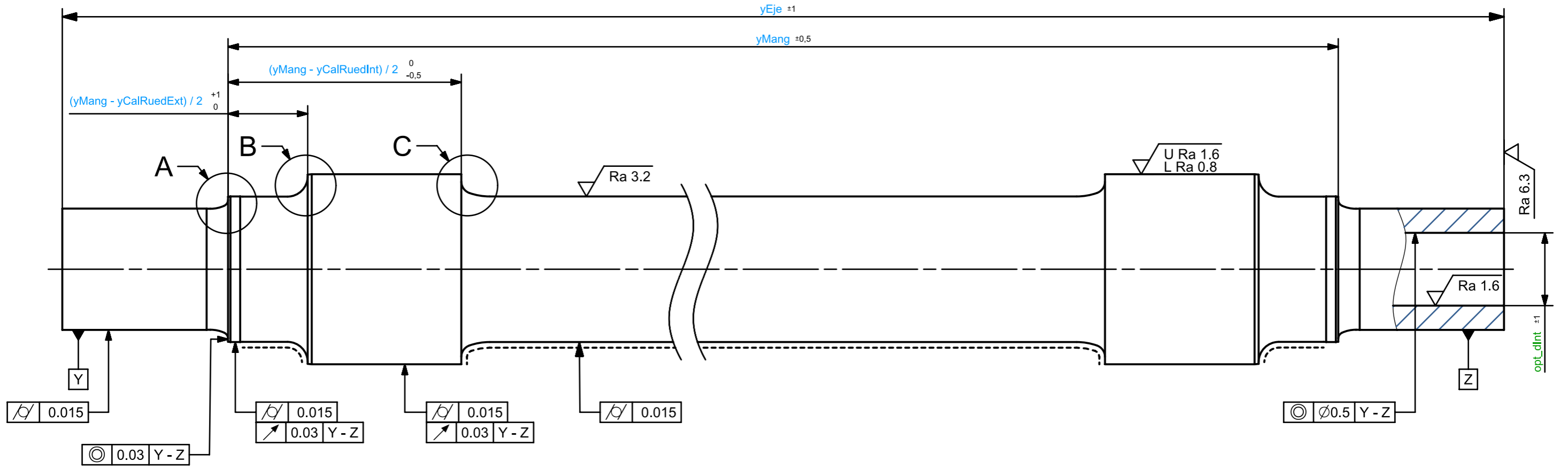
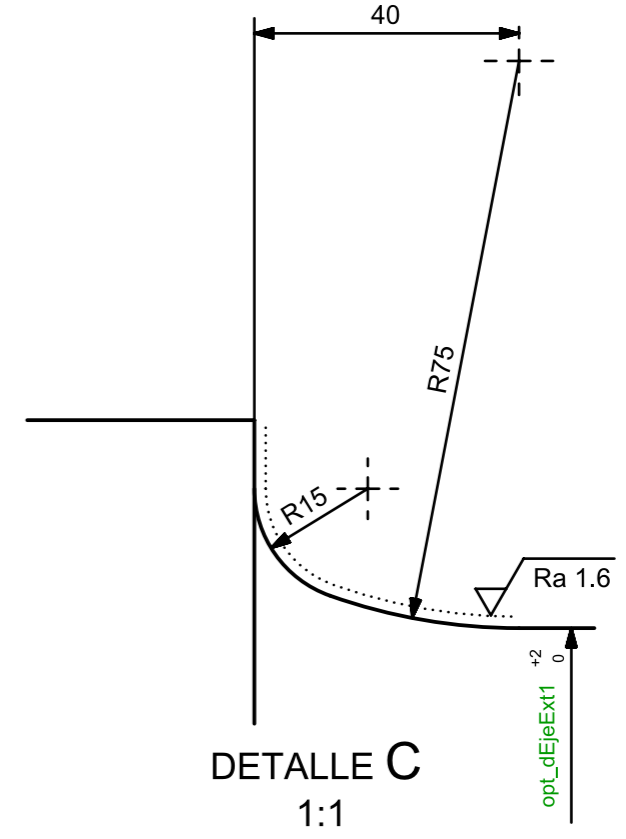
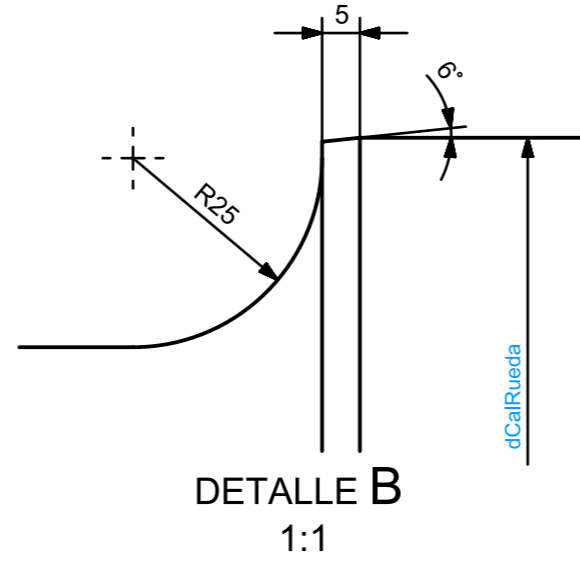
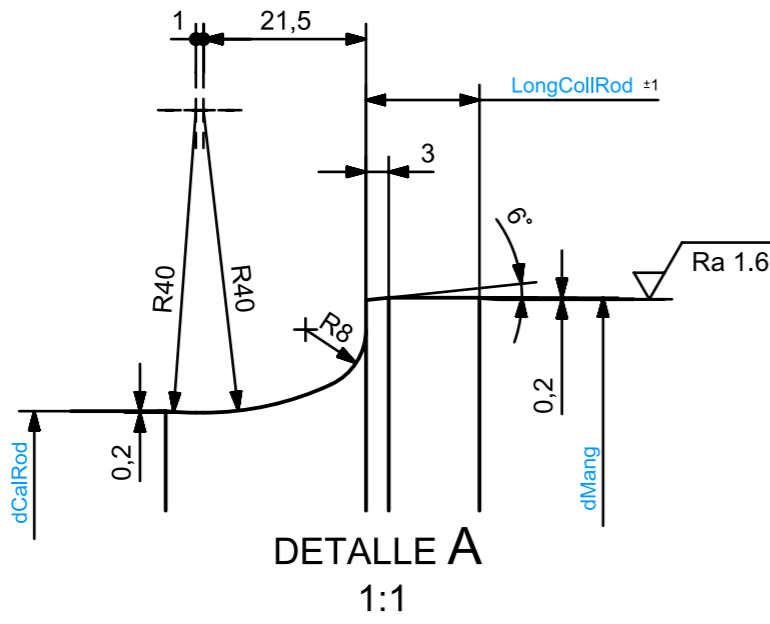
Como conclusión, se agrupan los distintos costes para obtener el total de la realización del trabajo.

COSTE DEL PROYECTO	
Concepto	Coste [€]
Licencias informáticas	758,33
Hardware	99,06
Bibliografía	363,00
Personal	6.045,00
Otros	383,56
TOTAL [€]	7.648,95

Tabla III.6: Coste resultante del proyecto.

Parte IV

Planos



$\sqrt{Ra 0.8}$ (
 $\sqrt{\begin{matrix} U Ra 1.6 \\ L Ra 0.8 \end{matrix}}$
 $\sqrt{Ra 1.6}$
 $\sqrt{Ra 3.2}$
 $\sqrt{Ra 6.3}$
)

----- PINTADO (Según requerimientos EN 13261)

		Material	EN13261 EA1T	Peso	460 kg
EJE CAJAS DE GRASA EXTERNAS SIN DISCOS CALADOS					
Escala	1:5	Crearor	Fecha	Revisión	Hoja
ISO 128 ISO 8015	ISO 129 EN 22768 - m,L	A. López	04-Sept-24	REV. 00	1/1

Bibliografía

- [1] *EN 13103-1:2017+A1:2022. Railway applications - Wheelsets and bogies - Part 1: Design method for axles with external journals.* (Vid. págs. 9, 11-14, 19, 20, 22, 25, 27, 29-31, 37, 42, 49).
- [2] *CEN/TS 13103-2:2020. Railway applications - Wheelsets and bogies - Part 2: Design method for axles with internal journals.* (Vid. págs. 9, 11-14, 19, 20, 22, 26, 27, 29, 49, 62).
- [3] *EN 13260:2020. Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheelsets - Product requirements.* (Vid. págs. 9, 11, 15).
- [4] *EN 13261:2021. Railway applications - Wheelsets and bogies - Axles - Product requirements.* (Vid. págs. 9, 11, 16-18).
- [5] Colaborative project grant agreement n^o265 706. *Final report EURAXLES Theme SST. 2010.4.1-2, Minimizing the risk of fatigue failure of railway axles.* Inf. téc. Brussels 2015 (vid. pág. 12).
- [6] Railway Technology. <https://www.railway-technology.com>. (Visitado: 10-07-2024) (vid. pág. 3).
- [7] GHH-Bonatrans. <https://www.ghh-bonatrans.com>. (Visitado: 15-07-2024) (vid. pág. 5).
- [8] Walbo Railway. <https://www.walborailway.cz>. (Visitado: 15-07-2024) (vid. págs. 5, 7).
- [9] Kovis. <https://www.kovis-group.com>. (Visitado: 13-07-2024) (vid. pág. 6).
- [10] Knorr-Bremse. <https://rail.knorr-bremse.com>. (Visitado: 13-07-2024) (vid. pág. 7).
- [11] TSA - Traktionssysteme Austria. <https://www.tsa.at>. (Visitado: 10-07-2024) (vid. pág. 8).