



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE DISTINTAS
ALTERNATIVAS DE VÍA FERROVIARIA A
ESCALA SOBRE CUBIERTA DE LA EPSL
PARA ENSAYOS DE LABORATORIO**

Alumno: Francisco Javier Quintero Cortés

Tutor: Prof. D. Javier Fernández Aceituno
Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

CoTutor: Prof. D. Jesús Donaire Ávila
Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2020



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Campus Científico – Tecnológico de Linares

Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Javier Fernández Aceituno y Don Jesús Donaire Ávila, como tutor y cotutor, respectivamente, del Trabajo Fin de Grado titulado: Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria a escala sobre cubierta de la EPSL para ensayos de laboratorio; autorizan su presentación para defensa y evaluación en el Campus Científico – Tecnológico de Linares.

Jaén, noviembre de 2020.

El alumno:

Francisco Javier Quintero Cortés.

Los tutores:

Firmado digitalmente por FERNANDEZ
ACEITUNO JAVIER - 77352118J
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-77352118J,
givenName=JAVIER, sn=FERNANDEZ
ACEITUNO, cn=FERNANDEZ ACEITUNO JAVIER -
77352118J
Fecha: 2020.11.17 08:59:47 +01'00'

Don Javier Fernández Aceituno.

**DONAIRE
AVILA
JESUS -
44292641T**

Firmado digitalmente por
DONAIRE AVILA JESUS -
44292641T
Nombre de reconocimiento
(DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-44292641
T, givenName=JESUS,
sn=DONAIRE AVILA,
cn=DONAIRE AVILA JESUS -
44292641T
Fecha: 2020.11.16 22:06:50
+01'00'

Don Jesús Donaire Ávila.

AGRADECIMIENTOS

Por norma general, uno sabe cuando comienza su vida académica, pero nunca sabe cuando va a terminar, lo más probable es que la mía dure toda la vida, o al menos así espero que sea, ya sea en un pupitre o en el sofá de mi casa.

Con este trabajo cierro una etapa universitaria en la que tengo que dar gracias a todas esas personas que han estado ahí durante este tiempo y que tanto con momentos buenos cómo malos han forjado la persona que hoy soy.

A Javier Fernández Aceituno por darme la gran oportunidad de participar en un TFG que él propuso y que partía de la temática de su tesis. Gracias, dicho sea de paso, por hacerme disfrutar de las estructuras metálicas al mismo tiempo que adquiría conocimientos de calidad en esta asignatura.

A Jesús Donaire Ávila por ser, durante tan sólo un cuatrimestre, la persona que más amor me ha hecho sentir por la Ingeniería Civil en todos estos años, por su empeño y cariño en formar grandes profesionales y por transmitir sus conocimientos de la forma en que lo hace.

Gracias a mis padres y a mi hermano por ser las personas que han empujado cada día de una forma constante y motivadora, depositando siempre en mí una confianza sólida cómo sólo lo podrían haber hecho ellos.

Gracias a mis amigos de la EPSL, especialmente a Ivan Denisov por haber sido un hermano durante mi tiempo en Linares, llegarás a conseguir lo que quieras en la vida.

A Javier Leiva, compañero, vecino, amigo y familia por dedicar un poco de su tiempo a transmitirme sus conocimientos y experiencia.

Y por último gracias a Ángela, mi pareja, por haber estado a mi lado en estos últimos años, dándome la última dosis de motivación para cerrar esta bonita etapa.

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado aborda la idea de construir un laboratorio de ferrocarriles, de ancho de vía 5" (127 mm), en una de las cubiertas de la Escuela Politécnica Superior de Linares (EPSL). Se ha valorado la posibilidad de construirlo en una de las tres cubiertas que componen los tres edificios del campus, eligiendo la cubierta de laboratorios Oeste cómo la más idónea para esta instalación.

Frente a la posibilidad de realizar un trazado abierto o cerrado, se ha determinado, tras una comparativa, que el trazado será finalmente cerrado. Cómo se trata de un laboratorio para realizar ensayos con modelos de vehículos tractores a escala, es necesario que en dicho laboratorio exista una variedad en la superestructura del ferrocarril que aborde los principales sistemas existentes en la actualidad. Por ello, se ha realizado el trazado con un tramo de vía en placa y otro tramo de vía en balasto, ambos de ellos simétricos.

Se ha buscado simplificar la construcción de ambas superestructuras sin que la cubierta se vea directamente afectada por taladros o sistemas difíciles de modificar o desmontar. De forma que se ha diseñado un sistema de cajones prefabricados de hormigón, de forma y tamaño estándar para ambos sistemas y que ha facilitado su construcción.

ABSTRACT

This Final Degree Project addresses the idea of building a railway's laboratory, 5" wide track, in one of the EPSL roofs. It has been valued the possibility of building it in one of the main three roofs which compounds the three campu's buildings, finally choosing the west roof of the laboratories as the best for this instalation.

To address the situation of making an open or closed route, it has been determined, after comparing both, that the route will finally be closed. Since this is a laboratory where locomotives on a scale are being tested, a variety in the railway's structure will be required to accomplish the main existing sytems nowadays. Because of this, the route has been made with a ballastless track stretch and another one in concrete sleeper, both of them symetric.

Simplifying both superstructure constructions have been pursued so that the roof wont be directly affected by both drills or difficult systems to modify or dismantle. Is because of this that a drawer system of prefabricated concrete has been designed, with standard shape and size for both sytems that has facilitate its construction.

OBJETIVO

Puesto que existe un compromiso entre el vehículo y la vía, el objetivo del TFG es construir el ferrocarril en base a un análisis dimensional y semejanza dinámica. De forma que los valores obtenidos por los sensores de los modelos de vehículos usados en los ensayos tengan validez científica.

Como los modelos de vehículos hasta ahora contruidos se han diseñado pensando en los ferrocarriles de modelismo tripulado, de ancho de vía de 5", 127 mm, se ha abordado el problema diseñando todo el sistema para este ancho de vía. El modelismo tripulado no es nada riguroso en su construcción, es decir, lo único importante es conseguir trazar un camino para que discurra un vehículo a velocidades tan bajas que no existen problemas de descarrilamiento o accidentes. Por ello no existe ningún cálculo, más que el geométrico, a la hora de construirse. Por ello el objetivo es realizar un modelo de ferrocarril semejante a uno real.

Se han establecido tres factores a partir de los cuales se ha diseñado el modelo. Estos factores han sido: longitud, masa y velocidad. El primero de ellos definido por el ancho de vía del modelo y el ancho de vía internacional. Los otros dos siguientes se han definido teniendo en cuenta el vehículo ML95, Metro Ligero fabricado por Bombardier en el año 1995 para ancho de vía 1435 mm (ancho internacional).

Definidos los factores, se ha diseñado el trazado atendiendo a las restricciones geométricas que la cubierta impone y a las restricciones de la normativa de ADIF (Administrador De Infraestructuras Ferroviarias) en España.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN AL FERROCARRIL.....	10
1.1. EL TRAZADO DE LA VÍA	13
1.1.1. Introducción	13
1.1.2. Trazado en planta	14
<i>1.1.2.1. Las curvas circulares</i>	<i>14</i>
<i>1.1.2.2. El peralte.....</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2.3. La limitación al peralte.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2.4. Las curvas de transición</i>	<i>23</i>
1.1.3. Trazado en alzado	28
<i>1.1.3.1. Rasantes uniformes</i>	<i>29</i>
<i>1.1.3.2. Acuerdos Verticales</i>	<i>29</i>
1.2. LA VÍA FERROVIARIA.....	31
1.2.1. Características de la vía.....	31
1.2.2. La vía convencional.....	33
1.2.3. La vía en placa.....	34
1.2.4. Interacción entre la vía y el vehículo.....	35
<i>1.2.4.1. Inclinação de los carriles.....</i>	<i>35</i>
<i>1.2.4.2. Juego de la vía</i>	<i>36</i>
<i>1.2.4.3. El eje montado</i>	<i>36</i>
<i>1.2.4.4. El movimiento de lazo.....</i>	<i>36</i>
1.2.5. El ancho de vía.....	37
1.3. EL CARRIL	38
1.3.1. Funciones	38
1.3.2. Material.....	39
1.3.3. Forma	39
1.3.4. Peso.....	42
1.3.5. Comportamiento tensional del carril	42
1.4. LAS TRAVIESAS.....	42
1.4.1. Funciones	42
<i>1.4.1.1. Traviesas</i>	<i>42</i>
<i>1.4.1.2. Sujeciones</i>	<i>43</i>
1.4.2. Tipos de traviesas y sujeciones.....	43
<i>1.4.2.1. Traviesas</i>	<i>43</i>
<i>1.4.2.2. Sujeciones.....</i>	<i>44</i>

1.5. LA CONTINUIDAD DE LA VÍA	44
1.5.1. Las vías con juntas	44
1.5.1.1. <i>El embridaje</i>	45
1.5.1.2. <i>El apoyo de las juntas</i>	46
1.5.2. Las vías sin juntas	46
1.5.2.1. <i>Los aparatos de dilatación</i>	46
CAPÍTULO II: SEMEJANZA DINÁMICA Y ANÁLISIS DIMENSIONAL	48
2.1. INTRODUCCIÓN	48
2.1.1. Prototipos y modelos	48
2.1.1.2. <i>Similitud geométrica</i>	48
2.1.1.3. <i>Similitud dinámica</i>	49
2.1.2. Análisis dimensional	49
2.1.2.1. <i>Homogeneidad dimensional</i>	50
2.1.2.2. <i>Homogeneidad matemática</i>	50
2.1.3. Teorema Pi de Buckingham	51
2.2. CASO DE ESTUDIO	52
2.2.1. Factor de longitud	52
2.2.2. Factor de velocidad	53
2.2.3. Factor de masa	53
2.2.4. Resto de factores	55
2.2.5. Suspensión del vehículo ML95	56
2.2.5.1. <i>Suspensión primaria</i>	56
2.2.5.2. <i>Suspensión secundaria</i>	57
CAPÍTULO III: TRAZADO DE LA VÍA	59
3.1. UBICACIÓN ESCOGIDA PARA EL TRAZADO	59
3.2. ALTERNATIVAS DE TRAZADO	63
3.2.1. Parámetros que limitarán el trazado	63
3.2.2. Primera alternativa. Trazado lineal	68
3.2.3. Segunda alternativa. Trazado circular	69
3.2.4. Matriz de decisión	71
3.3. TRAZADO ADOPTADO	72
3.3.1. Geometría del trazado del modelo	72
CAPÍTULO IV: SISTEMA CONSTRUCTIVO	75
4.1. SOPORTE A LA VÍA	75
4.1.1. Los cajones a su paso por las curvas	77
4.1.2. Despiece del trazado	81

4.2. CARRIL Y TRAVIESAS	83
4.2.1. El carril	83
4.2.2. Las traviesas	85
4.3. ESTABILIDAD LATERAL DE LA VÍA	85
CAPÍTULO V: VALORACIÓN ECONÓMICA	88
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	91
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.....	93
CAPÍTULO VIII: ANEXOS	94

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN AL FERROCARRIL

El ferrocarril es un medio terrestre de transporte de pasajeros y mercancías en el que, a diferencia de otros medios como el avión, el coche o el barco, es necesario un conjunto de elementos o sistemas que están relacionados entre sí. Estos sistemas son los siguientes:

- Infraestructura.
- Superestructura.
- Material móvil.
- Electrificación (en caso de que sean coches eléctricos).
- Sistema de señalización y control de tráfico.



Fuente: masqueingenieria.com

Figura 1. Elementos y sistemas de un ferrocarril.

Tanto la infraestructura como la superestructura conforman la estructura sobre la que va a circular el material móvil, podríamos decir que es el camino o circuito. Esta estructura tiene que ser capaz de resistir las cargas que el material móvil va a transmitir, garantizando unas condiciones de seguridad y confort adecuadas.

INFRAESTRUCTURA

Está formada por las obras y movimientos de tierras necesarios para formar la plataforma sobre la que se construirá la infraestructura. Existe una normativa específica para la construcción de la infraestructura de un ferrocarril, pero generalmente se construye de una forma muy parecida a las plataformas para carreteras, aunque de una manera más exigente. Debido a las grandes limitaciones que existen en el trazado en planta y perfil, ya que los radios de curvatura tienen que ser grandes y las inclinaciones pequeñas, se realizaran numerosas obras como viaductos, puentes o túneles.

SUPERESTRUCTURA

Es similar a la capa de rodadura de una carretera, salvo que en el ferrocarril es necesario disponer de varios elementos para que el ferrocarril circule por ella. La superestructura en conjunto con la infraestructura conforman el sistema de soporte. La superestructura está formada por los siguientes elementos:

- El *carril*, sirve de guía para el tren y es el principal transmisor de las cargas hacia los elementos inferiores.
- Las *traviesas*, determinan y mantienen el ancho de vía, repartiendo además las cargas a las capas de asiento.
- Las *sujeciones*, unen los carriles a las traviesas.
- El *balasto*, es el árido que da carácter elástico a la vía en el plano vertical para absorber las cargas dinámicas, drenar el agua y transmitir los esfuerzos al subbalasto.
- El *subbalasto*, es la capa base de la superestructura y protege a la infraestructura de la erosión que pueda originarle el balasto y viceversa.



Fuente: FJ.Quintero (2018)

Figura 2. Tranvía Budapest. Línea 2 paralela al Danubio, del lado de Pest.

MATERIAL RODANTE

Definimos el material rodante como los vehículos que circulan por la vía. Distinguimos dos categorías de material rodante: motor (locomotoras y automotores) y remolcado.

El material motor puede ser diésel, vapor o eléctrico. Éste es el encargado de desplazar el material remolcado. En el caso de que sea locomotora, ésta asumirá todo el trabajo para arrastrar la carga.

Si hablamos de automotores o material autopulsado, éste tiene ambas funciones, tanto la de transportar la carga como la de traccionar el coche o vagón (actualmente los vagones no suelen ser autopulsados).



Fuente: Renfe

Figura 3. Tren Serie 114 para distancias medias a alta velocidad.

El material remolcado transporta tanto pasajeros como mercancía. En el caso de que transporten pasajeros los llamaremos coches, en caso contrario se llamarán vagones. Los vagones pueden ser de distintas tipologías en función del tipo de material que transporten.

ELECTRIFICACIÓN

Esta parte de la estructura sólo está presente cuando el material motor es de tracción eléctrica. No es un sistema de tracción habitual debido a que su construcción es muy costosa. La electrificación se encarga de distribuir la corriente eléctrica y está formado por: la catenaria, los postes y las subestaciones eléctricas.

SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN Y CONTROL DE TRÁFICO

Asegura que durante la circulación de los trenes no se produzcan accidentes, garantizando así la seguridad para maximizar la capacidad de aprovechamiento de la línea. Los elementos que engloba esta parte de la estructura son: la señalización, sistemas de ayuda a la conducción, sistemas de enclavamiento, etcétera). Actualmente el sistema mas avanzado y eficaz es el bloqueo automático con control de tráfico centralizado.

1.1. EL TRAZADO DE LA VÍA

1.1.1. Introducción

Para definir el trazado de la vía, que será formada por los carriles, es necesario contar con dos ejes principales, el eje en planta y el eje en alzado. Si se trata de vía única, definiremos el trazado en planta por el eje de la vía, si hablamos de doble vía, el trazado quedará definido por el eje de la entrevía. En la planta definiremos tres tipos de elementos: rectas, definidas por dos puntos o por un punto y una dirección, curvas circulares, definidas por su centro y el radio y curvas de transición, definidas por su parámetro.

En alzado definiremos el perfil longitudinal con el eje definido en planta, representado por la línea más inferior correspondiente a la cota del carril más bajo, ya que en el peralte tendremos una cota distinta para cada carril en una misma vía.

1.1.2. Trazado en planta

1.1.2.1. Las curvas circulares.

Una curva circular está fundamentalmente definida por el radio. Aunque también tendremos en cuenta los siguientes parámetros representados en la Figura 4 (Fuente: CALVO, F., LORENTE, J., JURADO, R., DE OÑA, J. *Ingeniería de ferrocarriles*. Granada: Editorial Técnica AVICAM, 2015.)

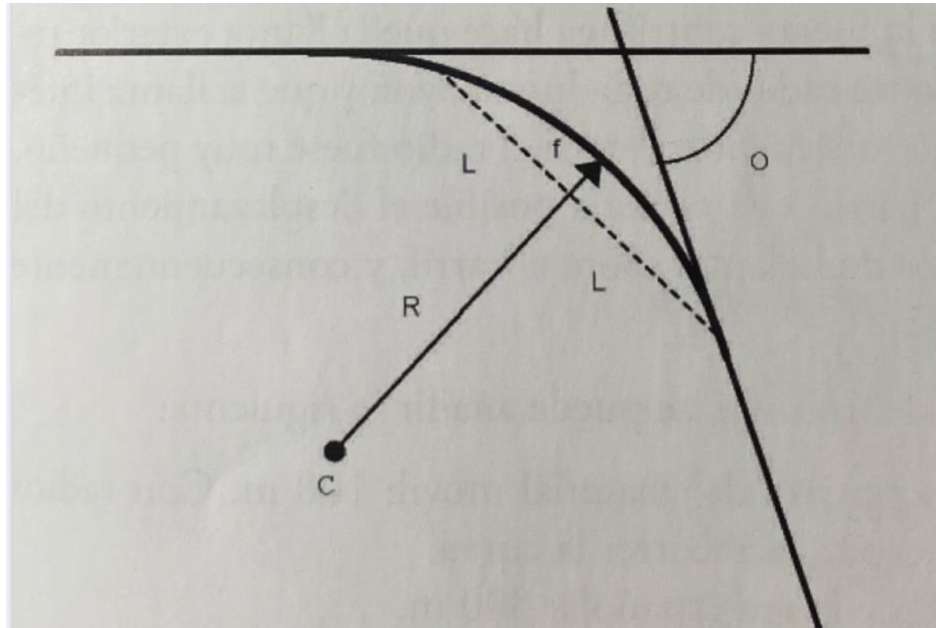


Figura 4. Elementos de las curvas circulares.

- R = Radio de la curva.
- C = Centro de la curva.
- $2L$ = Longitud de la cuerda entre los puntos de tangencia.
- f = Flecha.
- Ω = Ángulo que forman las dos alineaciones rectas consecutivas.

Debido a que el tren circula sobre dos carriles a cada lado del eje del trazado, la longitud del carril interior en una curva es menor que la longitud del carril exterior. La conicidad de las ruedas es la encargada de compensar esto, de manera que en una curva la conicidad provoca que la llanta exterior se eleve ligeramente, tomando un radio de rodadura mayor, y que la llanta inferior descienda ligeramente, tomando un radio de rodadura menor.

Aunque el radio mínimo viene determinado por la velocidad deseada y el confort del viajero, se puede detallar lo siguiente:

- Radio mínimo para la inscripción del material móvil: 100 m. El material móvil no es capaz de recorrer curvas con radios menores.
- $V = 140 \text{ km/h} \rightarrow R = 1000 \text{ m}$.
- $V = 200 \text{ km/h} \rightarrow R = 2300 \text{ m}$.
- $V = 250 \text{ km/h} \rightarrow R = 4000 \text{ m}$.

1.1.2.2. El peralte.

EL PERALTE TEÓRICO

Debido a la fuerza centrífuga en el recorrido de una curva, se desarrolla una aceleración transversal no compensada que produce una sobrecarga en el carril exterior, provoca poco confort en el viajero y afecta a las cargas transportadas. Para evitar este efecto, se sobre eleva el carril exterior respecto del interior, conociéndose esto como peralte. Al introducir el peralte e inclinarse el material móvil hacia el interior de la curva, aparece una nueva fuerza en sentido opuesto a la de la aceleración centrífuga, compensándose esta última.

Al introducir el peralte, el peso del vehículo se descompone en dos componentes, tal y cómo se observa en la Figura 5 (Fuente: CALVO, F., LORENTE, J., JURADO, R., DE OÑA, J. *Ingeniería de ferrocarriles*. Granada: Editorial Técnica AVICAM, 2015)

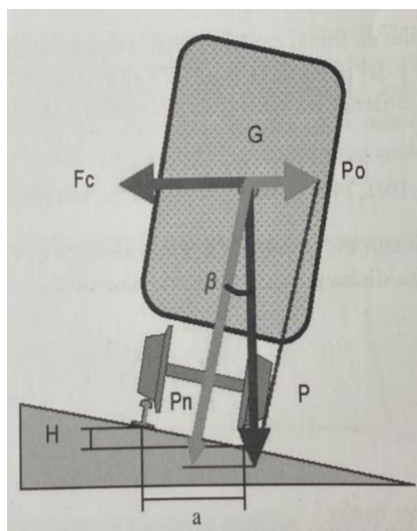


Figura 5. Diagrama de esfuerzos sobre material móvil en las curvas.

Tal y cómo está representado en la Figura 5, para calcular el peralte teórico que es necesario para el equilibrio de la fuerza centrífuga, se aplica la condición de que la resultante de las fuerzas F_c y P sea perpendicular al plano de la vía, de esta forma el pasajero no siente ninguna fuerza transversal. Para esto, P_0 , resultante de descomponer el peso P en dos componentes, P_0 en la dirección de F_c , y P_n perpendicular al plano de la vía, debe ser igual a F_c .

Definimos:

- H , peralte de la vía.
- a , distancia existente entre los ejes de los carriles.
- G , centro de gravedad del vehículo.
- β , ángulo de inclinación del vehículo causado por la presencia de peralte.

Con la definición de las anteriores variables, se tiene para F_c y P_0 la siguiente relación:

$$\tan\beta = \frac{H}{a} \quad (1)$$

$$F_c = m \cdot a_c = m \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

$$P_0 = P \cdot \tan\beta = m \cdot g \cdot \tan\beta \quad (3)$$

Igualando (2) y (3) se obtiene el peralte teórico para neutralizar el efecto de la fuerza centrífuga:

$$m \frac{V^2}{R} = m \cdot g \cdot \tan\beta \rightarrow \frac{V^2}{R} = g \frac{H}{a} \rightarrow H = \frac{aV^2}{gR} \quad (4)$$

Si tenemos una curva con un peralte H , la aceleración transversal máxima que compensa dicho peralte toma el siguiente valor:

$$\alpha_c = g \frac{H}{a} \quad (5)$$

EL CASO REAL

Debido a que en la situación real los trenes circulan a velocidades distintas de la teórica, usada para calcular el peralte, la neutralización de la aceleración centrífuga sólo es posible para un tráfico exclusivo.

Por tanto, en circunstancias habituales aparecen dos nuevas situaciones:

- Insuficiencia de peralte: Situación que se da cuando el tren circula a mayor velocidad que la velocidad de equilibrio del peralte. De esta forma, la aceleración centrífuga es mayor que la que el peralte puede compensar.

La aceleración transversal resultante es igual a la aceleración centrífuga menos la aceleración compensada por el peralte. Tomaremos la aceleración positiva como la que dirigida hacia el exterior del trazado de la curva.

$$\alpha_{nc} = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{gH}{a} \right) > 0 \quad (6)$$

- Exceso de peralte: Situación que se da cuando el tren circula a menor velocidad que la velocidad de equilibrio del peralte. Por ello aparece una aceleración no compensada hacia el interior del trazado de la curva.

En este caso, la aceleración transversal resultante tiene un valor de:

$$\alpha_{nc} = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{gH}{a} \right) < 0 \quad (7)$$

1.1.2.3. La limitación al peralte.

Se deben establecer una serie de limitaciones al peralte. Recordando la ecuación vista anteriormente, la aceleración transversal que sufre un vehículo que circula a una velocidad V por una curva con radio R está determinada por la siguiente expresión:

$$\alpha_{vehiculo} = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{gH}{a} \right) \quad (8)$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$);

H = Peralte de la curva (m);

a = Distancia entre ejes de los carriles;

ACELERACIÓN TRANSVERSAL MÁXIMA ADMISIBLE

El peralte del proyecto es impuesto por el confort del viajero. Éste comienza a notar los efectos de la aceleración transversal cuando ésta alcanza valores iguales o superiores a $0,9 \text{ m/s}^2$, no tolerándose valores de magnitud $1,8 \text{ m/s}^2$. Consideraremos el límite máximo de $1,5 \text{ m/s}^2$.

La calidad de la vía, debido a las pequeñas irregularidades, la alineación y la nivelación, genera un espectro de mini aceleraciones que son aleatorias. Si tenemos una vía de muy buena calidad, sin irregularidades, con carril continuo y bien nivelada, podemos valorar estos efectos con una aceleración de $0,3 \text{ m/s}^2$. Pero, si la vía es de baja calidad, estas irregularidades generaran aceleraciones de $0,5$ a $0,6 \text{ m/s}^2$.

Por tanto, se limitará la aceleración transversal máxima no compensada por el peralte a $0,9 \text{ m/s}^2$ en vías normales y a $1,2 \text{ m/s}^2$ en vías de buena calidad.

$$\alpha_{viajero} = 0,9 \frac{m}{s^2} \text{ (Para vías normales)} \quad (9)$$

$$\alpha_{viajero} = 1,2 \frac{m}{s^2} (\text{Para vías de buena calidad}) \quad (10)$$

EL EFECTO DE LAS SUSPENSIONES

La suspensión es fundamental para la circulación , pero hace que se produzca un aumento de la insuficiencia del peralte.

Cómo se ve en la Figura 6 (Fuente: CALVO, F., LORENTE, J., JURADO, R., DE OÑA, J. *Ingeniería de ferrocarriles*. Granada: Editorial Técnica AVICAM, 2015) en una curva, la suspensión exterior se comprime y la interior se alarga. Éste efecto hace que el peralte del vehículo sea menor que el del plano de la vía. Aparece un aumento de la insuficiencia del peralte que hace que el viajero note los efectos. El efecto se mide mediante el coeficiente de flexibilidad “f”, con valores de 0,2 y 0,4 en función de si las suspensiones son duras o normales, respectivamente.

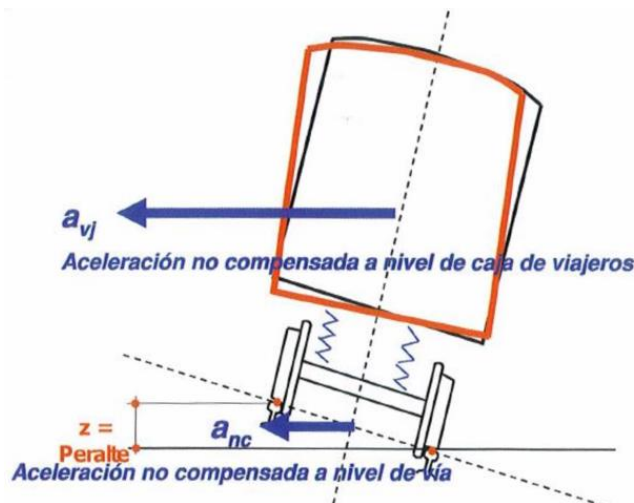


Figura 6. Efecto de las suspensiones.

Debemos particularizar las expresiones de la aceleración transversal obtenidas anteriormente, pues serían las referidas a la que sufre el vehículo. Por tanto, la aceleración transversal no compensada máxima que sufre el pasajero sería:

$$\alpha_{pasajero} = (1 + f) \alpha_{vehiculo} = (1 + f) \left(\frac{V^2}{R} - \frac{gH}{a} \right) \quad (11)$$

Donde f es la flexibilidad de la suspensión del vehículo (0,2 – 0,4)

Según lo establecido por ADIF para el límite máximo de la aceleración transversal soportada por el viajero en vías normales:

$$\alpha_{viajero} = 0,9 \frac{m}{s^2}; \alpha_{nc} = \frac{0,9}{1 + 0,4} = 0,641 \approx 0,65 \frac{m}{s^2} \quad (12)$$

TRENES RÁPIDOS

En los trenes que circulan a velocidades mayores a la velocidad de equilibrio de la curva, se produce una insuficiencia de peralte, es decir, se produce una aceleración transversal no compensada, que será apreciada por el viajero como una fuerza hacia el exterior de la curva.

Esta insuficiencia de peralte podemos definirla como el peralte ficticio que es necesario para compensar esta aceleración transversal sufrida por el pasajero y es denominada H_i :

$$H_i = \frac{\alpha_{nc} a}{g} \quad (13)$$

$$H_i = \frac{0,65 \cdot 1,74}{9,8} = 0,115 m = 115 mm \quad (14)$$

TREN PARADO EMPEZANDO A ACELERAR

Cuando el tren se encuentra parado, el pasajero siente una fuerza que lo empuja hacia el interior de la curva, debido a que no hay una velocidad que genere una fuerza centrífuga que lo compense. Además las irregularidades de la vía no generan ninguna

aceleración, por tanto la máxima aceleración que puede soportar el viajero es de $1,5 \text{ m/s}^2$.

Para $f = 0,6$ (vehículos antiguos):

$$\alpha_{viajero} = (1 + f)\alpha_{vehiculo} = (1 + f) \left(\frac{g \cdot H}{a} \right) < 1,5 \frac{m}{s^2} \quad (15)$$

$$H_i = \frac{1,5 \cdot 1,74}{1,6 \cdot 9,8} = 0,166 \text{ m} = 166 \text{ mm} \quad (16)$$

TRENES LENTOS

Cuando el vehículo circula a una velocidad lenta, se produce un exceso de peralte H_e , que sería el peralte que hay que quitar a la curva para compensar las aceleraciones transversales. La máxima aceleración negativa, no compensada, es de $0,456 \text{ m/s}^2$.

El exceso de peralte se limita en función del tráfico de trenes de mercancías, pues estos circulan a una velocidad lenta y son los que sufren el exceso de peralte. Cuando el tráfico es mayor a 45 TBR/día, se limita a 80 mm. Con tráficos menores, se puede aumentar hasta 110 mm.

CÁLCULO DEL PERALTE PRÁCTICO DE UNA LÍNEA

En las líneas en las que circulan trenes de mercancías y trenes de pasajeros, los cuales circulan a distintas velocidades, se debe establecer un peralte distinto en cada curva, de manera que se cumplan las limitaciones de insuficiencia y exceso de peralte. De forma que el peralte práctico surge de aplicar las ecuaciones (17) y (18), donde consideraremos las incógnitas H y R , peralte y radio, respectivamente.

- Insuficiencia de peralte:

$$H_i > \frac{\alpha_{vehiculo} a}{g} = \frac{a}{g} \left(\frac{V_{rapido}^2}{R} - \frac{g H}{a} \right) \quad (17)$$

- Exceso de peralte:

$$H_e > \frac{\alpha_{vehiculo} a}{g} = \frac{a}{g} \left(\frac{g H}{a} - \frac{V_{lento}^2}{R} \right) \quad (18)$$

Existe una *fórmula simplificada* que nos permite calcular la velocidad máxima a la que puede circular un tren de pasajeros por una curva, la cual tiene un peralte de 160 mm, máximo peralte establecido por ADIF. No conocemos el estado de la vía ni el material, se asume un valor máximo de $\alpha_{nc} = 0,65 \text{ m/s}$.

$$\alpha_{vehiculo} = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{g H}{a} \right); 0,65 = \left(\frac{V^2}{R} - \frac{9,8 \cdot 0,16}{1,74} \right); V = \sqrt{(0,65 + 0,9)R} = 1,25\sqrt{R} \quad (19)$$

$$V = 4,5\sqrt{R} \left(\frac{km}{h} \right) \quad (20)$$

En alta velocidad, con aceleraciones que admite el viajero de hasta $1,5 \text{ m/s}^2$ y una flexibilidad de la suspensión de los coches de 0,2:

$$V = 5,3\sqrt{R} \left(\frac{Km}{h} \right) \quad (21)$$

ESTABLECIMIENTO DEL PERALTE

Este establecimiento se realiza de manera gradual. En la recta no existe peralte, pues no existen aceleraciones transversales. En la curva de transición el carril exterior se va elevando, aumentando el peralte desde el inicio de la curva con valor 0 hasta el valor máximo que se alcanzaría en el punto de tangencia con la curva circular. Dicho valor máximo se mantendría constante durante toda la curva circular.

1.1.2.4. Las curvas de transición.

Éstas enlazan las alineaciones rectas con las curvas circulares. Su curvatura es variable y va aumentando desde valor 0 en el punto de tangencia con la alineación recta hasta el valor que le corresponda en el punto de tangencia con la curva circular. En las curvas de transición también se realiza la transición del peralte y se tiene que cumplir la condición de equilibrio, para una velocidad dada, entre la fuerza centrífuga y la compensación del peralte:

$$\frac{V^2}{\rho} = \frac{g H}{a} \quad (22)$$

Donde ρ es el radio de curvatura de la curva de transición para cada punto.

Aplicando la condición de que la variación del peralte sea lineal a lo largo de la curva de transición, $H = K s$, donde s es la longitud de la curva de transición, tenemos que:

$$\frac{V^2}{\rho} = \frac{g \cdot K \cdot s}{a} \rightarrow \frac{V^2 \cdot a}{g \cdot K} = \rho \cdot s$$

$$\frac{V^2 \cdot a}{g \cdot K} = cte = A^2$$

$$\rho \cdot s = A^2 \quad (23)$$

Obteniendo así la ecuación que define la clotoide, donde A es el parámetro de dicha curva. En la Figura 7 (Fuente: CALVO, F., LORENTE, J., JURADO, R., DE OÑA, J. *Ingeniería de ferrocarriles*. Granada: Editorial Técnica AVICAM, 2015) se define la clotoide:

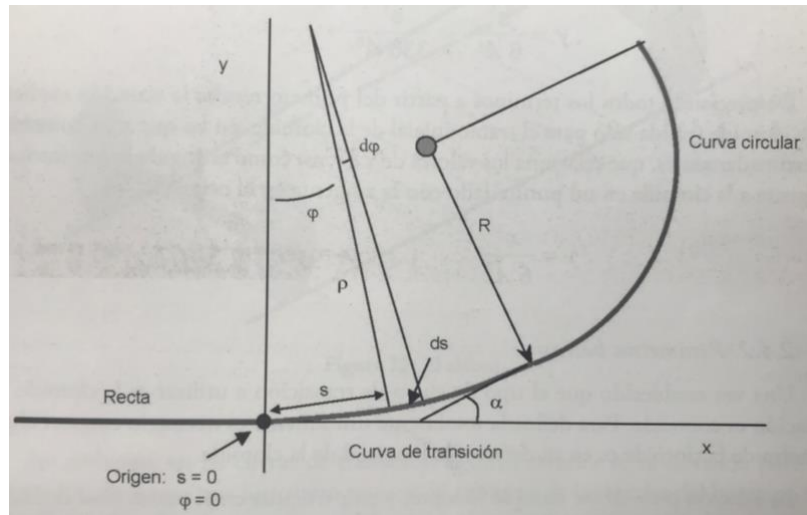


Figura 7. Definición de la clotoide.

PARÁMETROS BÁSICOS

Una vez conocida la ecuación que define la clotoide, debemos conocer el parámetro o la longitud de dicha curva de transición.

En el punto final de la clotoide, donde ésta es tangente a la curva circular, se cumple que en la ecuación $\rho \cdot s = A^2$, s es igual a la longitud de la clotoide (L) y ρ es el radio de la curva circular (R).

$$\rho \cdot s = A^2 \quad (24.1) \quad ; \quad R \cdot L = A^2 \quad (24.2)$$

Conociendo la longitud de la clotoide, podemos obtener el parámetro de ésta multiplicando dicha longitud por el radio de la curva circular.

En el método utilizado por la normativa de ADIF, para definir la clotoide se establecen una serie de limitaciones a su longitud, las cuales son las siguientes:

I. Máxima pendiente del diagrama de peraltes: $i(\text{mm/m})$:

Cuando un tren circula por una recta no existen problemas para la circulación, pues están en contacto con los carriles las cuatro ruedas que forman cada uno de los dos bogies de cada coche. Esto es debido a que en una recta los cuatro puntos de contacto son coplanarios. Por otra parte, cuando el tren comienza a circular por una curva de transición, las ruedas del carril exterior comienzan a elevarse debido al peralte. Al ocurrir esto, los dos ejes de los bogies no son paralelos, se torsionan de manera que unas ruedas se sobrecargan y otras se descargan. Esto es muy peligroso y se pueden producir descarrilamientos.

Para controlar esto, se limitará el alabeo. El alabeo es la distancia vertical que existe entre una rueda que se eleva y el plano que forman las otras tres de un bogie de dos ejes que siguen en contacto con el carril. De forma que se controlará la pendiente del diagrama de peraltes, haciendo que el peralte crezca de manera lenta y el carril exterior se eleve poco a poco.

Aplicaremos la siguiente fórmula:

$$i \left(\frac{\text{mm}}{\text{m}} \right) = \frac{H(\text{mm})}{L(\text{m})} \quad ; \quad L = \frac{H}{i} \quad (25)$$

Donde:

L = Longitud de la curva de transición (m);

H = Peralte de la curva (m);

i = Pendiente máxima del diagrama de peraltes;

La limitación se suele establecer en 0,6mm/m para líneas de alta velocidad y entre 1 y 3 mm/m en líneas convencionales.

II. Máxima variación del peralte: $u(\text{mm/s})$:

Los bogies, ejes y bastidores están unidos mediante las suspensiones. Debido a que éstas tienen que absorber el alabeo de la vía y no pueden hacerlo de manera instantánea, es decir, necesitan un tiempo de respuesta para adaptarse a la nueva situación, se debe establecer esta limitación para darle dicho tiempo a las suspensiones. Limitaremos el aumento del peralte por unidad de tiempo:

$$u = \frac{H}{t} = \frac{H}{L/V} ; \quad u \left(\frac{mm}{s} \right) = \frac{H(mm) V \left(\frac{m}{s} \right)}{L(m)} ; \quad L = \frac{H V}{u} \quad (26)$$

Este valor suele encontrarse entre 20 y 80 mm/s.

III. Máxima aceleración media vertical de elevación de entrada en la curva de transición: $P_v(m/s^2)$.

Cuando un tren inicia la entrada en una curva de transición se produce un ascenso del centro de gravedad. Este ascenso produce una aceleración vertical que puede ser molesta para el pasajero y debe limitarse. Esta aceleración P_v se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_v \left(\frac{m}{s^2} \right) = \frac{H(m) V^2 \left(\frac{m}{s} \right)}{L(m) B(m)} ; \quad L = \frac{H V^2}{P_v B} \quad (27)$$

Donde:

B = Distancia entre los ejes de los bogies (de 12 a 16m);

IV. Máxima variación de la insuficiencia de peralte: w (mm/s).

Para que los pasajeros no experimenten incrementos de aceleraciones transversales no compensadas bruscas debido a la insuficiencia de peralte, ésta debe incrementar de una manera suave desde el valor de la recta hasta el valor máximo de la curva correspondiente.

Este concepto es análogo a la máxima variación del peralte. En una curva con una insuficiencia de peralte H_i :

$$w = \frac{H_i}{t} = \frac{H_i}{\frac{L}{V}} ; w\left(\frac{mm}{s}\right) = \frac{H_i(mm) V\left(\frac{m}{s}\right)}{L(m)} ; L = \frac{H_i V}{w} \quad (28)$$

Este valor se suele situar entre 39 y 89 mm/s.

V. Coeficiente de calidad de una transición: ψ (m/s³):

El pasajero experimenta un cambio de una aceleración transversal nula en la recta a una aceleración transversal correspondiente a la curva. Este coeficiente de calidad garantizará que este aumento de aceleración se realice de manera gradual.

Este concepto es análogo a la máxima variación de la insuficiencia de peralte, donde sustituiremos la insuficiencia de peralte por la aceleración transversal no compensada.

$$\Psi = \frac{\alpha}{t} = \frac{\alpha}{\frac{L}{V}} ; \Psi\left(\frac{m}{s^3}\right) = \frac{\alpha\left(\frac{m}{s^2}\right) V\left(\frac{m}{s}\right)}{L(m)} ; L = \frac{\alpha V}{\Psi} \quad (29)$$

Donde:

α = Aceleración transversal sin compensar (m/s²);

El valor de coeficiente de calidad suele estar entre 0,22 y 0,5 m/s³.

IMPLANTACIÓN DE LAS CURVAS DE TRANSICIÓN

Cuando se diseña un trazado comenzamos por definir las alineaciones rectas y las curvas circulares. Seguidamente se definen entre ambos elementos las curvas de transición, que estarán determinadas por su longitud mínima, de forma que se cumplan las limitaciones establecidas por la norma.

Para introducir la curva de transición entre la alineación recta y la curva circular se establece un desplazamiento relativo entre ambos elementos, como se muestra en la Figura 8 (Fuente: CALVO, F., LORENTE, J., JURADO, R., DE OÑA, J. *Ingeniería de ferrocarriles*. Granada: Editorial Técnica AVICAM, 2015)

Para conseguir esto, se reduce el radio de la curva circular en un valor que llamaremos retranqueo ΔR :

$$\Delta R = \frac{L^2}{24 R} \quad (30)$$

Donde:

L = Longitud de la curva de transición (m);

R = Radio de la curva circular (m);

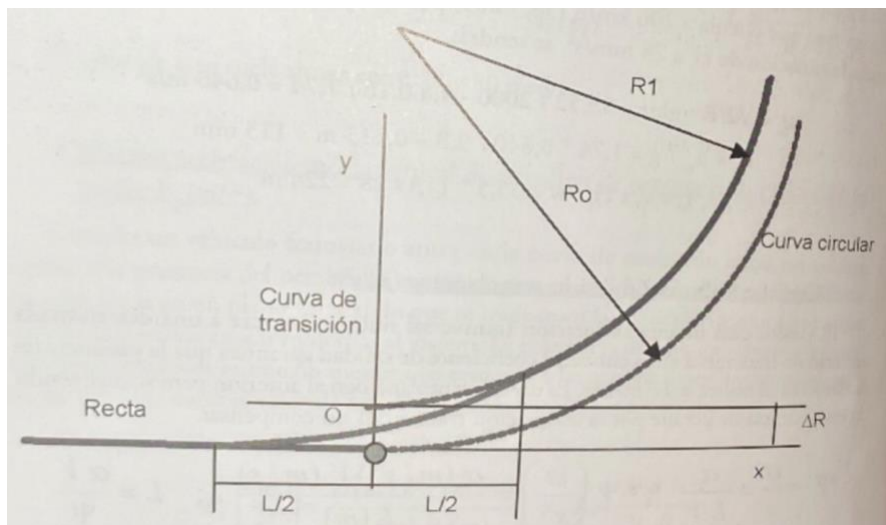


Figura 8. Implantación de una curva de transición.

1.1.3. Trazado en alzado.

En el perfil longitudinal se representa y relaciona bidimensionalmente la distancia recorrida s a lo largo del trazado en planta con la cota z que se mide en referencia a un plano de comparación.

1.1.3.1. Rasantes uniformes.

Son alineaciones rectas cuya inclinación es constante. Existen tres tipos:

- Horizontales.
- Rampas, son ascendentes en el sentido de circulación.
- Pendientes, son descendentes en el sentido de circulación.

Se establecen una serie de limitaciones a la inclinación de las rasantes que están asociadas a la adherencia de la rueda con el carril, donde se limita la inclinación a 70‰, o a la potencia de los vehículo, que en este caso se limita la inclinación al 50‰. En caso de que el tráfico sea de mercancías y pasajeros se suele limitar al 20‰. En líneas de velocidad de proyecto mayor de 200 km/h con tráfico mixto se debe limitar la inclinación a las 15 milésimas.

1.1.3.2. Acuerdos verticales.

Son elementos circulares que enlazan las alineaciones rectas de distintas inclinaciones y que son tangentes a ellas.

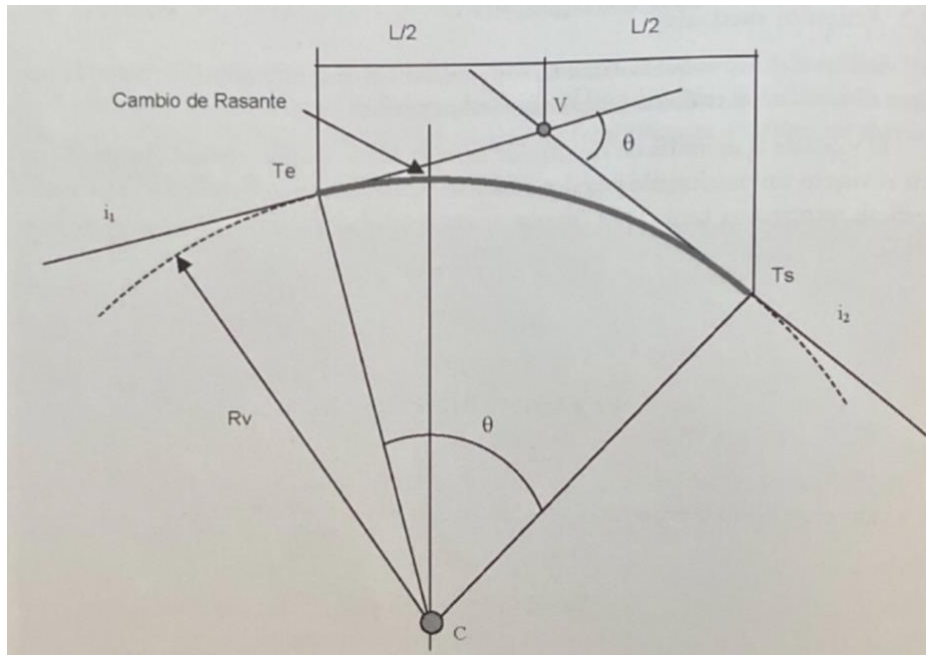
La máxima aceleración vertical soportada por el viajero limitará el valor de R. En un tren que circula a una velocidad V por un acuerdo de radio R, aparecerá una aceleración centrífuga vertical:

$$\alpha = \frac{V^2}{R} \quad (31)$$

Los valores máximos para la aceleración vertical que son capaces de soportar los viajeros son:

- $\alpha < 0,3 \text{ m/s}^2$ En líneas antiguas ya construidas.
- $\alpha < 0,2 \text{ m/s}^2$ En líneas de nueva construcción, que en algunas excepciones se puede considerar $0,3 \text{ m/s}^2$

Por estas limitaciones los radios mínimos de los acuerdos verticales son 25000 m en casos normales y 10000 m en excepciones.



Fuente: CALVO, F., LORENTE, J., JURADO, R., DE OÑA, J. *Ingeniería de ferrocarriles*. Granada: Editorial Técnica AVICAM, 2015.

Figura 9. Acuerdos verticales

La inclinación de las rasantes de la Figura 9 se representan como i_1 e i_2 . El ángulo que forman ambas rasantes será:

$$\theta = |i_2 - i_1| \quad (32)$$

La longitud del acuerdo será:

$$L = \theta \cdot R = (i_2 - i_1) \cdot R \quad (33)$$

Se establece un sistema de coordenadas con origen en la tangente de entrada, las coordenadas del centro de la circunferencia respecto a la tangente de entrada son:

$$x_c = i_1 \cdot R \quad (34)$$

$$y_c = R \cdot \sqrt{1 - i_1^2} \quad (35)$$

Las coordenadas del punto de cambio de rasante en este mismo sistema son:

$$x_{pa} = i_1 \cdot R \quad (36)$$

$$y_{pa} = R \cdot \left(1 - \sqrt{1 - i_1^2}\right) \quad (37)$$

Y la coordenada y para cada coordenada x de un punto cualquiera en el mismo sistema anterior será:

$$y = \sqrt{R^2 - (i_1 \cdot R - x)^2} - R \cdot \sqrt{1 - i_1^2} \quad (38)$$

1.2. LA VÍA FERROVIARIA

1.2.1. Características de la vía

Las características de la vía son el resultado de las relaciones de los distintos materiales que componen el sistema ferroviario. Entre ellas podemos destacar las mas importantes:

- i. Contacto acero-acero en la rodadura. En la forma convencional del ferrocarril las ruedas también son de acero y esto hace que tenga una serie de características de las que podemos destacar ventajas y desventajas.
- ii. Elasticidad. Es necesario que la vía sea flexible para poder amortiguar los impactos de los trenes debido a las irregularidades de la vía. Estos circulan a velocidades muy altas y tienen un gran peso, además de ser rígidos.
- iii. Robustez. La carga que se produce por eje del ferrocarril es muy elevada, por tanto la vía debe ser resistente para aguantar estas cargas.
- iv. Continuidad geométrica en alzado y planta. Si existen problemas de continuidad en la vía aparecen aceleraciones tanto horizontales como verticales que hacen que la carga dinámica aumente. Se deben controlar los siguientes parámetros para asegurar la continuidad de la vía:
 - Ancho de vía: se define como la distancia que existe entre las caras internas de las cabezas de la vía. Ésta se mide 14mm por debajo de la superficie de rodadura.
 - Alabeo de la vía: definido en capítulos anteriores como la distancia vertical que existen entre uno de los puntos de apoyo (de los cuatro que forman un bogie de dos ejes) y el plano que forman los otros tres. Este alabeo solo debería existir en las curvas de transición, donde comienza a elevarse el carril exterior debido al peralte.
 - Nivelación transversal: se define como la distancia o diferencia de cota que existe entre los planos de rodadura de los dos carriles que forman una vía en un plano normal al eje de esta.
 - Nivelación longitudinal: define la cota de la superficie de rodadura de un hilo de la vía ferroviaria referida a un plano de comparación.
 - Alineación: también conocido como flechas, la alineación teórica de la vía viene definida por la proyección horizontal del hilo director definido por el replanteo o el proyecto. Si llevamos un ancho de vía a un lado de dicho hilo obtenemos la alineación teórica del otro hilo.

Debido a que estos parámetros se deben controlar para el buen funcionamiento de la vía, en la Tabla 1 se recogen los valores máximos admisibles con una precisión de milímetros.

Fuente: normativa ADIF.

Tabla 1. Valores máximos admisibles para líneas nuevas y convencionales, dependen de niveles de calidad geométrica y longitudes de onda determinadas.

Parámetro	Valor máximo
Ancho de vía	-2 mm y +8 mm
Alabeo de la vía	3,5 mm/m
Nivelación transversal	12 mm
Nivelación longitudinal	12 mm
Alineación (flechas)	13 mm

1.2.2. La vía convencional

Ésta se compone de los siguientes elementos: carriles, sujeciones, traviesas y capas de apoyo. Sus funciones son las de dar soporte y guiar los trenes.



Fuente: Ferropedia.

Figura 10. Vía convencional de balasto.

EL CARRIL

Este elemento se encarga del guiado del tren. Recibe, absorbe y transmite de forma minorada las cargas hacia los elementos inferiores. En algunos diseños también sirve para conducir la corriente eléctrica.

LAS SUJECIONES

Su función es mantener unidos los carriles a las traviesas. Mantienen la geometría de la vía, ya que impiden el movimiento del carril respecto de la traviesa.

LAS TRAVIESAS

Reciben las cargas que les transmiten los carriles, las absorbe y las vuelve a transmitir a las capas de apoyo. Pueden ser de madera o de hormigón y también tienen la función de mantener la geometría de la vía al igual que las sujeciones.

EL BALASTO

Es una capa formada normalmente por árido de machaqueo de naturaleza silíceo, es angulosa y muy dura. Es el gran responsable de darle la elasticidad vertical a la vía, por las cargas se transmiten de manera muy minorada a las capas inferiores. Su espesor mínimo bajo las traviesas es de 30 cm. El balasto tiene función drenante y permite que la vía quede empotrada por medio de las traviesas.

EL SUBBALASTO

Da forma a la capa mas inferior de la superestructura. Ésta se encarga de evitar el punzonamiento de la plataforma por parte del balasto y a su vez protege al balasto de los finos procedentes de la plataforma que pueden contaminarlo. Tiene un espesor mínimo de 15 cm y transmite las cargas de la vía a la plataforma.

ANTICONTAMINANTE

En ocasiones los materiales de la plataforma son de muy mala calidad, es decir, tienen un alto contenido de finos, entonces es necesario instalar un anticontaminante, que suele ser geotextil, entre el subbalasto y la última tongada de la plataforma.

1.2.3. La vía en placa

Debido a que con el paso del tiempo al ferrocarril se le ha ido exigiendo mayores cargas transportadas a su vez a mayores velocidades, ha sido necesario desarrollar un sistema que le de mayor rigidez sin que aumenten los costes de mantenimiento. Este sistema de vía se llama vía en placa y se basa en sustituir el balasto por una losa de hormigón armado, que puede ser prefabricada o in situ.



Fuente: construblogspain.wordpress.com.

Figura 11. Hormigonado de vía en placa con encofrado deslizante.

Los demás elementos son muy similares a los de la vía convencional. Las traviesas son de hormigón, con la salvedad de que por norma general se usan bloques que al hormigonar quedan hechos una pieza. Además, aparece un elemento extra entre la traviesa y la losa que le da mayor flexibilidad al conjunto. Este elemento, que es un elastómero distinto al usado en vías en balasto, es el responsable de aportar flexibilidad a la vía en placa.

Cuando se quiere reducir el mantenimiento en lugares como los túneles, viaductos o estaciones, lo normal es usar vía en placa, donde suele ser imposible realizar operaciones de bateo.

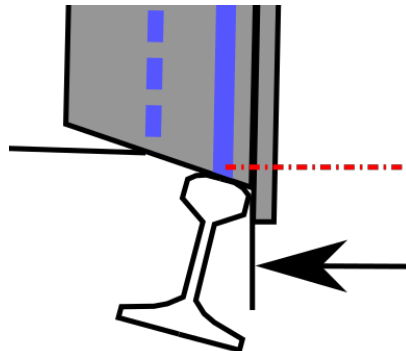
1.2.4. Interacción entre la vía y el vehículo

No solo existe una responsabilidad por parte de los materiales de la vía y el vehículo en la interacción entre estos, sino que también influye la geometría en esta interacción. Estos efectos en la interacción del vehículo con la vía asociados a la geometría de ésta son los siguientes:

1.2.4.1. Inclinación de los carriles (γ).

Para aumentar la estabilidad de los trenes, reducir el desgaste de las ruedas y los carriles y evitar descarrilamientos, los carriles se suelen colocar con una inclinación de $\gamma = 1/20$ (5%). Como las ruedas son troncocónicas con un ángulo de conicidad equivalente de

1/20 o 1/40 mejoramos el contacto entre rueda y carril. Además, al inclinar los carriles conseguimos una componente horizontal que ayuda a la estabilidad.



Fuente: Ferropedia.

Figura 12. Inclinación del carril y conicidad de la rueda.

1.2.4.2. Juego de la vía (j).

Lo definimos como la diferencia que hay entre el ancho de la vía y la distancia entre los extremos de las pestañas medida a 10 mm por debajo del plano de rodadura. Este juego de la vía permite que el eje se pueda desplazar lateralmente en las curvas y para que no exista un contacto continuo entre las pestañas y los carriles. De modo que en las curvas el juego de la vía será mayor que en rectas.

1.2.4.3. El eje montado.

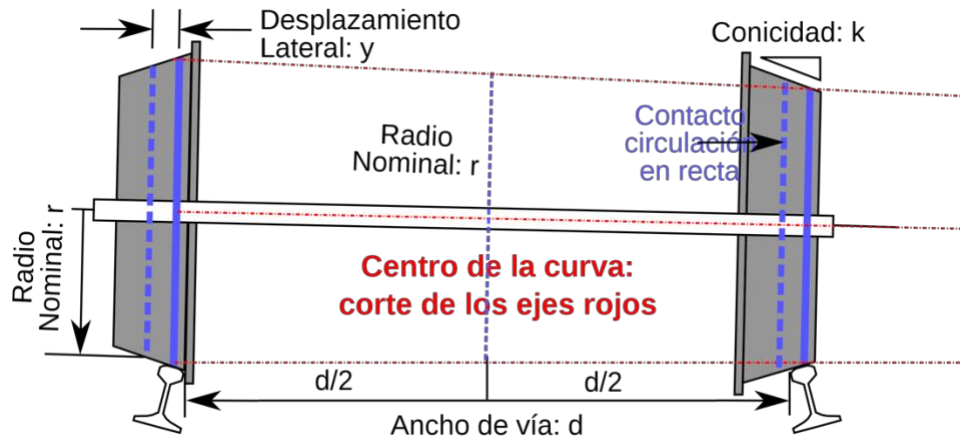
Existe una problemática en los ejes al paso por las curvas. Esta consiste en que el eje con las ruedas forman un único bloque para que así sean más resistentes. Pero cuando el eje pasa por una curva, la rueda del carril interior recorre menos distancia que la rueda del carril exterior, mientras que el número de vueltas es el mismo en ambas ruedas.

Las ruedas tienen un radio medio de 0,5 m, pero son troncocónicas con una conicidad equivalente de 1/20. Esta conicidad permite que cuando el eje pase por una curva se desplace hacia el exterior debido a la fuerza centrífuga. Cuando el eje se desplaza, cada rueda adopta un diámetro distinto que equilibra la distancia recorrida de cada rueda.

1.2.4.4. El movimiento de lazo.

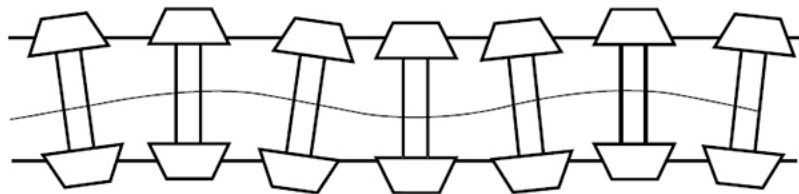
Cuando un tren circula por una recta el apoyo de las ruedas se encuentra en su punto de equilibrio, es decir, en su radio nominal. Pero cuando el tren pasa por una irregularidad o sale de una curva, las ruedas no se encuentran apoyadas en su punto de

equilibrio. Por tanto, se produce un movimiento oscilatorio del eje con una trayectoria senoidal para recuperar este equilibrio. Este movimiento es el que se conoce como movimiento de lazo.



Fuente: Ferropedia.

Figura 13. Movimiento de lazo.



Fuente: Escuela Abierta de Ingeniería y Construcción (EADIC).

Figura 14. Movimiento de lazo.

1.2.5. El ancho de vía

Se define cómo la distancia que existe entre las caras interiores de las cabezas de los carriles medida 15 mm¹ por debajo del plano de rodadura. Existe una variedad de anchos de vía en España que se han ido estableciendo a lo largo de la historia con las construcciones de cada línea. Estos son los siguientes (sin tener en cuenta los anchos de vía mineros, industriales, tranvías, etc.):

¹ Normativa ADIF NAV 7-3-2.0, 1ª Edición Febrero de 1983. En otras publicaciones puede haber discrepancias en esta medida, pudiéndose considerar 14 mm.

- Ancho ibérico: con un ancho de $A = 1.668$ mm, está implantado en las líneas de ferrocarril convencionales de Portugal y España.
- Ancho UIC: es el ancho internacional o estándar. $A = 1.435$ mm. Está implantado en casi el 70% de las líneas mundiales. En España está establecido en los metros de Barcelona y Madrid, y la alta velocidad se está construyendo en este ancho para poder integrarla en la red europea.
- Vía estrecha: Todos aquellos anchos que sean inferiores al ancho internacional se consideran vía estrecha. El más común es el ancho de vía métrica, $A = 1.000$ mm. En España el ancho métrico es el que predomina en la red de vía estrecha, aunque España contó con mas de 5000 km de líneas con ancho de vía inferior al ibérico (1.220, 914, 750, 600 mm, etc.).

1.3. EL CARRIL

Es el elemento que define el camino ferroviario. Es imprescindible analizar sus funciones, características y comportamiento.

1.3.1. Funciones

Éstas son las siguientes:

- i. Absorbe, resiste y transmite los esfuerzos recibidos por el tren y los esfuerzos térmicos a los elementos inmediatamente inferiores, las traviesas. Los esfuerzos pueden ser de tres tipos:
 - Verticales: producidos por las cargas estáticas (peso del material), cargas cuasi-estáticas (producidas por la fuerza centrífuga) y cargas dinámicas (producidas por el movimiento de los vehículos).
 - Transversales: son los producidos por la fuerza centrífuga y el movimiento de lazo.
 - Longitudinales: son los esfuerzos debido al arranque y frenado de los trenes y también son los debidos a los esfuerzos térmicos.
- ii. Es el responsable de guiar el material móvil.
- iii. En líneas electrificadas, conduce la la corriente eléctrica de tracción de retorno a las subestaciones.

- iv. Conduce las corrientes responsables del sistema de control del tráfico y la señalización.

1.3.2. Material

Históricamente los carriles se comenzaron a construir en hierro, pero sufrían deformaciones y desgastes muy grandes. Por ello, a partir de 1870 se comenzaron a fabricar en acero, limitando su composición química para que el contenido de C, Mn y S no superase el 0,9%. Esta limitación es fundamental si queremos que los carriles no sean frágiles y difíciles de soldar. La tensión de rotura se encontrará entre 7000 kg/cm² y 9000 kg/cm².

Durante el proceso de fabricación de los carriles, independientemente del sistema de fabricación elegido, que debe de ser cuidado al detalle, se deberán de exigir las siguientes características fundamentales:

- Uniformidad en la composición química.
- Ausencia de aire o escorias.
- Alta resistencia a la abrasión y a los golpes.
- Alta capacidad soldable.

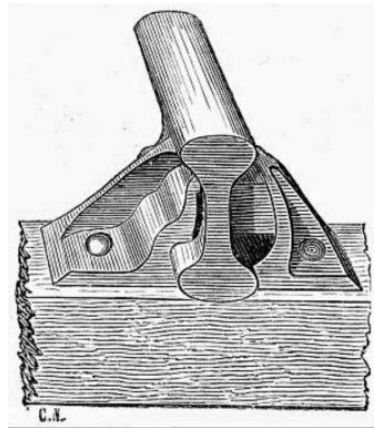
1.3.3. Forma

Aunque antiguamente existieron carriles de sección variable fabricados con hierro. Pero debido a que eran difíciles de construir y que el hierro presentaba la problemática anteriormente comentada, se dejaron de utilizar.

Posteriormente se impuso el carril de sección constante. Su fabricación era más simple y el desarrollo del proceso de laminación avanzó muchísimo. Ya que las principales cargas que sufre este elemento son verticales, podría intuirse que la sección más indicada sea la de doble T. Por tanto podemos estudiar los siguientes tipos de carriles de sección constante:

CARRIL DE DOBLE CABEZA

También conocido como Bull-Head, fue un carril diseñado con la idea de poder reutilizarlo dándole la vuelta tras el desgaste de la cabeza superior. Esta idea no era posible ya que las deformaciones y desgastes generados en la parte inferior por las sujeciones no lo permitía. Fue muy usado en Reino Unido, Francia y Suiza, pero ya dejó de utilizarse.

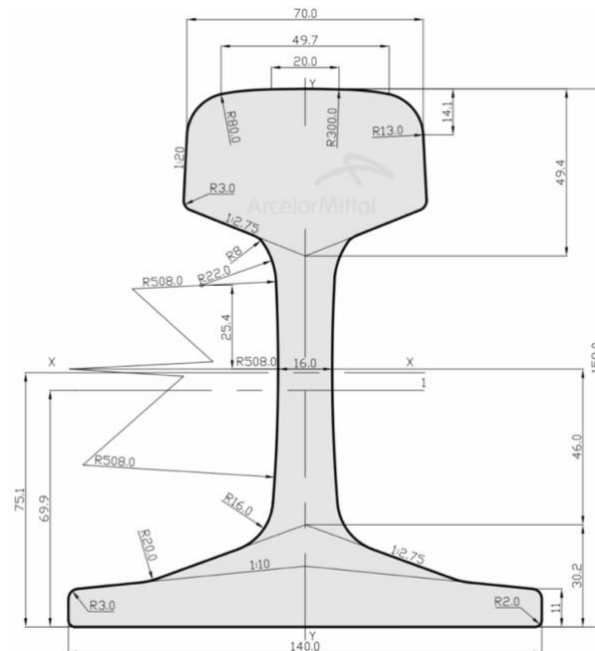


Fuente: railstory.com.

Figura en 15. Carril de doble cabeza o Bull-Head.

CARRIL VIGNOLE

Es el carril más utilizado en el mundo y fue introducido en Europa por el ingeniero Charles Blacker Vignoles. Se puede asimilar a una viga de doble T, pero el carril se diferencia en que en la parte superior es mas grueso para resistir las cargas, mientras que la parte inferior es más ancha y plana para darle estabilidad y facilidad para repartir las cargas.



Fuente: General rail catalogue, Arcelor Mittal.

Figura 16. Carril Vignole UIC-54-E1.

En los carriles tipo Vignole diferenciamos tres partes: cabeza, alma y patín:

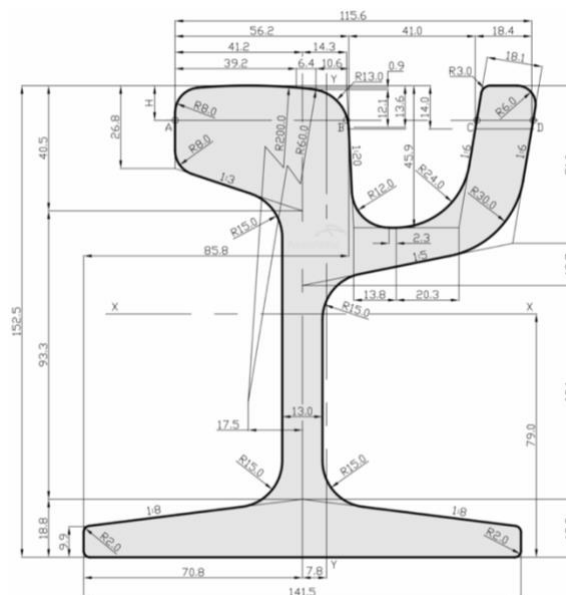
La *cabeza* es la encargada de entrar en contacto con las ruedas de los coches y locomotoras y cumple la función de superficie de rodadura. La cara superior se denomina tabla de rodadura y permite que las ruedas se apoyen; la cara interior guía las ruedas. La tabla de rodadura se fabricará conforme a una superficie circular con radio 300 mm, inversa a la curva del perfil de desgaste que se genera por la plastificación del carril. De esta forma se alarga la vida útil del carril.

La característica propia del *alma* es su espesor, éste debe ser tal que soporte los esfuerzos cortantes que producen las ruedas al apoyarse así como el desgaste producido por la corrosión. En el alma se realizan unos taladros para atornillar las bridas en las juntas entre dos carriles.

La característica principal del *patín* es la anchura, forma y espesor de las alas. Esto hace que la resistencia del carril al vuelco sea mayor, y que el reparto de cargas a la traviesa sea más equilibrado.

CARRIL DE GARGANTA

Su mayor ventaja es que va embebido en el pavimento sin que sobresalga de éste. Esto lo hace idóneo en tranvía, donde el tráfico puede circular por encima sin problema. Se usa también en puertos, estaciones intermodales, etc.



Fuente: General rail catalogue, Arcelor Mittal.

Figura 17. Carril de garganta 41-GPU (54R2).

1.3.4. Peso

El peso del carril nos define sus características resistentes, por ello este parámetro es fundamental. Cuanto mayor sea el peso mayor será su resistencia a las cargas y además su vida útil será mas elevada, pues la sección también tiene mayores dimensiones. En su denominación encontramos el peso por metro lineal, es decir, un carril UIC-54 tiene un peso de 54 kg/m.

1.3.5. Comportamiento tensional del carril

Debido a los distintos orígenes de las tensiones que soporta el carril, su comportamiento será complejo. Los orígenes de estas tensiones pueden ser:

- Tensiones de flexión que se originan al deformarse la vía por el paso del material móvil.
- En la zona de contacto entre la llanta y el carril se producen tensiones elevadas que provocan una zona de contacto aproximadamente elíptica de escasos cm^2 donde el material ha plastificado.
- Tensiones tangenciales que se concentran en el alma y que son debidas a la carga puntual que ejercen las ruedas.
- Tensiones de origen térmico.
- Tensiones que aparecen posteriormente al proceso de fabricación.
- Tensiones del carril debidas a una curva, donde éste tiene que deformarse para adaptarse a la misma.

1.4. LAS TRAVIESAS

1.4.1. Funciones

1.4.1.1. Traviesas.

Las traviesas se colocan con una separación de 0,6 m normalmente. Esto quiere decir que cada km de vía cuenta con 1666 traviesas. Sus funciones las podemos describir a continuación:

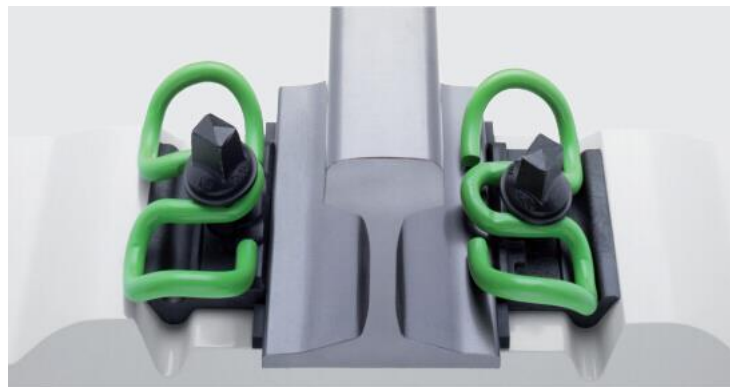
- Dan soporte a los carriles, de esta manera absorben, minoran y transmiten las cargas al balasto
- Aseguran en todo momento que el ancho de vía se mantiene, proporcionando, además, la inclinación de 1/20 que tienen los carriles hacia el interior. En las traviesas, los carriles encajan en unos huecos que le dan esta inclinación.

- Gracias al peso de la vía, se consigue arriostrar la vía en los sentidos vertical y horizontal.
- Aíslan eléctricamente para evitar que la energía eléctrica que circula por los carriles se derive a tierra.

1.4.1.2. Sujeciones.

Las sujeciones son los elementos encargados de mantener las traviesas y los carriles unidos. De forma que, absorben y transmiten los esfuerzos de los carriles a las vías. Por tanto, su misión es mantener apretado en todo momento el carril a la traviesa para que no se produzcan movimientos de uno respecto al otro.

Debido a que el número de sujeciones que se ponen a lo largo de la vía son más de 6000 por km (Producto de multiplicar el número de traviesas por el número de sujeciones por traviesa, que son 4, 2 por cada carril y traviesa), éstas deben ser simples, fáciles de instalar y de fabricar. Es muy importante el papel que juegan las sujeciones, ya que éstas deben garantizar que el carril no se deslice debido a las variaciones de longitud de la barra larga soldada por los incrementos de temperatura. Esto se garantiza con un par de apriete mínimo, que no debe parar los 150 N·m, para así evitar la rotura de la traviesa.



Fuente: Suzhou Zhongyue Railway Material Co.,Ltd.

Figura 18. Sistema altamente elástico W21 HS Vossloh.

1.4.2. Tipos de traviesas y sujeciones

1.4.2.1. Traviesas.

Se clasifican según el material del que estén construidas, existiendo los siguientes tipos:

- Traviesas metálicas.
- Traviesas de madera.

- Traviesas de hormigón armado.
- Traviesas de hormigón pretensado.

1.4.2.2. Sujeciones.

En cuanto a las sujeciones, éstas han ido evolucionando al mismo tiempo que lo hacían los tipos de traviesas para conseguir un resultado del conjunto. Podemos clasificarlos de tres maneras, en función del tipo de anclaje a la traviesa:

- Directa: El anclaje que une la traviesa con el carril es el mismo que proporciona el apriete del carril.
- Indirecta: El carril se fija primero a una placa mediante un elemento de anclaje. Esta placa a su vez está fijada a la traviesa mediante otro elemento de anclaje distinto. De esta manera se aumenta la superficie de contacto del carril con la traviesa, ya que la placa suele ser más ancha que el patín del carril.
- Mixta: La placa sobre la que está fijada el carril está anclada a la traviesa mediante elementos de anclaje. El carril se encuentra anclado mediante elementos de anclaje independientes tanto a la placa cómo a la traviesa.

Además, las sujeciones se pueden dividir en elásticas o rígidas, en función de si permiten pequeños movimientos verticales con deformaciones elásticas.

1.5. LA CONTINUIDAD DE LA VÍA

1.5.1. Las vías con juntas

La separación entre dos carriles, denominada junta, constituyen el punto débil de la vía, ya que en ella se producen esfuerzos dinámicos muy fuertes por el choque de las ruedas al pasar de un carril a otro.



Fuente: Ferropedia.

Figura 19. Junta de carril con sujeción rígida.

Los choques de las ruedas con los carriles hacen que se produzcan deterioros excesivos en los carriles o elementos de unión, roturas, pérdidas de alineación o aceleraciones incómodas para los viajeros.

1.5.1.1. El embridaje.

Es el conjunto de elementos que une físicamente los extremos de los carriles, de manera que se garantiza la continuidad de la vía. El embridaje está integrado por los siguientes elementos:

- Las bridas: es el elemento principal de la unión. Son dos piezas metálicas con forma alargada que se atornillan al alma de los carriles.
- Tornillos: lo normal es que se atornillen con cuatro tornillos.
- Tuercas y arandelas.
- Forros: se pueden introducir entre la brida y el alma del carril para mejorar la unión.
- Elementos de conexión o aislamiento: para garantizar la continuidad de la corriente eléctrica que circula por los carriles, se sueldan unos cables de cobre al alma de los carriles. Si por el contrario lo que queremos es aislar, se interponen unos elementos de madera o plástico entre bridas, carriles y cama.

1.5.1.2. El apoyo de las juntas.

Existe una problemática en el apoyo de las juntas sobre el balasto, ya que las inestabilidades que en ellas se producen se pueden transmitir capas abajo. Por tanto, los tipos de apoyos que existen son los siguientes:

- Junta apoyada simple: las dos cabezas de los carriles se apoyan sobre la misma traviesa.
- Junta suspendida: la junta queda entre dos traviesas contiguas. Se producen grandes deformaciones por flexión.
- Junta doblemente apoyada: es el apoyo más rígido y el que tiene un mejor comportamiento. Cada cabeza de los carriles descansa en una traviesa distinta.

1.5.2. Las vías sin juntas

Existe la posibilidad de eliminar las juntas. Éstas son el punto débil de la vía causando problemas tanto en la superestructura como en el material móvil y los viajeros.

Pero no ha sido hasta hace poco cuando se ha conseguido el nivel tecnológico adecuado para conseguir esto. Los grandes problemas de dilatación junto con la debilidad de la soldadura y lo poco pesado que eran los carriles hacían que antiguamente existiese miedo a la implantación del carril continuo soldado.

El problema desapareció cuando se consiguió una vía tan robusta que no permitía la dilatación. Aparecieron unas nuevas sujeciones que transmiten las fuerzas de dilatación de los carriles a las traviesas.

1.5.2.1. Los aparatos de dilatación.

Aunque lo deseable es que la vía esté soldada en toda su longitud, esto no es posible, ya que hay puntos en los que la vía en barra larga soldada se interrumpe por alguna de las siguientes razones:

- Comienza un tramo de vía sin soldar.
- Presencia de algún aparato de vía que no permite las tensiones que se transmiten en la barra larga soldada.
- En los puentes, ya sean de hormigón o metálicos, para así evitar tensiones excesivas en los carriles.

Puesto que los movimientos en los extremos de la vía en BLS llegan a ser importantes, es necesario instalar unos aparatos de dilatación que permitan estos movimientos longitudinales del carril.



Fuente: comofuncionanlostrenes.blogspot.com

Figura 20. Aparato de dilatación en la estación de Pinar de las Rozas (Madrid)

CAPÍTULO II: SEMEJANZA DINÁMICA Y ANÁLISIS DIMENSIONAL

2.1. INTRODUCCIÓN

Antes de entrar en materia con la proyección del trazado de la vía, es necesario realizar una semejanza dinámica, pues el trazado geométrico debe ajustarse a una serie de limitaciones que vienen dadas por las aceleraciones a las que el vehículo se va a ver sometido. Este modelo a escala debe ser semejante, tanto geométricamente como dinámicamente, a uno real. Para conocer el trabajo realizado en este TFG, es necesario introducir el análisis dimensional desde la mecánica de fluidos.

2.1.1. Prototipos y modelos

Son muy pocos los problemas que pueden ser resueltos con exactitud mediante métodos analíticos. En la mecánica de fluidos ha sido siempre muy importante el estudio de los resultados experimentales que, combinados con las ecuaciones analíticas pueden dar una respuesta más precisa al problema en estudio.

Debido a que la experimentación con prototipos es económicamente cara o puede llegar a ser físicamente imposible por problemas de espacio, lo normal es trabajar con modelos a escala en un laboratorio.

Para que el modelo a escala sea una copia fiel al prototipo es necesario que se reúnan dos requisitos indispensables: similitud geométrica y similitud dinámica.

2.1.1.1. Similitud geométrica.

Debe existir un factor de longitud idéntico para todas las dimensiones del espacio. Es decir, todas las longitudes se tienen que reducir o aumentar con igual proporción. De tal forma que el modelo y el prototipo deben estar relacionados en x, y, z de la siguiente manera.

$$\frac{X_m}{X_p} = \lambda \quad \frac{Y_m}{Y_p} = \lambda \quad \frac{Z_m}{Z_p} = \lambda \quad (39)$$

Donde:

m = Subíndice del modelo;

p = Subíndice del prototipo;

λ = Factor de escala;

2.1.1.2. Similitud dinámica.

Para que el comportamiento se corresponda entre el modelo y el prototipo, es necesario que no sólo haya una similitud geométrica, sino que además exista una similitud dinámica.

Un modelo de un puente no se comporta igual ante una carga lateral de viento que un prototipo aunque tengan relación geométrica, por ello es necesaria esta similitud dinámica. Es decir, debe existir además una relación fija entre las fuerzas, velocidades, aceleraciones, etc.

Para ello se establecen uno o varios parámetros adimensionales que relacionan todas las variables que intervienen en nuestro problema.

2.1.2. Análisis dimensional

Es sabido en Física que las magnitudes tienen dimensiones. Fourier decía que cada magnitud tiene una dimensión que le es propia, y que por ello, las ecuaciones deben de ser homogéneas dimensionalmente hablando. Esta es la idea fundamental del Análisis Dimensional. Es decir, el Análisis Dimensional es el encargado de ocuparse de los conceptos de magnitud, dimensión y homogeneidad de las ecuaciones físicas.

Dicho Análisis tiene como aplicación las siguientes:

- Detectar errores de cálculo.
- Resolver problemas en los cuales la solución directa es difícil matemáticamente hablando, como ocurre en mecánica de fluidos.
- Estudio de modelos reducidos, como es nuestro caso o como ocurre en los conocidos túneles de viento.
- Considerar cambios en los modelos, tanto reales como imaginarios.

Debe existir una invarianza en las leyes físicas independientemente del sistema de unidades elegido. Dicha invarianza hace que la función que defina una ley física debe ser homogénea dimensionalmente y matemáticamente hablando.

2.1.2.1. Homogeneidad dimensional.

Si todos los sumandos de una ecuación física tienen la misma dimensión, hablaremos de homogeneidad dimensional.

Si en la ecuación $A + B = C$ los términos tienen la misma dimensión y decidimos elegir otro sistema de unidades de forma que la medida de A se duplique, obteniendo $A' = 2A$, todos los demás términos deben responder a la misma ecuación de dimensiones. De modo que B y C deben duplicarse, así la ley se seguirá cumpliendo,

$$2A + 2B = 2C \quad \rightarrow \quad A' + B' = C' \quad (40)$$

2.1.2.2. Homogeneidad matemática.

Sea una función,

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (41)$$

diremos que es homogénea matemáticamente hablando si

$$f(\lambda_1 x_1, \lambda_2 x_2, \dots, \lambda_n x_n) = 0 \quad (42)$$

Veamos cómo una ecuación física debe ser homogénea matemáticamente.

Sea la función (41) representativa de una ley física donde intervienen $x_1, x_2, \dots, x_n$ todas ellas con un sistema de unidades coherente. Al usar otro sistema de unidades cuyos factores de cambio sean

$$\lambda_i = \frac{x_i}{x_i} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n \quad (43)$$

La ecuación (41) se transforma en

$$f(\lambda_1 x'_1, \lambda_2 x'_2, \dots, \lambda_n x'_n) = 0 \quad (44)$$

Pero, si representamos $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ una ley física universal, debe existir una invarianza frente a cambios de sistemas de unidades y cumplirse que

$$f(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) = 0 \quad (45)$$

Siendo evidente, de las funciones (44) y (45), que f es una función homogénea matemáticamente hablando.

2.1.3. Teorema Pi de Buckingham

Cuando tenemos un problema en ingeniería donde deseamos conocer el comportamiento de flujo y sus fuerzas aplicadas, a través de un experimento, se necesita definir un número considerable de pruebas. Pero, existe una herramienta que, permite agrupar en parámetros dimensionales, las distintas variables que intervienen en nuestro problema. Esta herramienta se denomina Teorema Pi de Buckingham.

En detalle, existen un conjunto de magnitudes físicas dependientes (n) que se expresan en función de otras magnitudes independientes (k). Por tanto, la ecuación original que relaciona dichas magnitudes físicas puede ser sustituida por otra equivalente formada por $n - k$ parámetros adimensionales.

Las etapas de este teorema son:

1. Se hace una lista con los parámetros involucrados.
2. Se seleccionan las dimensiones básicas (MLt).
3. Se representan los parámetros en función de sus dimensiones básicas.
4. Se seleccionan de la lista del paso 1 un número de parámetros igual al número de dimensiones básicas ($k = 3$)

5. Se combinan los parámetros que hemos seleccionado para formar los números adimensionales.
6. Se comprueba que los números Pi obtenidos son adimensionales.

2.2. CASO DE ESTUDIO

Ante la necesidad de crear un modelo de vía ferroviaria para ensayos de laboratorio, es necesario estudiar la semejanza dinámica y geométrica de nuestros modelos y prototipos. Puesto que existe un compromiso entre la vía y el vehículo, debemos priorizar al vehículo a la hora de determinar los factores de escala ya que en éste vamos a tener un mayor número de variables de estudio.

Debemos fijar un número de magnitudes físicas independientes, en nuestro caso $k=3$ y aunque no deseamos obtener una ecuación de comportamiento, de esta manera nuestro sistema quedaría definido. A partir de estas magnitudes físicas independientes obtendremos el resto de las variables que intervienen en nuestro problema y que nos garantizaran la semejanza geométrica y dinámica de nuestro ensayo. Para fijar estos factores es necesario conocer con que elementos físicos estamos trabajando, es decir, nuestra vía y nuestro vehículo.

2.2.1. Factor de longitud

Existe una gran cultura de modelismo tripulado alrededor del mundo. Al igual que en la realidad, los anchos en el modelismo tripulado cambian de unas zonas a otras, encontrándonos así ante un catálogo bastante amplio de anchos de vía. Puesto que el vehículo que vamos a usar ya ha sido construido y utilizado en el Parque del Alamillo (Sevilla), éste se diseñó pensando en el ancho de vía instalado en este parque, es decir, 5 pulgadas. Por tanto, en nuestro modelo de vía deberemos instalar un ancho de vía de 5 pulgadas o 127 mm.

He aquí la forma de establecer el primer factor. Usando cómo ancho de vía real el internacional, 1435mm, podemos establecer la relación que nos defina el factor de longitud.

$$f_l = \frac{x_p}{x_m} = \frac{1435 \text{ mm}}{127 \text{ mm}} = 11,3. \quad (46)$$

Lo cual quiere decir que en el prototipo las longitudes serán 11,3 veces mayores que en el modelo.

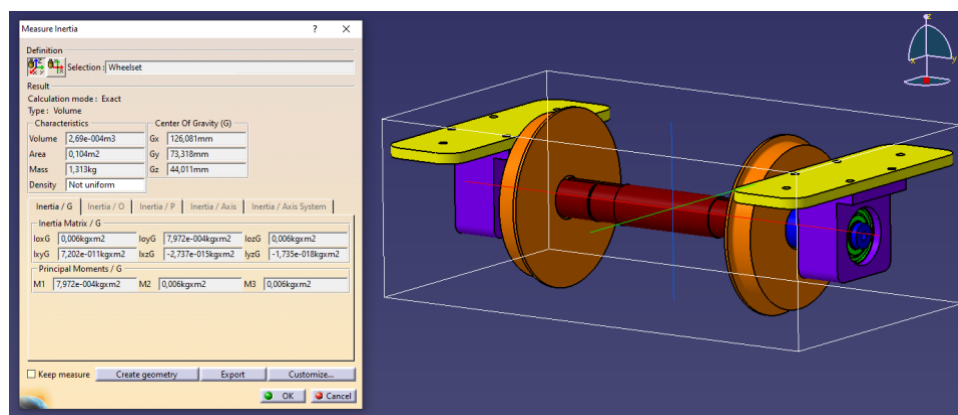
2.2.2. Factor de velocidad

El vehículo prototipo usado es el ML95, Metrô-Ligero (en portugués) y fabricado en el año 1995 por Sorefame/Bombardier. La velocidad máxima que alcanza el modelo del vehículo es de 2,5 m/s frente a los 108 km/h (30 m/s) aproximadamente que alcanza el vehículo ML95. De manera que el factor de velocidad quedaría de la siguiente manera:

$$f_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{30 \text{ m/s}}{2,5 \text{ m/s}} = 12. \quad (47)$$

2.2.3. Factor de masa

Una vez establecido el factor de escala de longitud podemos establecer el factor de masa. Sabiendo que nuestro modelo de vehículo será 11,3 veces menor que el prototipo, diseñaremos un eje con esta reducción y calcularemos su masa. Para ello se ha desarrollado un modelo con el software *Catia* y hemos obtenido a masa de éste.



Fuente: Tesis Doctoral Javier Fernández Aceituno.

Figura 21. Modelo de eje con $f_l=11,3$.

Una vez obtenida la masa del eje del modelo, es necesario conocer la masa del eje del prototipo. Tomando como referencia el vehículo ML95 estudiado en la Tesis de João Carlos Elói de Jesus Pombo de la Universidade Técnica de Lisboa de abril de 2004. El

vehículo posee 4 ejes de acero distribuidos en 2 bogies y 1 vagón, cuyas características son las siguientes:

Fuente: Tesis Doctoral João Carlos Elói de Jesus Pombo.

Tabla 2. Características del vehículo ML95.

ID	Rigid Bodies	Mass (Kg)
1	Rear wheelset Rear Bogie	933
2	Front wheelset Rear Bogie	933
3	Rear axleboxes Rear Bogie	176
4	Front axleboxes Rear Bogie	176
5	Rear Bogie Frame	1982
6	Rear wheelset Front Bogie	933
7	Front wheelset Front Bogie	933
8	Rear axleboxes Front Bogie	176
9	Front axleboxes Front Bogie	176
10	Front Bogie Frame	1982
11	Carbody	11160

Donde *Rear wheelset Front Bogie* es el eje trasero del bogie delantero, es decir 1 eje con 2 ruedas y *Rear axleboxes Front Bogie* son las cajas de grasa de éste, tal y como se ha representado en el modelo de *Catia*. Si calculamos el factor de masa con la masa del eje fabricado en acero del modelo y del prototipo obtenemos el siguiente valor:

$$f_m = \frac{m_p}{m_m} = \frac{1109 \text{ kg}}{1,313 \text{ kg}} = 844,63. \quad (48)$$

Conseguir algunos elementos del modelo 844 veces menos pesados que los del prototipo puede llegar a ser complicado. Así que podemos reducir dicho factor añadiendo peso extra a los ejes que hagan que la masa sea más apropiada para el tamaño del vehículo, de tal forma que:

$$f_m = \frac{m_p}{m_m} = \frac{1109 \text{ kg}}{2,02 \text{ kg}} = 550. \quad (49)$$

2.2.4. Resto de factores

Una vez fijados 3 factores, las demás variables que intervienen en nuestro caso son derivadas de éstos:

$$f_{tiempo} = \frac{f_l}{f_v} = 0,942. \quad (50)$$

$$f_{aceleración} = \frac{f_v}{f_t} = 12,743. \quad (51)$$

$$f_{fuerza} = f_m \cdot f_a = 7008,65. \quad (52)$$

$$f_{peso\ específico\ lineal} = \frac{f_F}{f_l} = 620,23. \quad (53)$$

$$f_{inercia\ (dinamica)} = f_m \cdot f_l^2 = 70229,5. \quad (54)$$

$$f_{k\ (rigidez\ suspension)} = \frac{f_F}{f_l} = 620,03. \quad (55)$$

$$f_{amortiguamiento} = \frac{f_F \cdot f_t}{f_l} = 584,07 \quad (56)$$

La inercia y la masa son adecuadas para el tamaño el modelo del vehículo. Los factores de rigidez y amortiguamiento de la suspensión no son imposibles de conseguir, por lo que se obtendrían valores muy interesantes. El factor de similitud de aceleraciones es el menos apropiado de los conseguidos. Su valor implica que las aceleraciones experimentadas por un vehículo diseñado con estas especificaciones, serán 12,7 veces

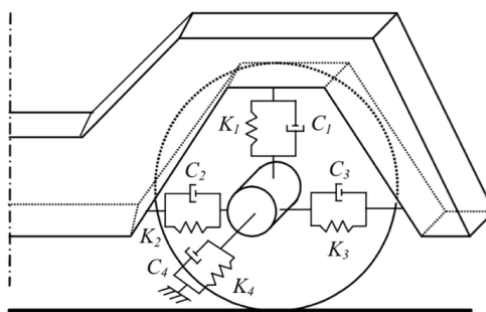
inferiores a las de un vehículo real. Ello, sumado a las características de los acelerómetros actuales (nivel de ruido, precisión, etc.), requerirá un tratamiento delicado a las medidas experimentales obtenidas en dichos vehículos que puedan extrapolarse al comportamiento de un vehículo real.

2.2.5. Suspensiones del vehículo ML95

El vehículo ML95 dispone de suspensiones primarias y suspensiones secundarias. Lo normal es que en trenes de mercancías solo exista la suspensión primaria. Ésta, por ser la más próxima al contacto entre rueda y carril, está destinada a la seguridad y la fatiga entre la vía y el vehículo y de aquí partiría la mejora del confort, aunque para ello está destinada la suspensión secundaria.

2.2.5.1. Suspensión primaria.

La suspensión primaria tiene doble función, por una parte, reduce las vibraciones producidas entre el bastidor del bogie y los elementos que lo componen. Por otra parte, reparte de forma homogénea las cargas a cada una de las ruedas para así asegurar una buena tracción y frenado, además de evitar problemas de descarrilamiento. La suspensión primaria del vehículo ML95 dispone de 4 suspensiones; 2 longitudinales, 1 vertical y 1 lateral, dispuestas de la siguiente manera y con los siguientes valores de rigidez y amortiguamiento:



Fuente: Tesis Doctoral João Carlos Elói de Jesus Pombo.

Figura 22. Suspensión primaria del vehículo ML95.

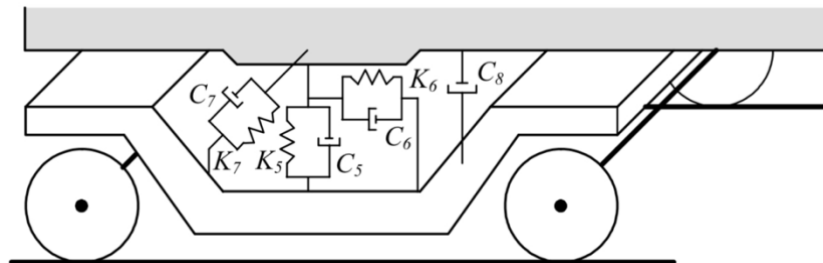
Fuente: Tesis Doctoral João Carlos Elói de Jesus Pombo.

Tabla 3. Rigidez y amortiguamiento suspensión primaria vehículo ML95.

Suspension Element Direction	Spring Stiffness (N/m)	Damping Coeffic. (N.s/m)
Vertical	K_1 1.28×10^6	C_1 55.41×10^3
Longitudinal	K_2 6.21×10^6	C_2 86.29×10^3
Longitudinal	K_3 6.21×10^6	C_3 86.29×10^3
Lateral	K_4 2.06×10^6	C_4 70.29×10^3

2.2.5.2. Suspensión secundaria.

La suspensión secundaria filtra las aceleraciones de baja frecuencia entre el bogie y el vagón. Esta suspensión es altamente flexible en las direcciones vertical y lateral. La suspensión secundaria de nuestro vehículo está formada por 3 pares de suspensiones muelle-amortiguador actuando en las direcciones vertical, longitudinal y lateral como se muestra en la Figura 23. En paralelo con los amortiguadores de aire, trabajan 4 suspensiones hidráulicas que se usan para la estabilización del vagón.



Fuente: Tesis Doctoral João Carlos Elói de Jesus Pombo.

Figura 23. Suspensión secundaria del vehículo ML95.

Fuente: Tesis Doctoral João Carlos Elói de Jesus Pombo.

Tabla 4. Rigidez y amortiguamiento suspensión secundaria vehículo ML95.

Suspension Element	Spring Stiffness (N/m)	Damping Coeffic. (N.s/m)
Airspring Vertical	K_5 250×10^3	C_5 47.54×10^3
Airspring Longitudinal	K_6 75×10^3	C_6 26.04×10^3
Airspring Lateral	K_7 75×10^3	C_7 26.04×10^3
Vertical Damper		C_8 21.00×10^3

CAPÍTULO III: TRAZADO DE LA VÍA

El Campus Científico Tecnológico de Linares, donde se encuentra situada la Escuela Politécnica Superior de Linares, está compuesto por 3 grandes edificios destinados a distintos usos.

En primer lugar, nos encontramos con el edificio de servicios generales, con una cubierta característica por su estructura pero que no es transitable.

En segundo lugar, el edificio de aularios posee una estructura en planta en forma de L. Es transitable, pero por su particular forma no permite realizar trazados circulares o curvas con radios pequeños.

Y, por último, el edificio de laboratorios que se divide en dos alas, laboratorios Este y laboratorios Oeste. Ambos con cubierta transitable y en los que ya se encuentran ubicadas instalaciones de distintos laboratorios.

3.1. UBICACIÓN ESCOGIDA PARA EL TRAZADO

Es fundamental que el lugar escogido para la instalación del ferrocarril sea una zona de fácil acceso tanto para los operarios que lo van a construir cómo para los futuros ensayos.

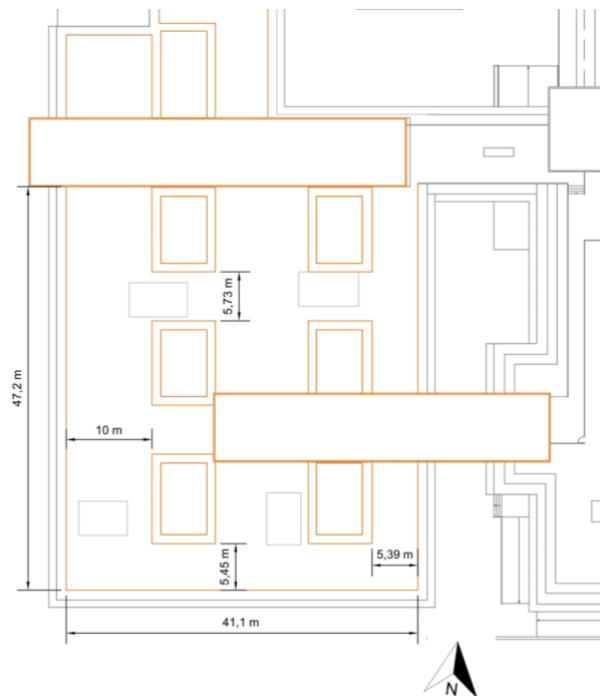
En el estudio de las cubiertas se ha decidido que, por razones de espacio y tránsito de operarios, la mejor ubicación es la cubierta del edificio Oeste de laboratorios. El edificio Este posee las mismas características, pero con la diferencia de que en éste se encuentran instalaciones para ensayos de otros laboratorios que entorpecen a nuestro modelo. En la cubierta Oeste tan sólo hay equipos de climatización con la posibilidad de cambiarse de lugar en caso de ser necesario para nuestro trazado. En la cubierta encontramos zonas de grava y zonas con baldosas de mármol blanco.



Fuente: TOMTOM Open Street Map

Figura 24. Foto satélite edificio laboratorios. Laboratorios Oeste marcados en rojo.

En la Figura 24 se aprecia cómo el ala Oeste del edificio posee una forma rectangular que favorece un trazado circular cerrado. Aunque esto sería lo ideal para los ensayos, también se han estudiado otras alternativas de trazado que se verán en puntos posteriores.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 25. Plano acotado de la cubierta de Laboratorios Oeste, ubicación de nuestro modelo.

Plano Anexo N° 1.

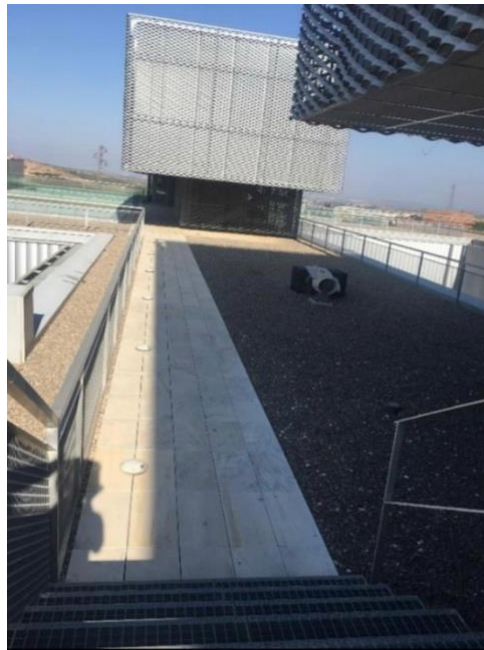


Figura 26. Acceso a la cubierta.

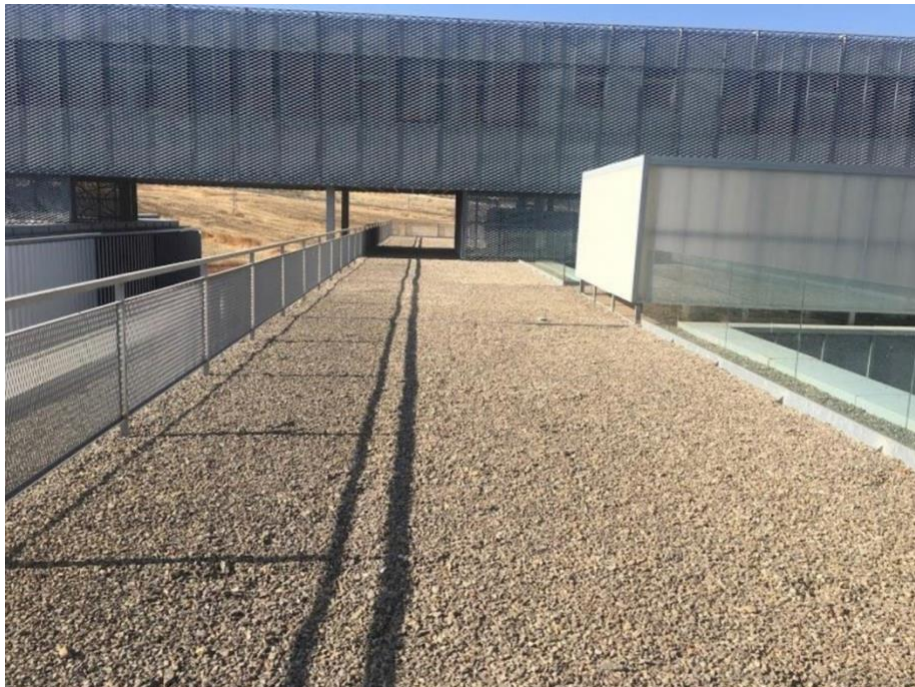


Figura 27. Lateral Este de la cubierta de Laboratorios Oeste.



Figura 28. Estructura que protege las máquinas de climatización.

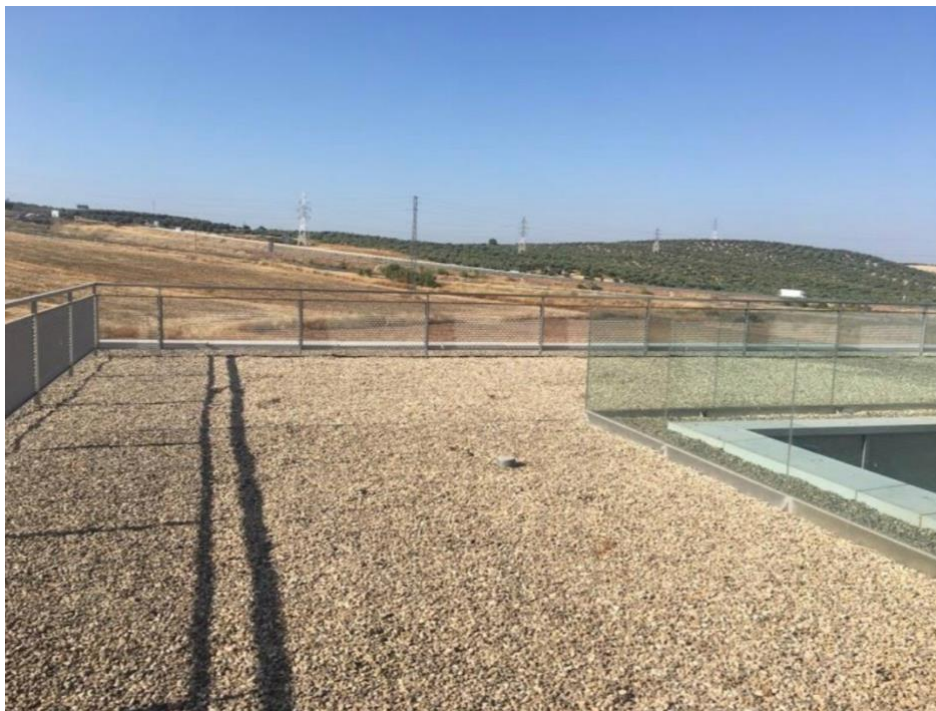


Figura 29. Zona sur donde se ubicará una de las curvas del trazado.



Figura 30. Panorámica con acceso a la cubierta Oeste desde la cubierta Este.

3.2. ALTERNATIVAS DE TRAZADO

Como en todo proyecto, es necesario estudiar las distintas alternativas posibles, a fin de seleccionar la que mejor se ajuste a las necesidades planteadas. Existen dos posibilidades distintas a la hora de proyectar el trazado, una es realizar un trazado circular y la otra es hacerlo lineal. Cada una de ellas tendrán unas ventajas y desventajas que deberán ser valoradas.

A la hora de proyectar el trazado será necesario ajustarse a la normativa vigente en cuanto a ferrocarriles y que está establecida por ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias).

3.2.1. Parámetros que limitarán el trazado

Existe un parámetro fundamental que limitará nuestro trazado y dicho parámetro corresponde a la geometría de nuestra ubicación. A diferencia de la naturaleza, que puede ser modificada casi en su totalidad, nuestro emplazamiento ya se encuentra construido y las restricciones físicas en cuanto a espacio son mayores. Por tanto, el espacio del que disponemos va a ser nuestro gran hándicap.

Donde reside la gran dificultad, a la hora de adaptarnos al espacio que tenemos, es en las curvas. Éstas deben cumplir la normativa con la que estamos trabajando al mismo tiempo que deben encajar perfectamente en los pasillos de la cubierta. El radio de las curvas dependerá de la velocidad a la que el vehículo pase por ellas

La mayor dificultad será solventar los giros de 90° que tenemos en las esquinas de la cubierta, donde el espacio del que disponemos es muy pequeño para radios grandes. Por tanto, necesitamos el menor radio posible. Así pues, los valores de peralte y aceleración transversal deberemos ajustarlos al máximo para conseguir el radio más pequeño posible.

Notaremos con el sufijo “p” a los valores correspondientes al prototipo y el sufijo “m” corresponderá a los valores del modelo.

Tomaremos como velocidad de proyecto los 2,5 m/s a los que va a circular nuestro modelo, 30 m/s en el prototipo, limitaremos la aceleración transversal máxima a 1,5 m/s² (prototipo), tomaremos como valor del peralte 160 mm (prototipo), y el ancho de vía entre ejes de carriles 1510 mm para ancho UIC.

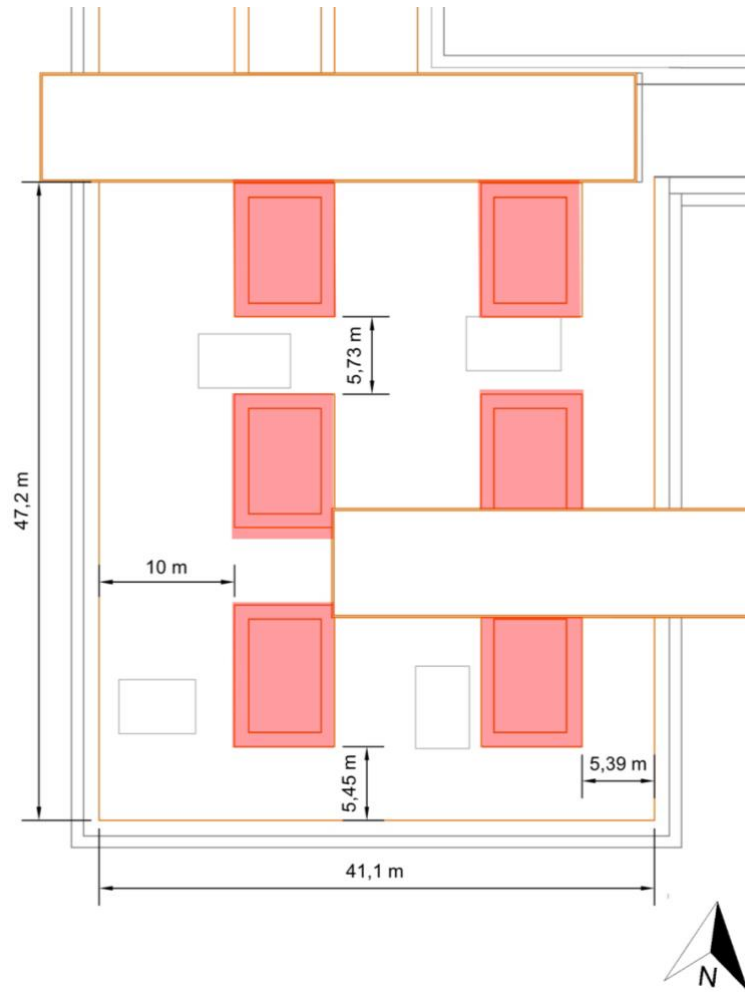
$$\alpha_{veh} = \frac{V^2}{R} - \frac{gH}{a} \quad (8)$$

$$R_p = \frac{V_p^2}{\alpha_{veh} + \frac{gH_p}{a_p}}$$

$$R_p = \frac{30^2}{1,5 + \frac{9,81 \cdot 0,160}{1,510}} = 354,4 \text{ m.} \quad (57)$$

$$R_m = \frac{R_p}{f_l} = \frac{354,4}{11,3} = 31,3 \text{ m.} \quad (58)$$

El radio que se obtiene en el modelo para los valores máximos admisibles de aceleración transversal, peralte y velocidad, y que por tanto será el radio mínimo admisible, es de 31,3 m. Este valor de radio no es posible proyectarlo en las esquinas donde debemos solventar un giro de 90°, pues los elementos de la cubierta que se marcan en la Figura 31 son fijos y se encuentran en la trayectoria de la curva. Por tanto, el único valor que podemos modificar para conseguir un radio menor es el de la velocidad. Aunque la velocidad del modelo sean 2,5 m/s, será necesario reducir la velocidad a su paso por curva.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 31. Elementos fijos de la cubierta, marcados en rojo.

El radio mínimo para la inscripción del vehículo en la curva es de $R_p = 100\text{m}$. Como necesitamos el radio más pequeño posible para salvar los 90° del trazado, adoptaremos un radio de 110m y calcularemos la velocidad de paso del vehículo por curva, la longitud de la clotoide y el parámetro de ésta.

$$\alpha_{veh} = \frac{V^2}{R} - \frac{gH}{a} \quad (8)$$

$$V = \sqrt{R \left(\alpha_{veh} + \frac{gH}{a} \right)}$$

$$V_p = \sqrt{110 \left(1,5 + \frac{9,81 \cdot 0,160}{1,510} \right)} = 16,71 \frac{m}{s} \quad (59)$$

$$V_p = 16,71 \cdot 3,6 = 60 \text{ km/h}$$

$$V_m = \frac{V_p}{f_v} = \frac{16,71}{12} = 1,39 \frac{m}{s} \quad (60)$$

$$R_m = \frac{R_p}{f_l} = \frac{110}{11,3} = 9,73 \text{ m.} \quad (61)$$

Reduciendo el radio a 110 m en el prototipo y 9,73 m en el modelo, obtenemos una velocidad de paso por curva de 60 km/h en el prototipo y 1,39 m/s en el modelo. Resuelto el radio y velocidad para las zonas donde hay que salvar un giro de 90°, es necesario calcular la longitud de la clotoide y su parámetro. Limitaremos la longitud de la clotoide a los siguientes factores y tomaremos cómo longitud mínima de la clotoide la mayor de ellas:

- Limitación del alabeo: este valor se limita entre 1 y 3 mm/m en líneas convencionales, por tanto, lo limitaremos a 2 mm/m:

$$L_p = \frac{H}{i} = \frac{160 \text{ mm}}{2 \frac{mm}{m}} = 80 \text{ m}$$

- Adaptación de las suspensiones: se limitará la variación del peralte entre 20 y 80 mm/s, limitándolo en nuestro caso a 40 mm/s:

$$L_p = \frac{H \cdot V}{u} = \frac{160 \cdot 16,67}{40} = 66,68 \text{ m}$$

- Confort del viajero: limitaremos la variación de H_i a 28 mm/s^2 .

$$L = \frac{H_i \cdot V}{w}$$

$$H_{ip} = \frac{\alpha_{nc} \cdot a}{g} = \frac{1,5 \cdot 1510}{9,81} = 230,88 \text{ mm}$$

$$L_p = \frac{0,23088 \cdot 16,67}{0,028} = 137,45 \text{ m}$$

Tomaremos como longitud mínima de la clotoide el valor de $L_p = 137,45 \text{ m}$ y calcularemos el parámetro de ésta.

$$A = \sqrt{L \cdot R} \quad (24.2)$$

$$A_p = \sqrt{137,45 \cdot 110} = 122,96 \text{ m.} \quad (62)$$

Por tanto, tenemos como valores para la curva:

$$R_m = 9,73 \text{ m}$$

$$L_m = \frac{L_p}{f_l} = \frac{137,45}{11,3} = 12,16 \text{ m.} \quad (63)$$

$$A_m = \frac{A_p}{f_l} = \frac{122,96}{11,3} = 10,88 \text{ m.} \quad (64)$$

Queda así resuelto la problemática de realizar giros tan cerrados con los problemas de espacio que tenemos en la cubierta. Una vez resuelto hay que diseñar un trazado lo más optimizado posible.

3.2.2. Primera alternativa. Trazado lineal

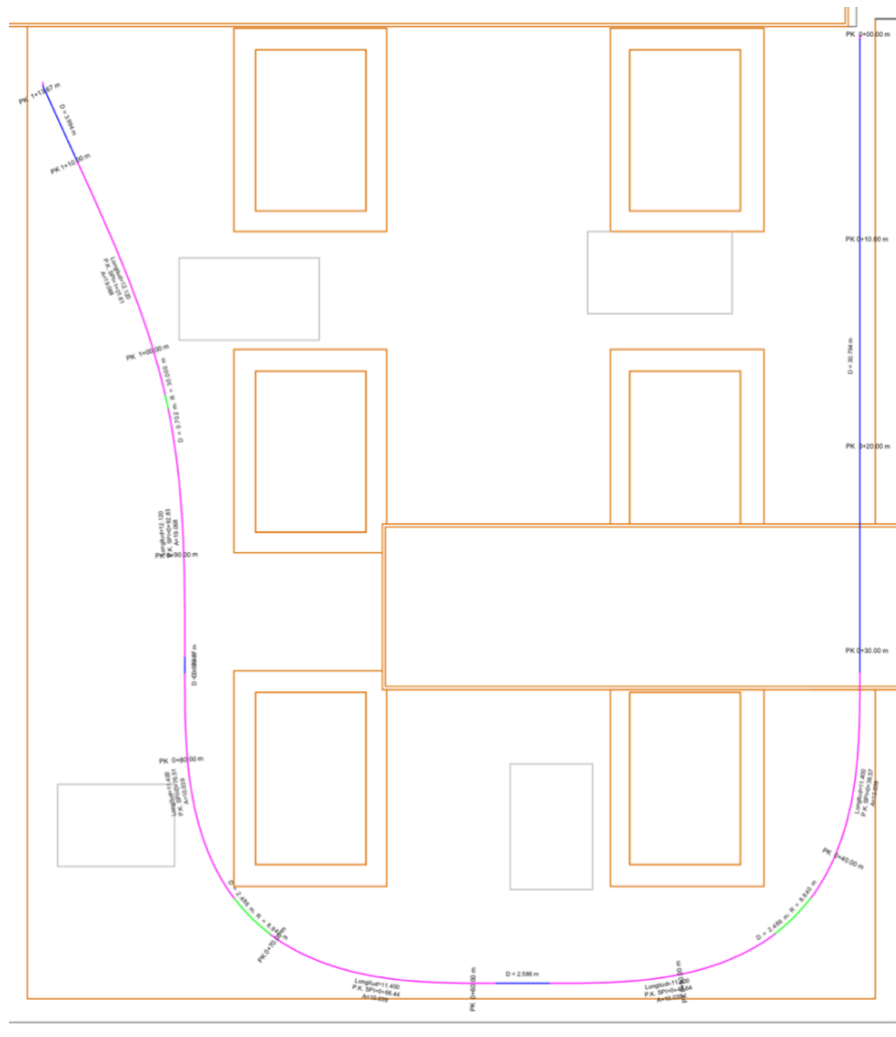
Como primera alternativa se ha diseñado un trazado lineal de 113,67 m con un tramo recto de 30 m seguido de 2 curvas a derechas de radio 8,84 m que salvan giros de 90° y separadas por un tramo recto de 2,59 m, seguidas de una curva a izquierdas de 30 m de radio.

En esta alternativa se salvó el giro de 90° con curvas de radio 8,84 m, radio mínimo para la inscripción del vehículo en la curva. A diferencia de lo calculado anteriormente, donde este giro se salva con curva de radio 9,73 m.

Las ventajas de este trazado, frente a uno circular o simétrico, es que existe una variedad en los elementos que lo componen. Existe un tramo recto donde el vehículo podrá alcanzar su velocidad máxima, seguido de dos curvas limitadas a la velocidad mínima y una última curva de gran radio seguida de un tramo recto donde el tren podrá circular a una velocidad mayor.

El hándicap de este trazado es la incomodidad para los técnicos que realizarán los ensayos. Se debe ir de un extremo a otro del trazado para darle la vuelta al vehículo cada vez que se realiza un trayecto, lo que supone una pérdida de tiempo y comodidad.

Además, el trazado se compondrá de dos tramos, uno de vía en placa y otro de balasto. Esto supone que, al no ser un trazado simétrico, ambos tipos de sistemas no estarán en igualdad de condiciones y los resultados no serán comparables. Sin embargo, en un trazado simétrico podemos tener dos tramos de idéntica geometría, pero con materiales distintos, susceptibles de poder ser comparados.



Fuente: Elaboración propia en Autocad Civil 3D 2018.

Figura 32. Primera alternativa de trazado. Plano Anexo N° 2.

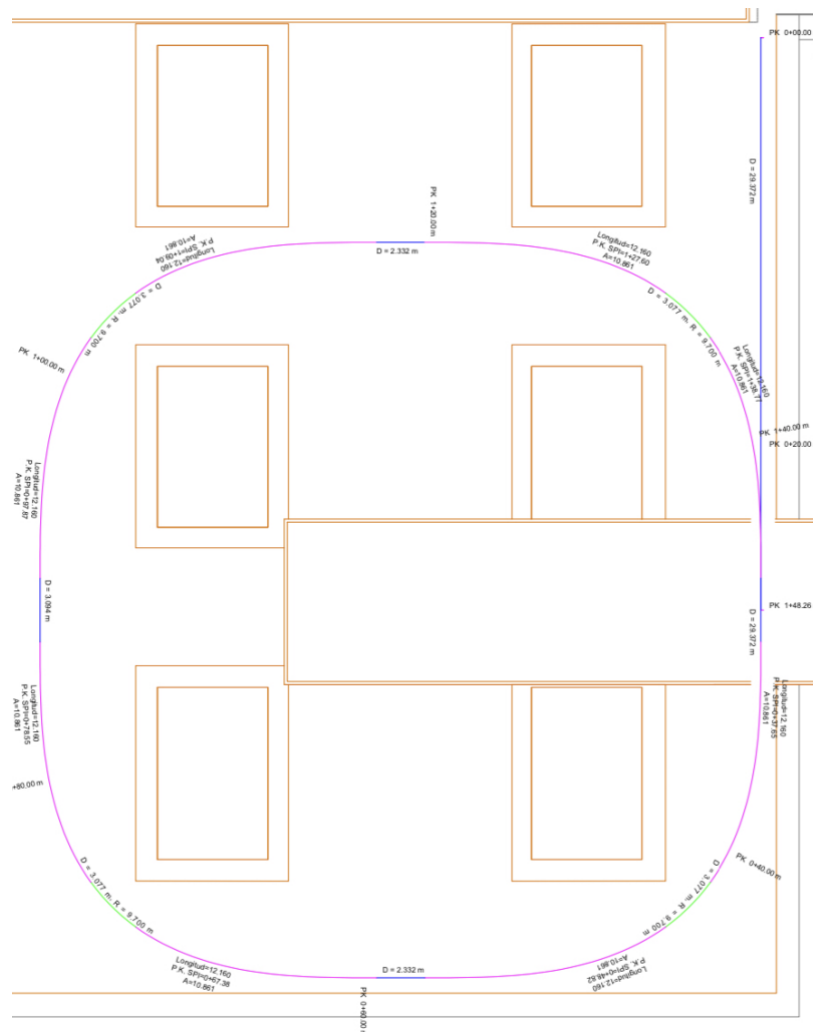
3.2.3. Segunda alternativa. Trazado circular

Se ha optado por un trazado circular de 148,6 m para la segunda alternativa. Consta de un tramo recto de 26,28 m de longitud que sirve como entrada o enlace con el trazado principal que tiene 119,98 m. El trazado tiene forma de cuadrado achaflanado con 4 curvas de igual radio y clotoides idénticas. Todas las curvas cumplen con el radio calculado anteriormente de 9,73 m y clotoides de 12,16 m con parámetro $A = 10,88$ m. La velocidad del vehículo deberá reducirse a su paso por la curva circular a 1,39 m/s. Las curvas están enlazadas con tramos rectos de 2,33 m y 3,09 m.

Para proyectar este trazado ha sido necesario estudiar la posibilidad de desmontar y cambiar de ubicación las máquinas de refrigeración que en la Figura 32 anterior aparecen en línea de color gris.

A diferencia del trazado lineal, el trazado circular tiene la ventaja de que los ensayos son más dinámicos y se pueden prolongar durante más tiempo. Los técnicos no necesitan ir de un extremo a otro del trazado para darle la vuelta al vehículo y pueden tenerlo circulando el tiempo que se necesite para el ensayo. Esto facilita el estudio de resultados, pues estos serán más estables.

Al construirse en dos materiales distintos, balasto y hormigón, el hecho de que el trazado sea simétrico pone en igualdad de condiciones a ambos materiales. Tanto en balasto como en hormigón se dispondrá de la misma longitud de trazado y de la misma geometría en las curvas.



Fuente: Elaboración propia en Autocad Civil 3D 2018.

Figura 33. Segunda alternativa de trazado. Plano Anexo N° 3.

3.2.4. Matriz de decisión

Una vez presentadas las dos alternativas de trazado, debemos enfrentarlas en una matriz de decisión que nos ayude a seleccionar la más adecuada. Enfrentaremos y valoraremos los factores que hasta ahora hemos ido comentando. Se puntuarán de 1 a 10, donde 1 es muy desfavorable y 10 es muy favorable. La alternativa con la puntuación mayor será la seleccionada. Los factores a tener en cuenta son:

- Longitud del trazado: La longitud del trazado debe valorarse positivamente cuanto más largo sea éste.
- Espacio ocupado: Se valorará con mayor puntuación aquel trazado que ocupe menos espacio, ya que se favorecerá que en la cubierta se puedan construir otro tipo de instalaciones científicas que convivan con la nuestra.
- Complejidad de ejecución: Aquella alternativa que tenga unos elementos constructivos que favorezcan una construcción más simple y rápida, se valorará con mayor puntuación. Se tendrá en cuenta que los elementos sean simétricos y favorezcan el uso de piezas universales.
- Afección a otras instalaciones: Si un trazado afecta a otros elementos de la cubierta y dichos elementos han de ser eliminados o cambiados de lugar, se valorará a la baja.
- Resultados eficientes en los ensayos: Se necesita que los ensayos sean eficientes y arrojen resultados lo más estables y precisos posibles. Para ello será necesario que la alternativa escogida favorezca esto con un trazado que permita ensayos largos en el tiempo.
- Facilidad para los técnicos de laboratorio: Las personas que vayan a realizar el ensayo necesitan que el trazado les permita estar en un punto fijo la mayor parte del tiempo analizando resultados sin tener que desplazarse constantemente.
- Mantenimiento posterior: Es importante que el mantenimiento posterior sea fácil y económico.

Tabla 5. Matriz de decisión.

MATRIZ DE DECISIÓN	Trazado lineal	Trazado circular
Longitud del trazado	8	10
Espacio ocupado	5	8
Complejidad ejecución	5	10
Afección a otras instalaciones	8	4
Resultados eficientes ensayos	6	8
Facilidad para técnicos	5	10
Mantenimiento posterior	5	10
RESULTADO	42	60

3.3. TRAZADO ADOPTADO

El trazado circular ha sido el que ha obtenido mayor puntuación en la matriz de decisión. Su trazado simétrico hace que, factores como la complejidad de su construcción, la facilidad para los técnicos de laboratorio o su mantenimiento posterior, sea esta opción sea la más adecuada.

3.3.1. Geometría del trazado del modelo

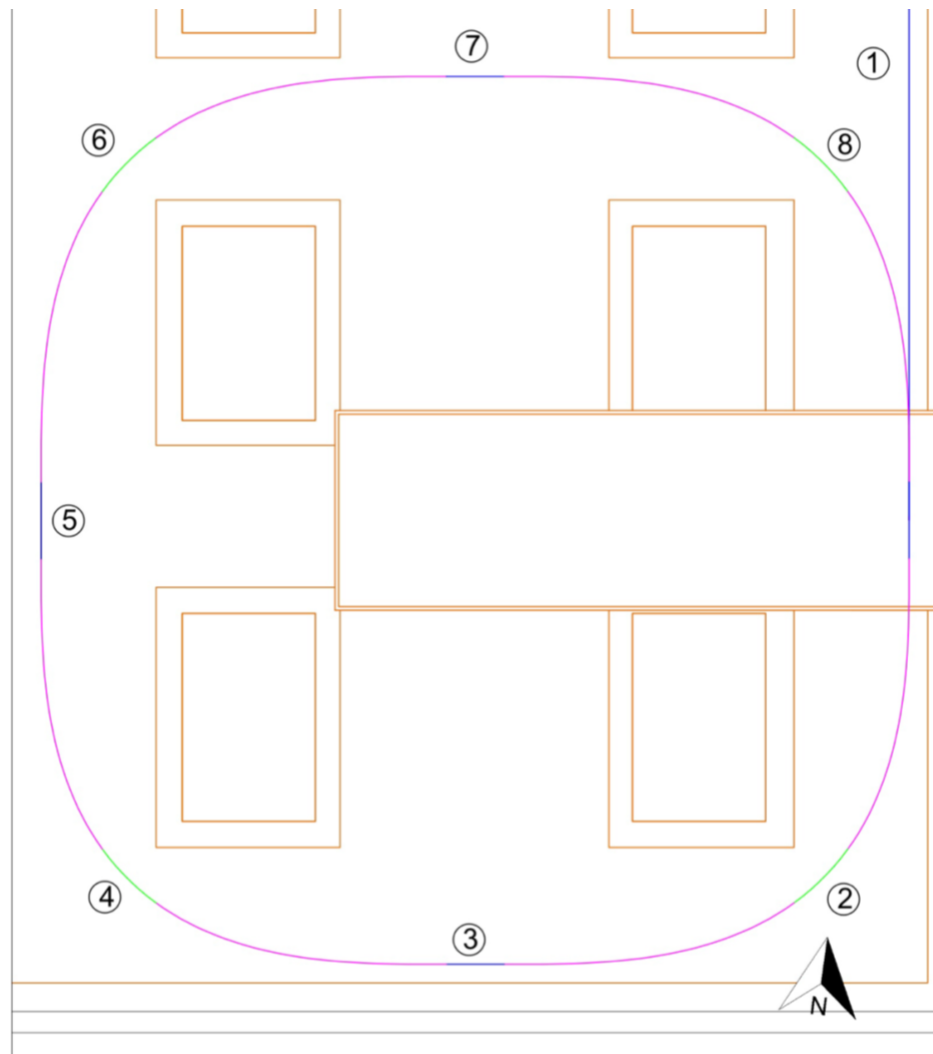
Tabla 6. Elementos del trazado.

Trazado Circular	Longitud	Parámetro A	Radio
Tramo recto 1	29,37 m		
Clotoide entrada 1	12,16 m	10,86 m	
Curva circular 1	3,08 m		9,70 m
Clotoide salida 1	12,16 m	10,86 m	
Tramo recto 2	2,33 m		
Clotoide de entrada 2	12,16 m	10,86 m	
Curva circular 2	3,08 m		9,70 m
Clotoide de salida 2	12,16 m	10,86 m	
Tramo recto 3	3,09 m		
Clotoide de entrada 3	12,16 m	10,86 m	
Curva circular 3	3,08 m		9,70 m
Clotoide de salida 3	12,16 m	10,86 m	
Tramo recto 4	2,33 m		
Clotoide de entrada 4	12,16 m	10,86 m	

Curva circular 4	3,08 m		9,70 m
Clotoide de salida 4	12,16 m	10,86 m	

La simetría del trazado se aprecia en la tabla anterior, donde los parámetros de las curvas circulares y sus clotoides son idénticos en todas y cada una de ellas.

A continuación, se detallan con los distintos tramos del trazado:



Fuente: Elaboración propia en Autocad Civil 3D 2018.

Figura 34. Plano con los elementos del trazado correspondientes a la Tabla 6. Plano Anexo N° 4.

Tabla 7. Peraltes del modelo calculados en Autocad Civil 3D 2018.

Curva de peralte de ferrocarriles	P.K. inicial	P.K. final	Longitud	Solapa...	Peralte de ferrocarril...	Peralte de equilibrio	Insuficiencia de pera...	Degradado de peralt...	Velocidad vertical	Aceleración latera
Curva.1										
Región de entrada de transición	0+29.37m	0+41.53m	12.160m							
Fin de nivel de carril	0+29.37m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	0.00%	0.000 m/s	0.000 m/s²
Inicio de peralte de ferrocarriles completo	0+41.53m				15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.12%	0.002 m/s	1.407 m/s²
Inicio de curva	0+41.53m					34.171mm				
Región de salida de transición										
Fin de peralte de ferrocarriles completo	0+44.61m	0+56.77m	12.160m		15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.00%	0.000 m/s	1.407 m/s²
Inicio de nivel de carril	0+56.77m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	-0.12%	-0.002 m/s	0.000 m/s²
Curva.2										
Región de entrada de transición	0+59.10m	0+71.26m	12.160m							
Fin de nivel de carril	0+59.10m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	0.00%	0.000 m/s	0.000 m/s²
Inicio de peralte de ferrocarriles completo	0+71.26m				15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.12%	0.002 m/s	1.407 m/s²
Inicio de curva	0+71.26m					34.171mm				
Región de salida de transición										
Fin de peralte de ferrocarriles completo	0+74.34m	0+86.50m	12.160m		15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.00%	0.000 m/s	1.407 m/s²
Fin de curva	0+74.34m					34.171mm				
Inicio de nivel de carril	0+86.50m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	-0.12%	-0.002 m/s	0.000 m/s²
Curva.3										
Región de entrada de transición	0+89.59m	1+01.75m	12.160m							
Fin de nivel de carril	0+89.59m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	0.00%	0.000 m/s	0.000 m/s²
Inicio de peralte de ferrocarriles completo	1+01.75m				15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.12%	0.002 m/s	1.407 m/s²
Inicio de curva	1+01.75m					34.171mm				
Región de salida de transición										
Fin de peralte de ferrocarriles completo	1+04.83m	1+16.99m	12.160m		15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.00%	0.000 m/s	1.407 m/s²
Fin de curva	1+04.83m					34.171mm				
Inicio de nivel de carril	1+16.99m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	-0.12%	-0.002 m/s	0.000 m/s²
Curva.4										
Región de entrada de transición	1+19.32m	1+31.48m	12.160m							
Fin de nivel de carril	1+19.32m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	0.00%	0.000 m/s	0.000 m/s²
Inicio de peralte de ferrocarriles completo	1+31.48m				15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.12%	0.002 m/s	1.407 m/s²
Inicio de curva	1+31.48m					34.171mm				
Región de salida de transición										
Fin de peralte de ferrocarriles completo	1+34.56m	1+46.72m	12.160m							
Fin de curva	1+34.56m				15.000mm	34.171mm	19.171mm	0.00%	0.000 m/s	1.407 m/s²
Inicio de nivel de carril	1+46.72m				0.000mm	0.000mm	0.000mm	-0.12%	-0.002 m/s	0.000 m/s²

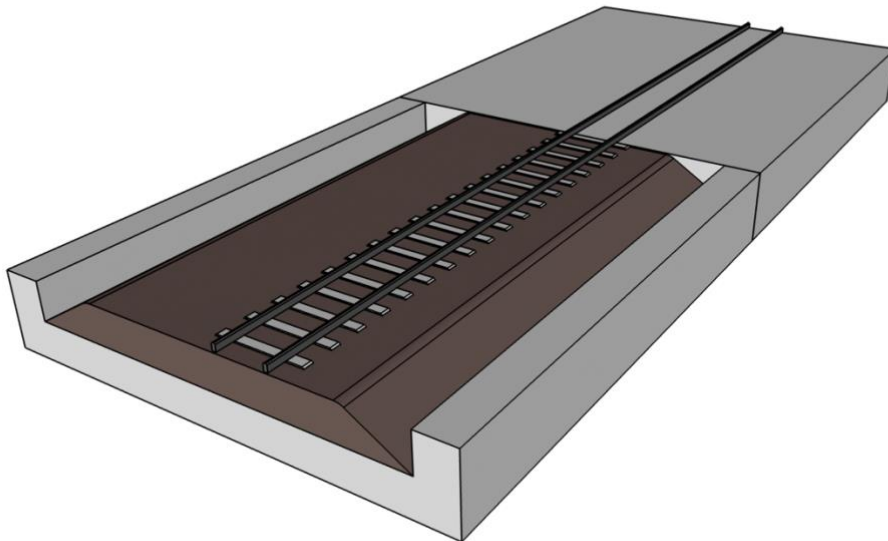
CAPÍTULO IV: SISTEMA CONSTRUCTIVO

Cómo se ha comentado anteriormente, el objeto de éste TFG es la construcción de un modelo de ferrocarril a escala para ensayos de laboratorio. Para que este laboratorio sea aún más interesante y polivalente, contará con un tramo de vía en balasto y un tramo de vía en placa.

Para ello es necesario diseñar un sistema que de soporte a la vía sobre la cubierta y que sea compatible con las dos tipologías de ferrocarril. El sistema tiene que permitir dar soporte a la vía con balasto y a la vía en placa.

4.1. SOPORTE A LA VÍA

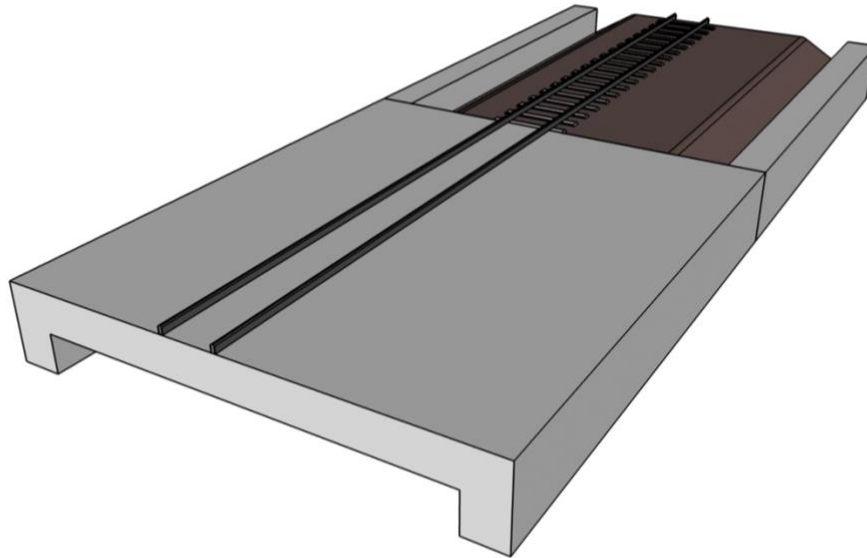
Se ha desarrollado un sistema de cajones de hormigón prefabricados en forma de U. Estos cajones permiten que, colocados en posición natural de U, puedan dar cobijo al balasto y a las traviesas que darán soporte a los carriles.



Fuente: Elaboración propia en Shapr3D.

Figura 35. Cajón en la postura que da soporte a la vía en balasto. Plano Anexo N° 8.

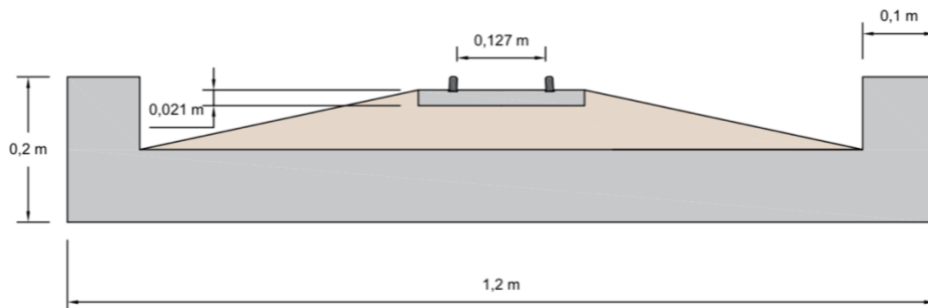
De manera contraria, es decir, el cajón colocado en U inversa permite atornillar el carril directamente a la base cómo si de una placa de hormigón se tratase, pero sin traviesas.



Fuente: Elaboración propia en Shapr3D.

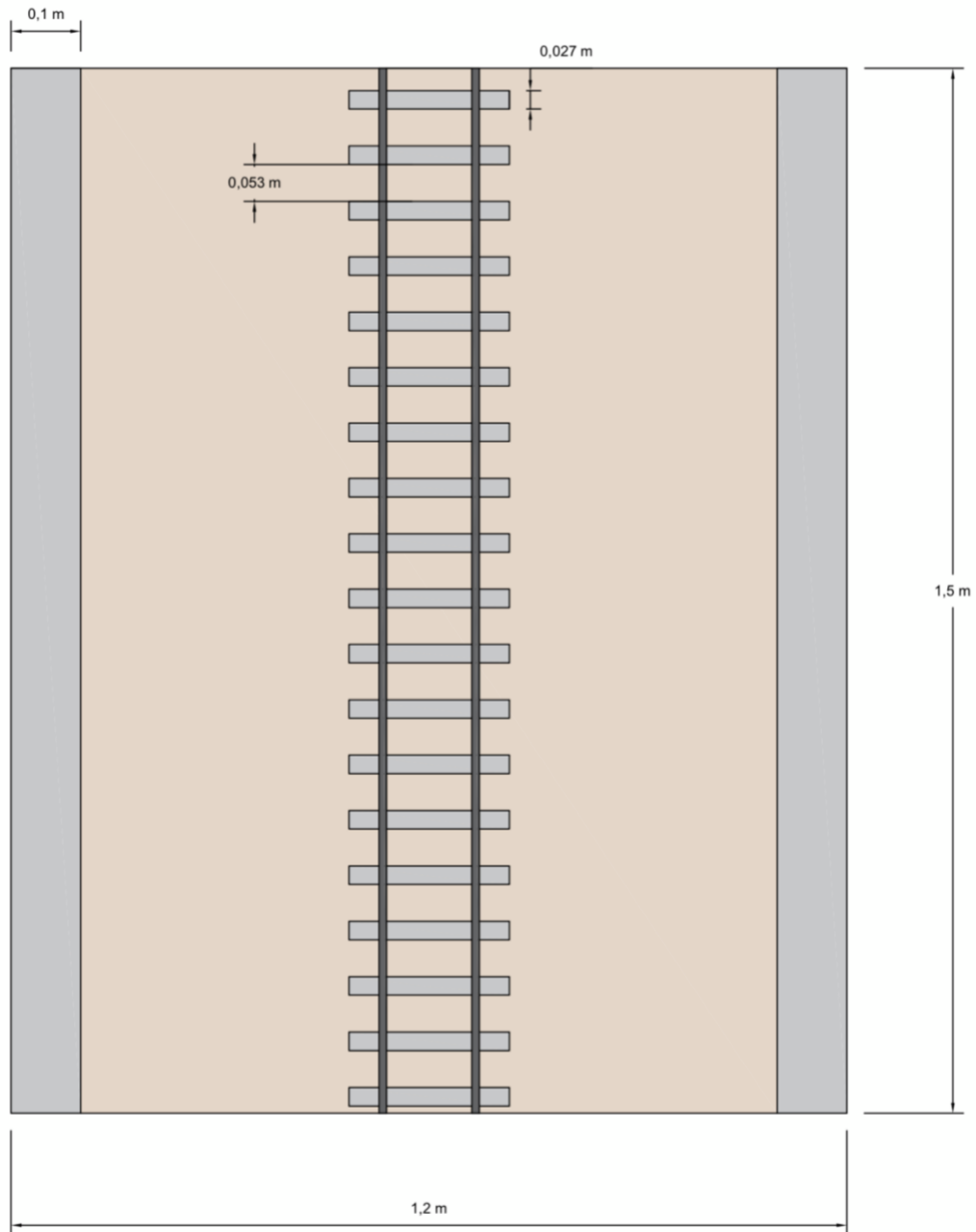
Figura 36. Cajón en la postura que da soporte a la vía en placa. Plano Anexo N° 8.

Con este sistema abaratamos costes y facilitamos el montaje y posterior mantenimiento. Además, permite enlazar el tramo en balasto con el tramo de vía en placa de una manera fácil con tan sólo voltear el cajón.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 37. Cajón en la postura que da soporte a la vía en placa. Plano Anexo N° 8.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

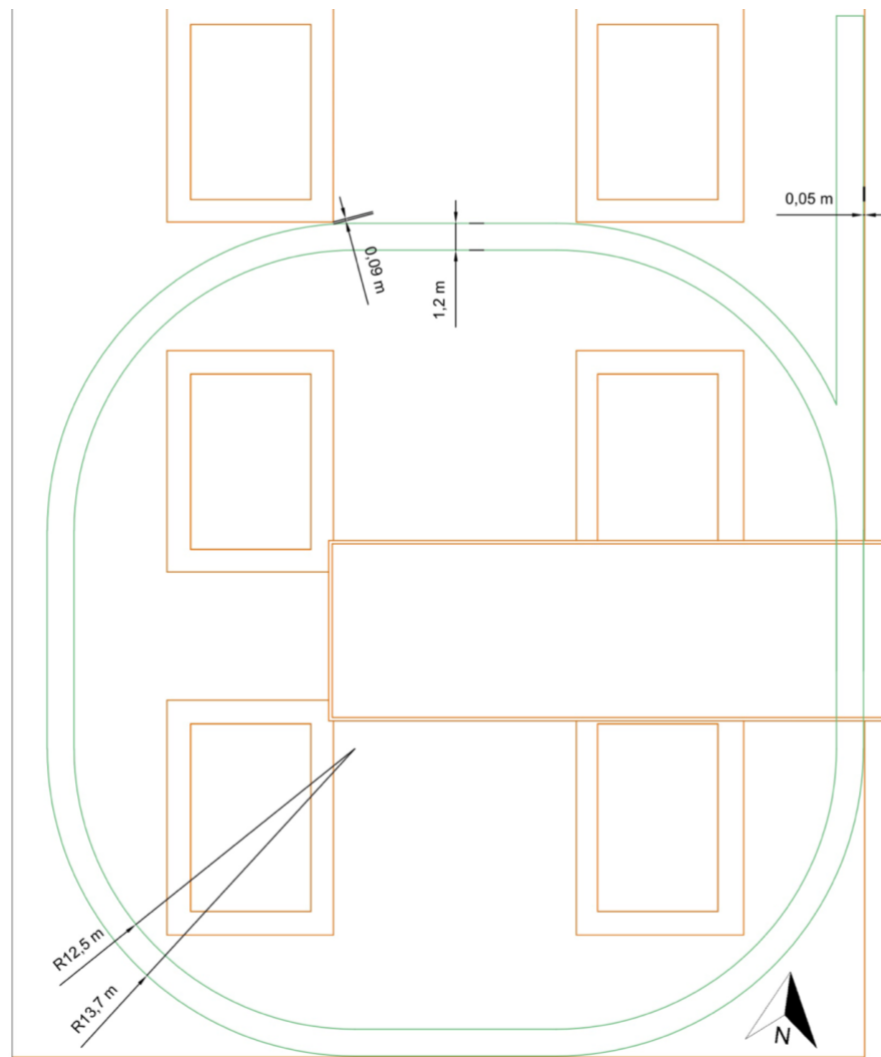
Figura 38. Cajón en la postura que da soporte a la vía en placa. Plano Anexo N° 8.

4.1.1. Los cajones a su paso por las curvas

Puesto que en nuestro trazado también existen curvas, es aquí donde reside un pequeño handicap que podría complicar el sistema. Debido a que queremos que el sistema sea universal y el número de piezas sea reducido para que la producción sea sencilla y económica, debemos estudiar la forma de que el sistema sea compatible con las clotoideas. Éstas, al tener el radio variable, nos enfrentan ante la situación de tener que construir una

serie de cajones con radio variable que dificultan y encarecen su fabricación, montaje y posterior mantenimiento.

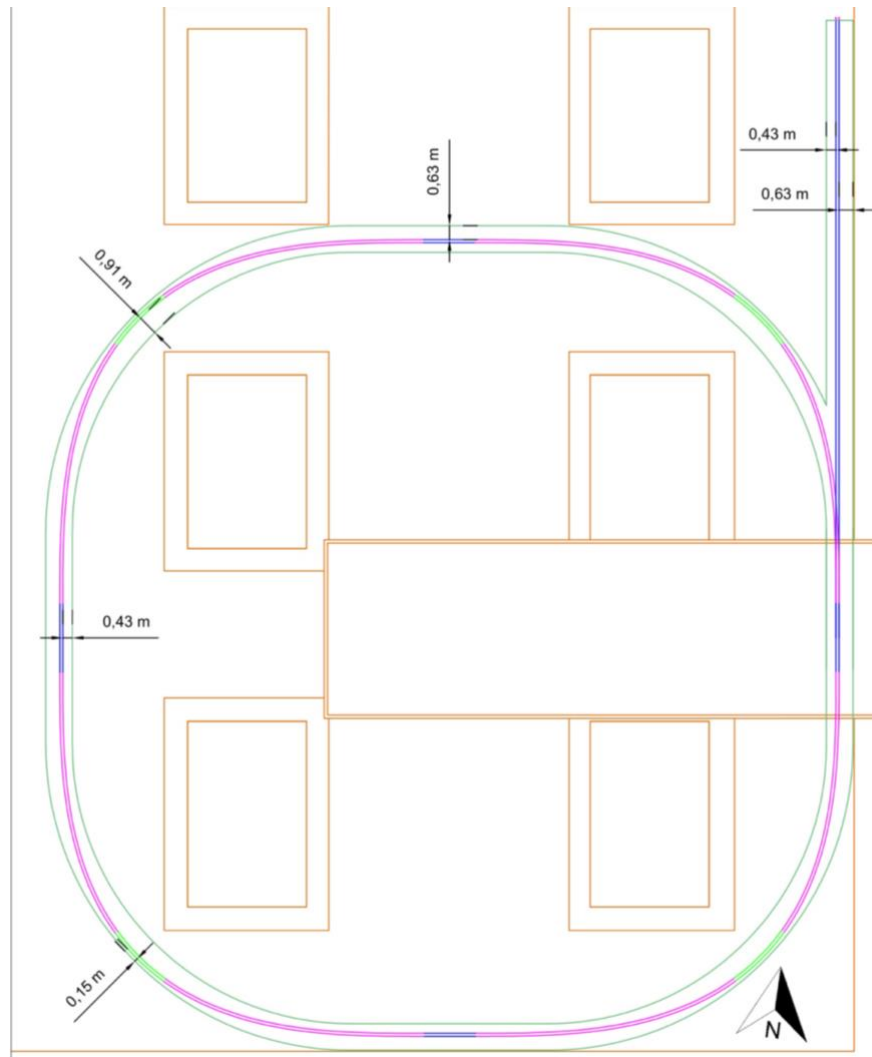
Para solucionar el problema, se ha proyectado un trazado con cajones con ancho de 1,20 m, sobredimensionado respecto al ancho de vía, para que tan sólo se componga de tramos rectos unidos por curvas circulares de radio fijo.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 39. Trazado en planta del sistema de cajones. Plano Anexo N° 5.

De esta forma, aunque la curva que realizan los cajones sea de radio fijo, la clotoide en su interior tiene espacio para desarrollar su radio variable como se aprecia en la Figura 40. Esto es una ventaja de cara a la fabricación, montaje y mantenimiento, pues tan sólo tendremos dos tipos de piezas, rectas y curvas. En posibles roturas o deterioros de piezas, tan sólo tendremos guardadas piezas para tramo recto o curvo.



Fuente: Elaboración propia en Autocad Civil 3D 2018.

Figura 40. Trazado del ferrocarril dentro del sistema de cajones. Plano Anexo N° 6.

En las curvas del sistema de cajones existe un punto crítico donde el carril pasa a 15 cm del ala del cajón. En la serie de Figuras 41 se muestra un detalle representado en 3 dimensiones donde se aprecia que no existe problema alguno, ya que aún sigue quedando margen. Aunque la distancia fuese menor, no habría problema por el paso del vehículo ya que el balasto va a nivel con el ala de, cajón y ésta no entorpece al vehículo.

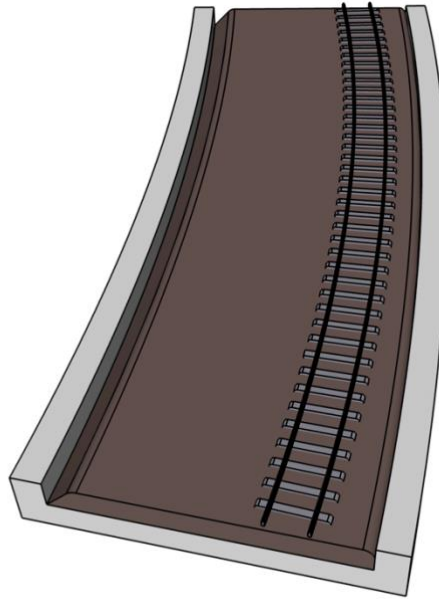


Figura 41.1. Detalle de la vía a su paso por curva. Plano Anexo N° 8.

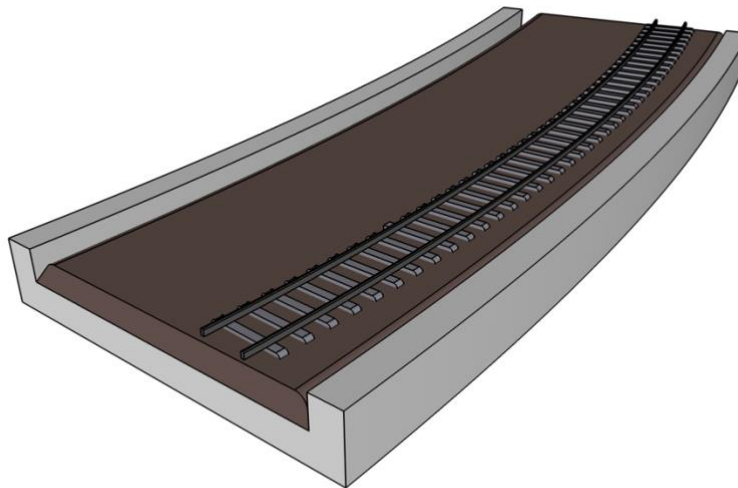
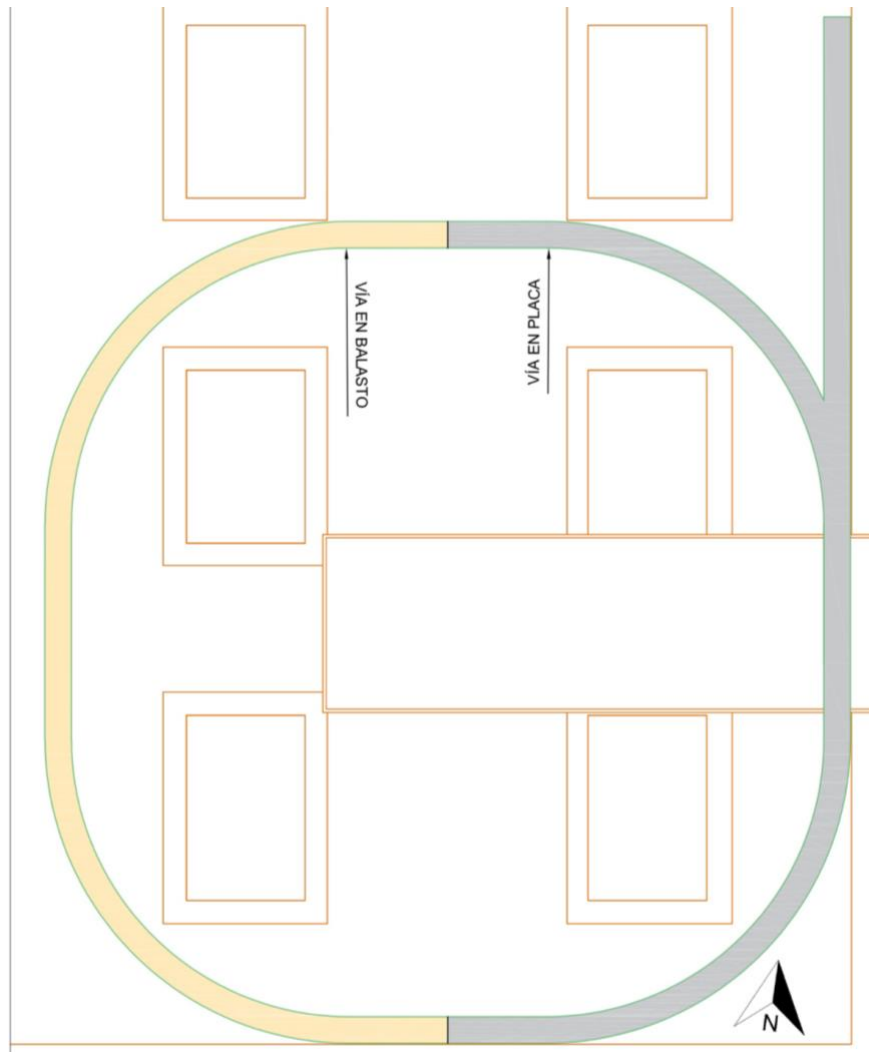


Figura 41.2 Detalle de la vía a su paso por curva. Plano Anexo N° 8.

Tal y cómo se representa en las Figuras 35 y 36, los cajones permiten la unión del tramo de vía en placa con el tramo de vía en balasto, que se realizará en los tramos rectos Norte y Sur. De tal manera que en la Figura 42 quedan representados ambos tramos.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 42. Diferenciación de los distintos sistemas. Plano Anexo N° 7.

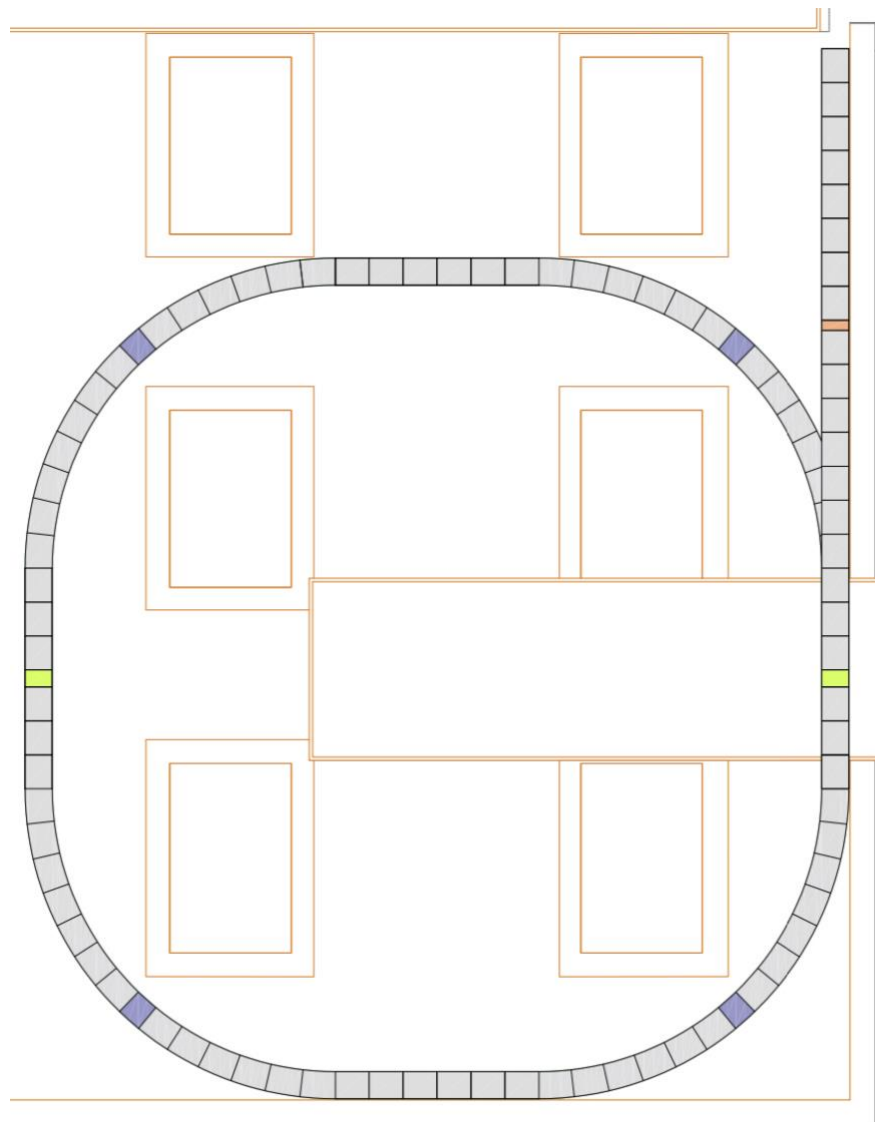
Es importante apreciar que en la intersección del tramo recto principal con la curva se deberá instalar un aparato de vía que consistirá en un cambio de vía. Para ello, la intersección entre tramo curvo y recta se deberá diseñar con un cajón especial que permita el enlace de ambos tramos distinto.

4.1.2. Despiece del trazado

Ya que los cajones serán prefabricados y tendrán medidas de 1,50 m x 1,20 m x 0,20 m, habrá que estudiar el trazado para conocer en que puntos será necesario fabricar o cortar un cajón con unas dimensiones menores para completar los tramos que no sean múltiplos de 1,5, el largo del cajón. Se puede ver con mayor detalle en el Plano nº 9 incluido en el capítulo Anexos.

Tabla 8. Despiece del trazado de cajones.

Trazado	Longitud (m)	Nº Cajones por tramo	Nº Tramos	Nº Cajones totales
Tramo recto principal	22,95	15 Standar + 1 (0,45 m largo)	1	15 Standar + 1 (0,45 m largo)
Tramo recto Este y Oeste	9,75	6 Standar + 1 (0,75 m largo)	2	12 Standar + 2 (0,75 m largo)
Tramo recto Norte y Sur	9	6 Standar	2	12 Standar
Curva circular	20,4	13 Standar + 1 (0,9 m largo)	4	52 Standar + 4 (0,9 m largo)



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 42. Detalle del despiece del sistema de cajones. Plano Anexo N° 9.

4.2. CARRIL Y TRAVIESAS

4.2.1. El carril

El carril y las traviesas son dos elementos muy importantes en el conjunto de la vía, y es necesario tenerlos en cuenta a la hora de diseñar el modelo porque tienen consecuencias directas en la dinámica del vehículo.

El carril guía al tren por el trazado de forma las pestañas de las ruedas chocan con las caras interiores de los carriles. Por ello, es muy importante que, para que los valores obtenidos por los sensores del modelo del vehículo tengan validez, las cabezas de los carriles tienen que estar modelizadas. En la cultura del modelismo tripulado de 5", 127mm, se usan pletinas de acero plegadas que simulan un carril Vignole, pero que no cumple con ninguna propiedad geométrica de éste. Se ha consultado con fabricantes internacionales como *Cromar White* o *Miniature Railway Supply Co Ltd* y este último dispone de carriles de acero para anchos de vía de 5" modelizados de carriles UIC.



Fuente: Miniature Railway Supply Co Ltd.

Figura 43. Carril para ancho de vía 5".

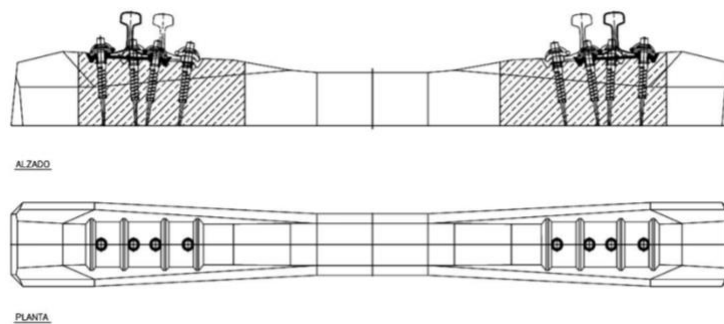
Puesto que se trata de fabricantes de modelismo, donde la dinámica de los modelos no tiene semejanza con la de los prototipos, los carriles no están fabricados al detalle geométricamente hablando. Por lo que será necesario mecanizar la cabeza del carril con un torno para conseguir una geometría real a escala 11,3 para que el contacto rueda carril sea semejante entre modelo y prototipo.

Cómo opción alternativa, y posiblemente más económica, se puede utilizar una pletina maciza de 10 x 20 mm y mecanizar la cabeza.

4.2.2. Las traviesas

Dan soporte al carril y mantienen la geometría de la vía, por lo que será importante que las traviesas cumplan unas propiedades físicas para que nuestro modelo de vía mantenga la geometría al paso del vehículo.

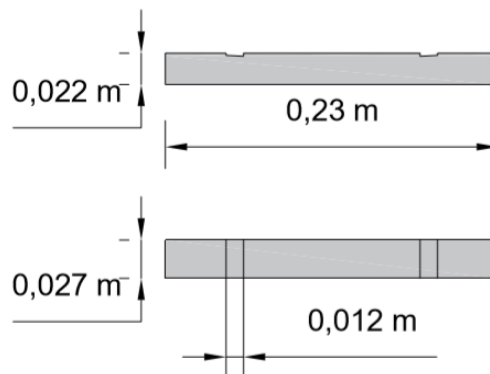
Se usarán como prototipo traviesas polivalente PR-01 compatibles con ancho ibérico (1668 mm) y ancho internacional UIC (1435 mm) en nuestro caso. Las traviesas PR-01 tienen una geometría particular con distintos planos como se puede apreciar en la Figura 43.



Fuente: Fichas informativas ADIF.

Figura 44. Traviesa polivalente PR-01.

De estas traviesas tomaremos tan solo las 3 dimensiones de largo (2,60 m), ancho (0,30 m) y alto (0,24 m), teniendo en cuenta además la inclinación de 1/20 para el apoyo de los carriles. Quedando de la siguiente manera en la Figura 44.



Fuente: Elaboración propia en Autocad 2018.

Figura 45. Traviesa modelizada a escala 11,3. Plano Anexo N° 8.

El peso de las traviesas PR-01 está comprendido entre 295 y 315 kg. El peso es muy importante para garantizar que no se desplacen con los choques de las ruedas con el carril. Por tanto, teniendo en cuenta el factor de escala de masa de 550, las traviesas del modelo deben pesar 550 veces menos, es decir, entre 0,537 y 0,570 kg, valor que se deberá estudiar, pues con estas dimensiones obtener este valor de masa es difícil sin añadir un peso extra que podría consistir en contrapesos metálicos.

4.3. ESTABILIDAD LATERAL DE LA VÍA

Cómo norma general, se autoriza a una locomotora para circular por una vía a velocidad V+10 si se cumple que el esfuerzo transversal H es menor que la resistencia lateral L:

$$H \leq L$$

$$L = 0,85 \left(10 + \frac{P}{3} \right) \quad (kN) \quad (65)$$

$$H = 1,2 \cdot \frac{(P \cdot I)}{a} + \frac{P \cdot V}{1000} \quad (kN) \quad (66)$$

Donde:

P = Carga por eje (kN);

I = Insuficiencia de peralte (m);

a = Distancia entre ejes de los carriles (m);

V = Velocidad (Km/h);

$$I = \frac{a \cdot V^2}{g \cdot R} - Z_p \quad (m) \quad (67)$$

Donde:

a = Distancia entre ejes de los carriles (m);

V = Velocidad (m/s);

G = Aceleración de la gravedad (m/s^2);

R = Radio (m);

Z_p = Peralte (m);

En nuestro caso los cálculos serían:

$$a_p = 1,510 \text{ m (ancho UIC)} \quad a_m = 0,134 \text{ m}$$

$$V_p = 16,68 \frac{m}{s} \quad V_m = 1,39 \frac{m}{s}$$

$$P_p = 20,13 \text{ T} = 201 \text{ kN.} \quad P_m = 0,04 \text{ T} = 0,4 \text{ kN}$$

$$R_p = 110 \text{ m.} \quad R_m = 9,73 \text{ m}$$

$$Z_{pp} = 0,16 \text{ m.} \quad Z_{pm} = 0,015$$

$$V_p(+10) = 19,44 \frac{m}{s} \quad V_m(+10) = 4,16 \frac{m}{s}$$

$$I = \frac{0,134 \cdot 4,16^2}{9,81 \cdot 9,73} - 0,015 = 0,0093 \text{ m}$$

$$H = 1,2 \cdot \frac{0,4 \cdot 0,0093}{0,134} + \frac{0,4 \cdot 15,004}{1000} = 0,039 \text{ kN}$$

$$L = 0,85 \cdot \left(10 + \frac{0,4}{3}\right) = 8,61 \text{ kN}$$

$$H < L \quad \text{CUMPLE}$$

CAPÍTULO V: VALORACIÓN ECONÓMICA

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Analisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 01 ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN									
01.01	m. CAJÓN DE HORMIGÓN PREFABRICADO Cajón prefabricado de hormigón armado de 10 cm de espesor, de 120 cm de ancho y alas de 10 cm de altura, en piezas de 150 cm de longitud, ejecutado con hormigón HA-25/P/20/1, i/p.p. de encofrado, desencofrado, vertido, vibrado, curado y armadura de reparto de #150x150x6 mm, apoyado sobre plataforma ejecutada con arido similar al de la cubierta, con ayuda de grúa telescópica para montaje, terminado según, EHE-08 y CTE. Medida la longitud ejecutada.								
	Trazado de cajones	1	142,05			142,05			
							142,05	18,08	2.568,26
01.02	ud TRAVIESA DE HORMIGÓN PREFABRICADO Traviesa prefabricada de hormigón armado HA-25/B/10/Ila de sección 22x27 mm y 230 mm de longitud, i/transporte, armado, encofrado y desencofrado, vertido, vibrado, curado de hormigón, totalmente terminada. Según EHE-08 y CTE.								
		2680				2.680,00			
							2.680,00	1,23	3.296,40
TOTAL CAPÍTULO 01 ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN.....									5.864,66

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Analisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 02 BALASTO									
02.01	m3 RELLENO DE CAJON CON BALASTO 4/13 mm. Relleno de cajón con balasto seleccionado 4/13 mm, incluso extendido y rasanteado, totalmente terminado. Medido el volumen ejecutado.								
		1	60,22	0,05		3,01			
							3,01	59,22	178,25
TOTAL CAPÍTULO 02 BALASTO.....									178,25

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

Analisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 03 ACERO									
03.01	kg ACERO S275 JR EN ESTRUCTURA ATORNILLADA Acero laminado S275 JR, en perfiles laminados en caliente para carril mediante uniones atornilladas; i/p.p. de tornillos calibrados, placas de asiento, cortes, piezas especiales, despuntes, montado y colocado según detalle, NTE-EAS, CTE-DB-SE-A y EAE.								
	Carril exterior	1	148,69		1,57	233,44			
	Carril interior	1	147,84		1,57	232,11			
							465,55	2,44	1.135,94
TOTAL CAPÍTULO 03 ACERO.....									1.135,94
TOTAL.....									7.178,85

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	RESUMEN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
CAPÍTULO 01 ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN						
01.01	m.		CAJÓN DE HORMIGÓN PREFABRICADO Cajón prefabricado de hormigón armado de 10 cm de espesor, de 120 cm de ancho y alas de 10 cm de altura, en piezas de 150 cm de longitud, ejecutado con hormigón HA-25/P/20/I, i/p.p. de encofrado, desencofrado, vertido, vibrado, curado y armadura de reparo de #150x150x6 mm, apoyado sobre plataforma ejecutada con arido similar al de la cubierta, con ayuda de grúa telescópica para montaje, terminado según, EHE-08 y CTE. Medida la longitud ejecutada.			
O01OA090	0,100	h	Cuadrilla A	46,30	4,63	
P01HA240	0,052	m3	Hormigón HA-25/P/20/I central	67,02	3,49	
P03AM080	1,100	m2	Malla electrosoldada #150x150x6 mm	1,55	1,71	
E05HFE020	0,400	m2	ENCOFRADO PLACA PREFABRICADA	7,48	2,99	
P01AG050	0,100	m3	Gravilla 20/40 mm	20,01	2,00	
M02GE200	0,036	h	Grúa telescópica s/camión 36-50 t	90,58	3,26	
TOTAL PARTIDA.....						18,08

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de DIECIOCHO EUROS con OCHO CÉNTIMOS

01.02	ud		TRAVIESA DE HORMIGÓN PREFABRICADO Traviesa prefabricada de hormigón armado HA-25/B/10/I/IIa de sección 22x27 mm y 230 mm de longitud, i/transporte, armado, encofrado y desencofrado, vertido, vibrado, curado de hormigón, totalmente terminada. Según EHE-08 y CTE.			
O01OA020	0,020	h	Capataz	19,65	0,39	
O01OA030	0,020	h	Oficial primera	20,00	0,40	
O01OA060	0,020	h	Peón especializado	17,12	0,34	
P03ACC090	0,030	kg	Acero corrugado B 500 S/SD prefabricado	0,86	0,03	
P01HA070	0,001	m3	Hormigón HA-25/B/10/IIa central	67,52	0,07	
TOTAL PARTIDA.....						1,23

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de UN EUROS con VEINTITRES CÉNTIMOS

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	RESUMEN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
CAPÍTULO 02 BALASTO						
02.01	m3		RELLENO DE CAJON CON BALASTO 4/13 mm. Relleno de cajón con balasto seleccionado 4/13 mm, incluso extendido y rasanteado, totalmente terminado. Medido el volumen ejecutado.			
O01OA020	0,100	h	Capataz	19,65	1,97	
O01OA070	0,800	h	Peón ordinario	17,00	13,60	
P01AG105	1,050	m3	Gravilla seleccionada 4/13 mm	20,00	21,00	
M02GE200	0,250	h	Grúa telescópica s/camión 36-50 t	90,58	22,65	
TOTAL PARTIDA.....						59,22

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de CINCUENTA Y NUEVE EUROS con VEINTIDOS CÉNTIMOS

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	RESUMEN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
CAPÍTULO 03 ACERO						
03.01	kg		ACERO S275 JR EN ESTRUCTURA ATORNILLADA Acero laminado S275 JR, en perfiles laminados en caliente para camil mediante uniones atornilladas; i/p.p. de tornillos calibrados, placas de asiento, cortes, piezas especiales, despuntes, montado y colocado según detalle, NTE-EAS, CTE-DB-SE-A y EAE.			
O01OB130	0,030	h	Oficial 1º cerrajero	19,09	0,57	
O01OB140	0,030	h	Ayudante cerrajero	17,95	0,54	
P03ALP010	1,050	kg	Acero laminado S 275 JR	0,99	1,04	
M02GE200	0,001	h	Grúa telescópica s/camión 36-50 t	90,58	0,09	
P01DW090	0,150	u	Pequeño material	1,35	0,20	
TOTAL PARTIDA.....						2,44

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de DOS EUROS con CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria.

CAPITULO	RESUMEN	EUROS
1	ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN.....	5.864,66
2	BALASTO.....	178,25
3	ACERO.....	1.135,94
	TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	7.178,85
	13,00% Gastos generales..... 933,25	
	6,00% Beneficio industrial..... 430,73	
	SUMA DE G.G. y B.I.	1.363,98
	21,00% I.V.A.....	1.793,99
	TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA	10.336,82
	TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	10.336,82

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de DIEZ MIL TRESCIENTOS TREINTA Y SEIS EUROS con OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Se ha desarrollado en este Estudio Técnico el diseño de un modelo de trazado de ferrocarril para ensayos de laboratorio en una de las cubiertas de los tres edificios que componen el Campus Científico – Tecnológico de Linares.

Para ello, ha sido necesario ceñirse a unos rigurosos valores que nos permitan trabajar desde la semejanza dinámica. Es por ello que se han establecido tres magnitudes físicas de origen que, relacionándose entre ellas nos darán todos los factores necesarios. La primera de ellas, la geométrica, viene definida por el ancho de vía escogido de 127 mm, ancho de vía para el que fue diseñado el modelo de locomotora y que comparado con el ancho de vía internacional de 1435 mm nos arroja un factor de longitud de 11,3. La segunda magnitud ha sido la de masa, definida por la masa del eje de acero de nuestro modelo de vehículo construido con un factor de escala de 11,3 y que su valor es de 2,02 kg tras añadir peso extra a los ejes para reducir el factor de escala de masa. Relacionando la masa del eje del modelo con la masa del eje de nuestro prototipo, Metrô-Ligero ML95, y que tiene un valor de 1109 kg, nos aporta un factor de masa de 550. Por último, la tercera magnitud física establecida ha sido la de velocidad. De nuevo, ésta ha estado determinada por la velocidad máxima alcanzable de nuestro modelo, 2,5 m/s, que frente a los 30 m/s del prototipo ML95, nos define un factor de velocidad de 12.

Se han estudiado las distintas cubiertas de los edificios que componen el campus, para determinar la mejor localización para nuestras instalaciones. Tras un estudio donde se ha valorado el espacio disponible y la operatividad, se ha determinado que la mejor opción ha sido la de la cubierta del edificio de Laboratorios Oeste.

Tras elegir la cubierta para nuestro modelo y establecer una semejanza dinámica entre modelo y prototipo, se han diseñado varias alternativas de trazado que se ajusten a las limitaciones establecidas por la normativa de ADIF y al espacio disponible. Después de diseñar un trazado abierto y uno cerrado cumpliendo ambas condiciones de normativa y espacio, se ha determinado que la mejor opción es la de un trazado cerrado de 148,6 m de longitud. Para diseñar este trazado ha sido necesario establecer radios muy pequeños, lo que nos ha obligado a reducir la velocidad del vehículo en curva a 1,39 m/s, pese a los 2,5 m/s de velocidad máxima. También ha sido necesario ajustar el peralte a 15mm, máximo para poder afrontar dichos radios.

Uno de los mayores retos ha sido diseñar un sistema que nos permita realizar en el mismo trazado dos tramos distintos, uno de vía en placa y otro de vía en balasto. Para este problema, se ha desarrollado un sistema de cajones prefabricados de hormigón con forma de U, que colocados en su posición natural nos permite dar cobijo al tramo de vía en balasto y colocados de forma invertida en posición de Π nos da el soporte para la vía en placa. Ha sido necesario diseñar dos cajones distintos, unos para tramo recto y otros para tramo curvo de radio fijo que es universal para las cuatro curvas del trazado.

De tal forma que el Presupuesto de Ejecución por Contrata asciende a la cantidad de 10.336,82€.

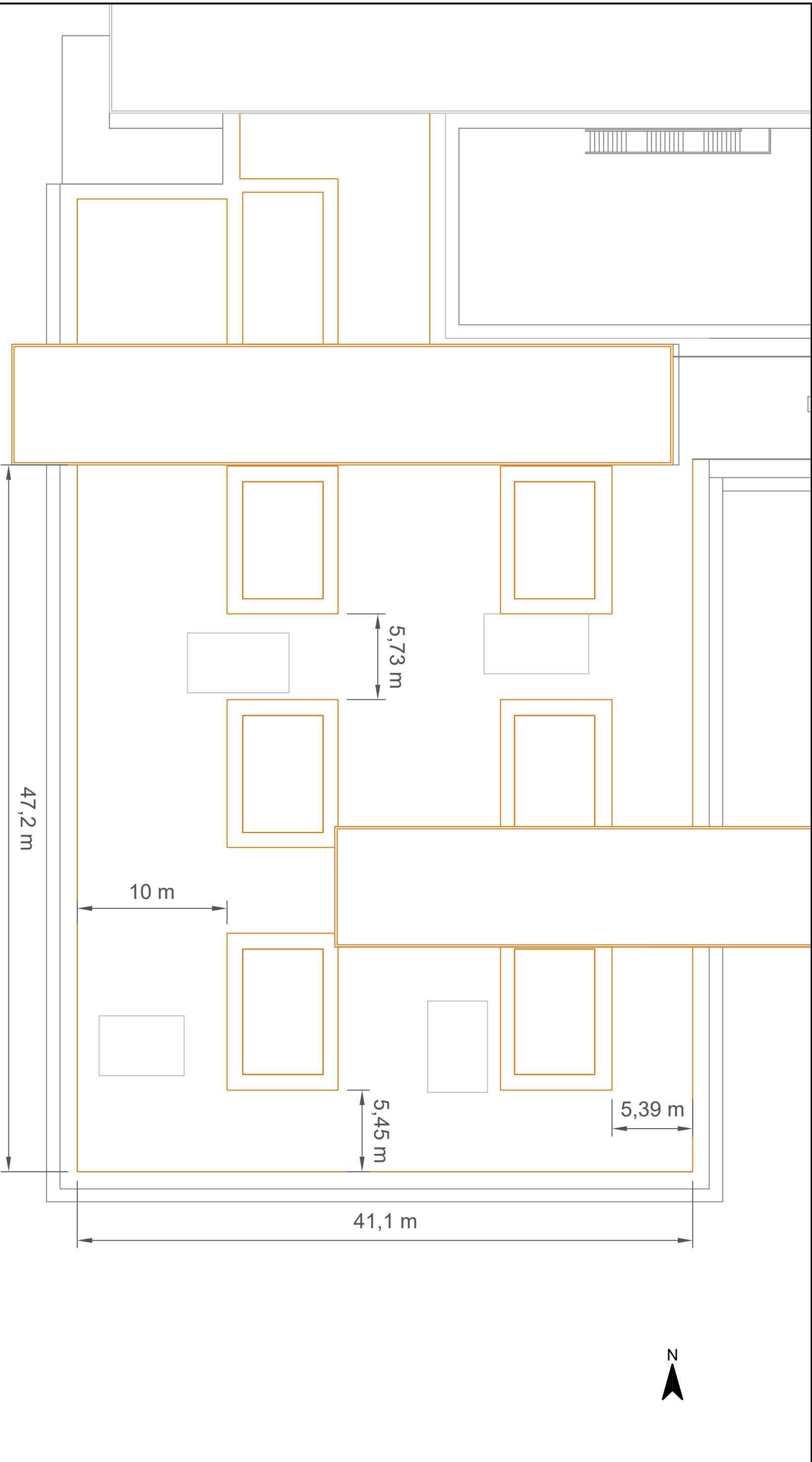
Gracias a que se ha trabajado desde la semejanza geométrica y dinámica, el trazado del modelo se ha realizado acorde a la normativa vigente para trazados de prototipos. Esto me ha permitido trabajar aplicando los conocimientos adquiridos en la asignatura de Ferrocarriles y usando la normativa de ADIF. Por otra parte, ha sido un reto trabajar con un modelo, pues adentrarme en temas de análisis dimensional me ha demostrado lo complejo pero fascinante que es el mundo de la investigación y experimentación.

Ya que no ha sido una temática abordada con frecuencia, me he enfrentado a un problema de ingeniería real donde podríamos decir que actualmente no hay nada escrito. Si que el mundo del modelismo en ferrocarriles es muy famoso, pero no con este nivel de semejanza a la vida real. Por tanto, la búsqueda de información ha sido todo un proceso de investigación, y desarrollar un sistema de ferrocarril como el que aquí he tratado ha necesitado mucha dedicación.

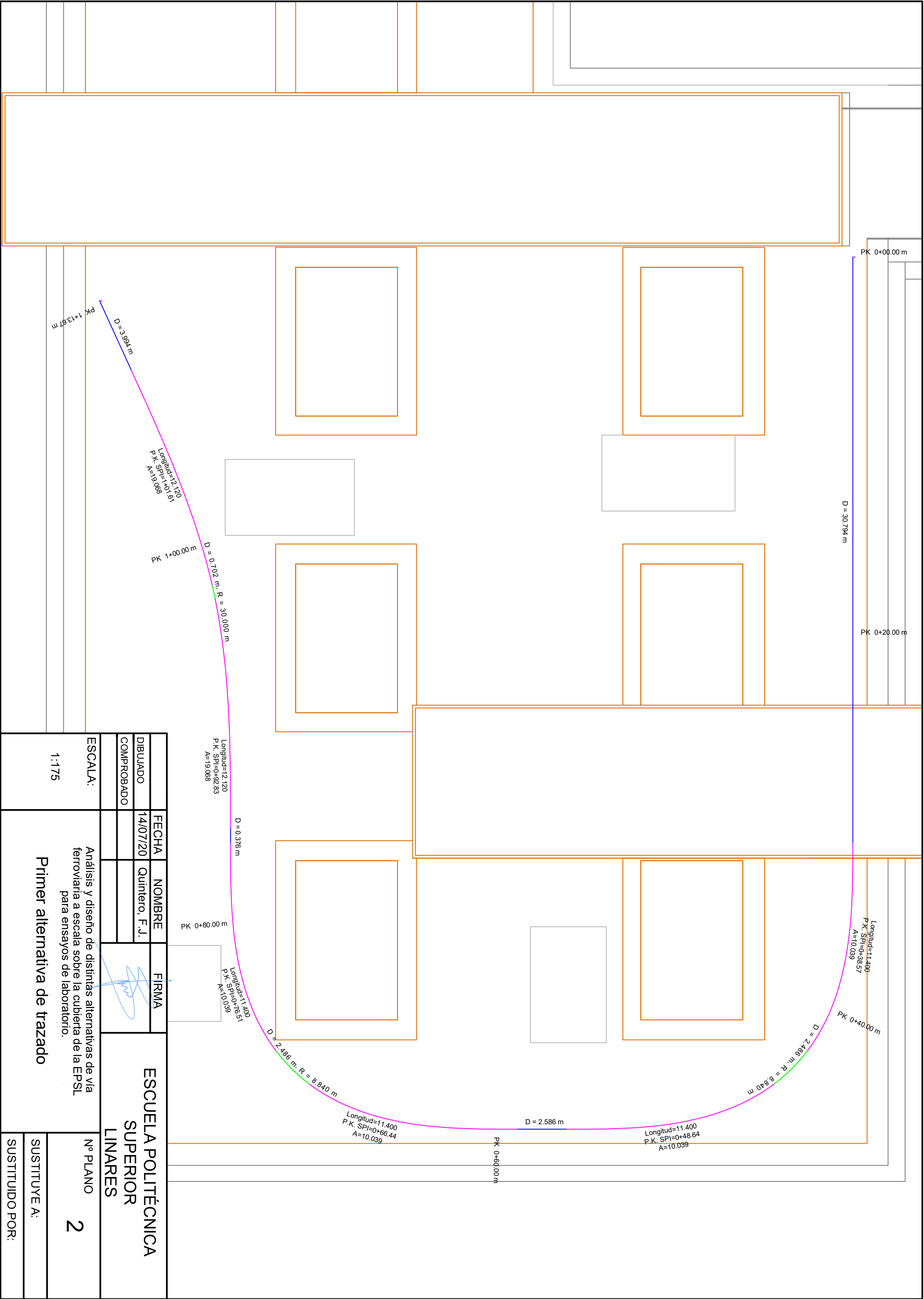
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

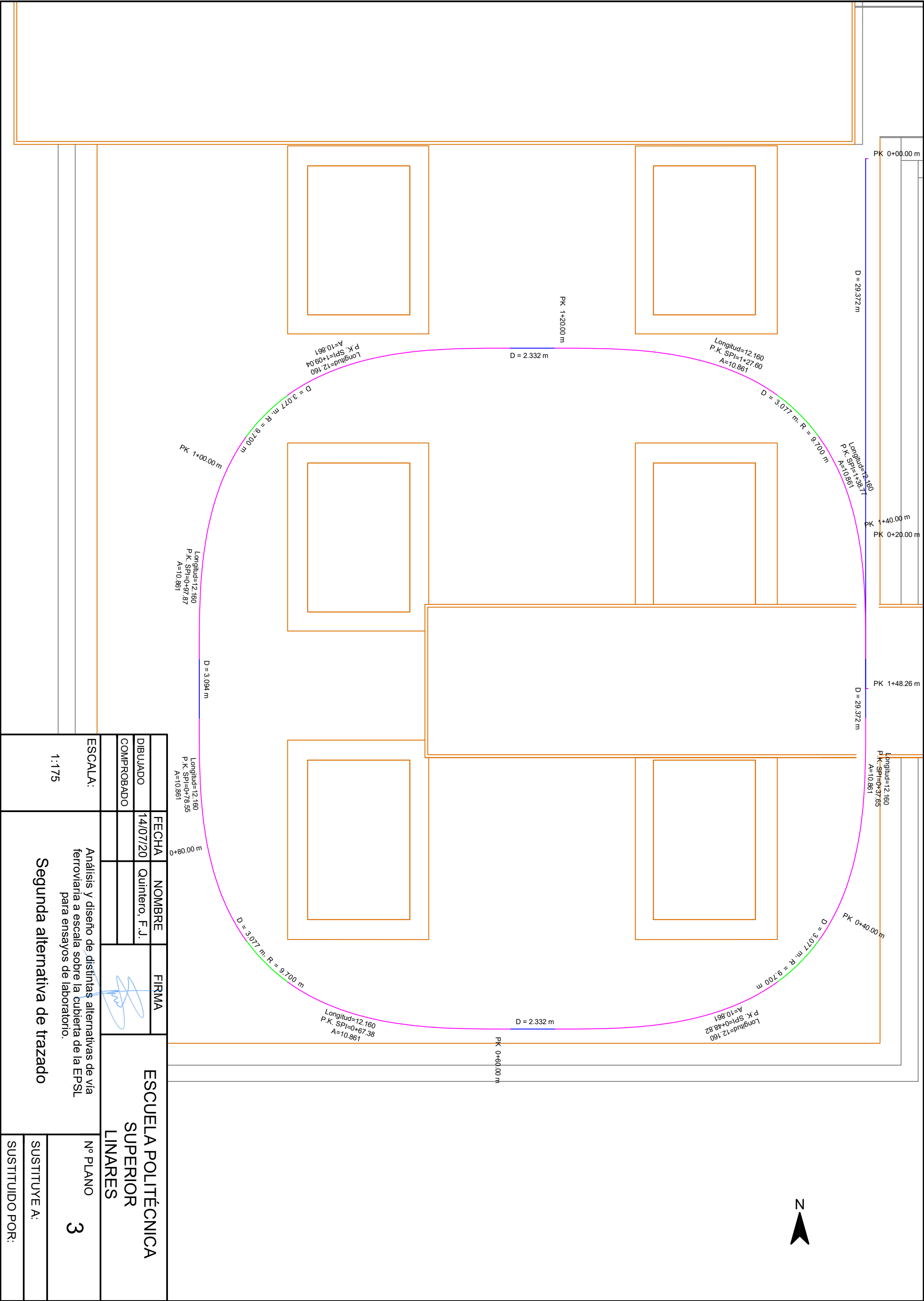
- Calvo, F., Lorente, J., Jurado, R., de Oña, J. (2015). Ingeniería de ferrocarriles. Granada. Editorial Técnica AVICAM.
- ADIF (2011). IGP-3 Instrucciones y recomendaciones sobre trazado.
- Elói de Jesus, J. (2004). A multibody methodology for railway dynamics applications. (Doctorado). Universidad Técnica de Lisboa.
- López, A.(2006). Infraestructuras ferroviarias. Barcelona. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, S.L.
- Melis, M., González, F. (2002). Ferrocarriles metropolitanos. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- EADIC (12 de Julio de 2016). Dinámica ferroviaria, un área de conocimiento fundamental para el diseño ferroviario. Escuela Abierta de Ingeniería y Construcción.
- Arcelor Mittal. General rail catalogue.
- TomTom Open Street Maps
- www.ferropedia.es
- www.renfe.es
- www.construblogspain.wordpress.com
- www.railstory.com
- www.comofunconanlostrenes.blogspot.com
- www.miniaturerailwaysupply.com
- www.zyrail.com

CAPÍTULO VIII: ANEXOS

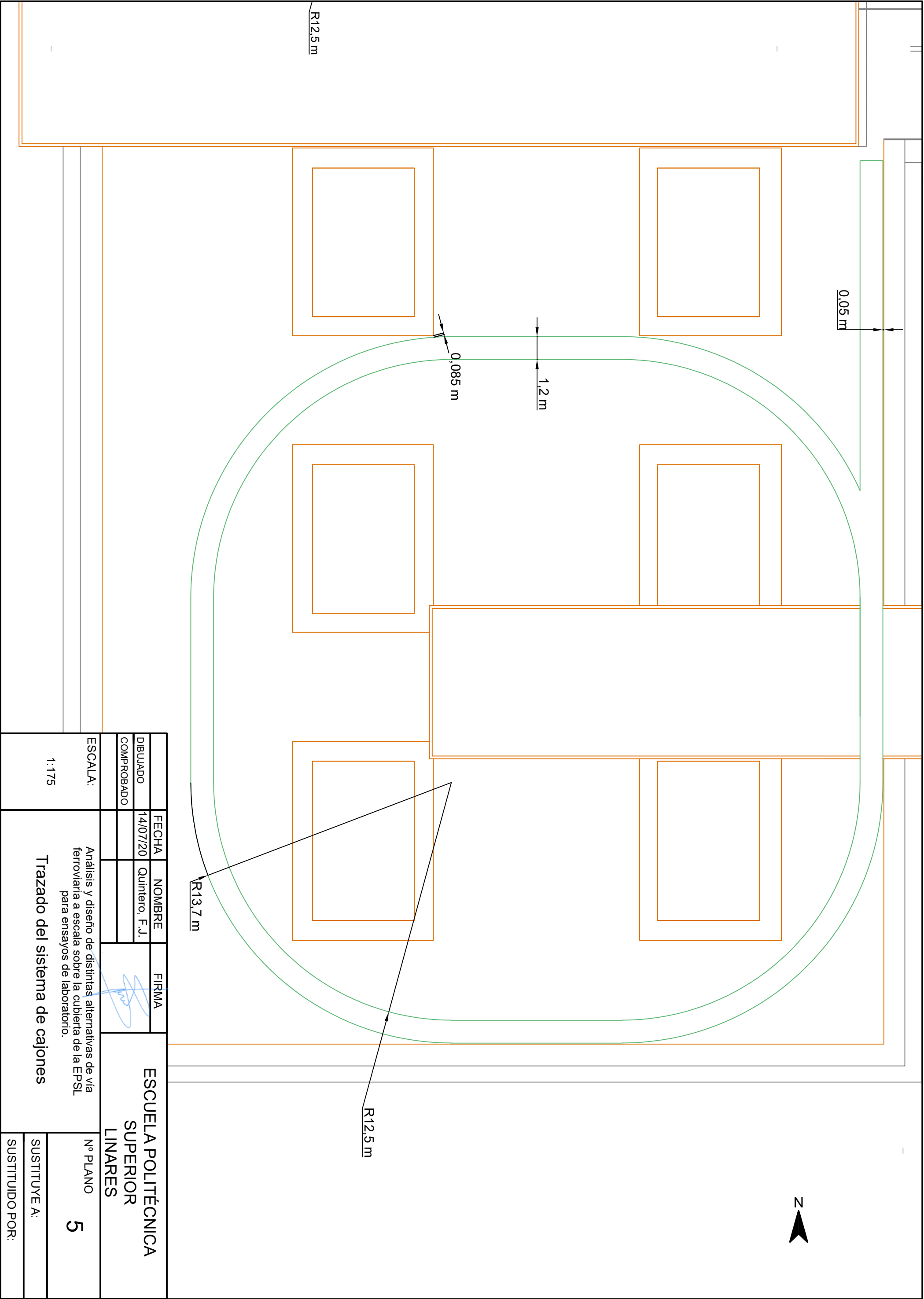


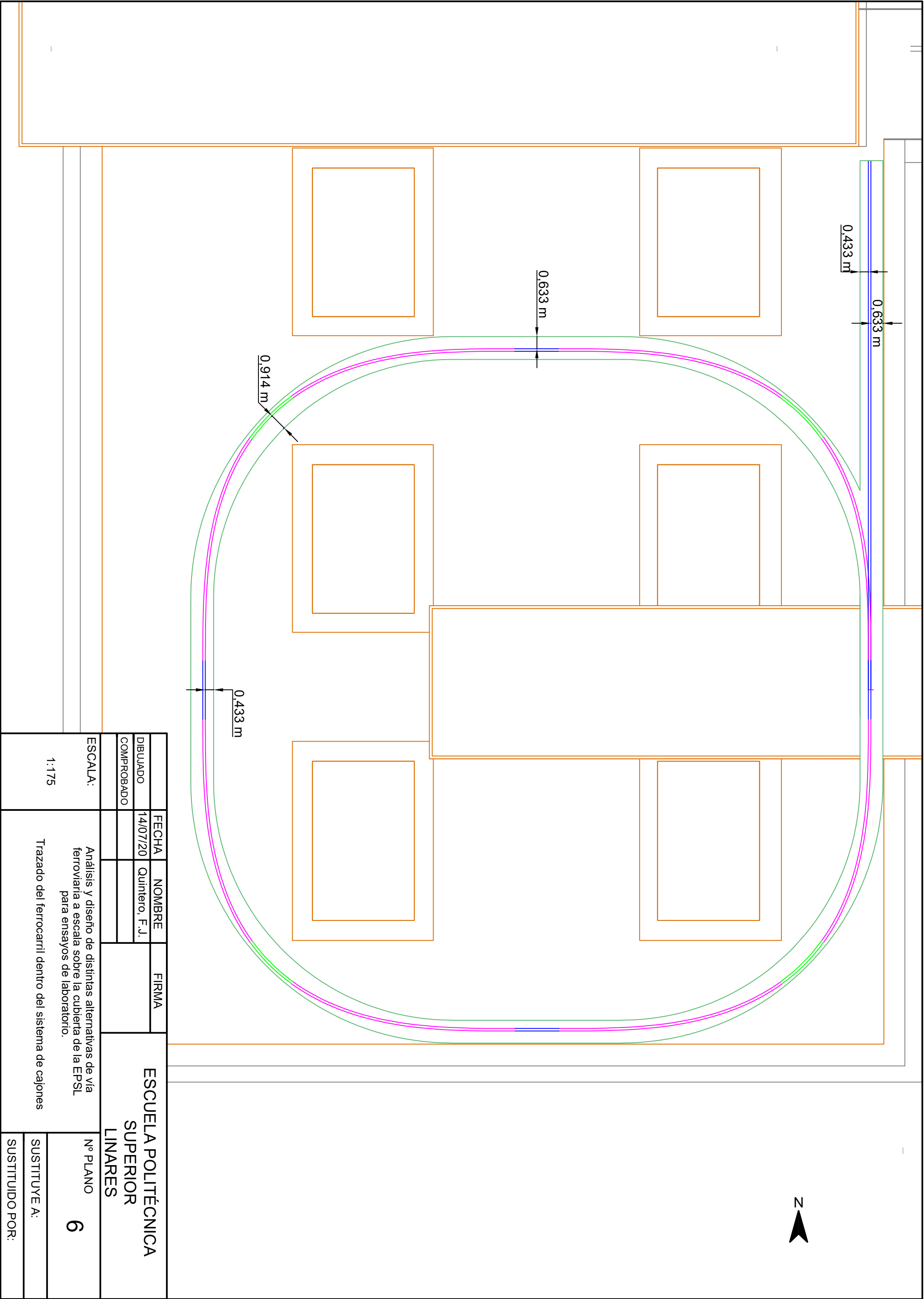
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	14/07/20	Quintero, F.J.		
COMPROBADO				
ESCALA:	Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria a escala sobre la cubierta de la EPSL para ensayos de laboratorio.			Nº PLANO
1:250	Cubierta de Laboratorios Oeste			1
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



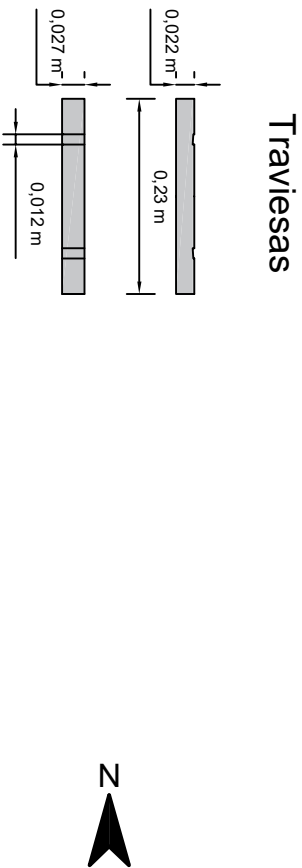
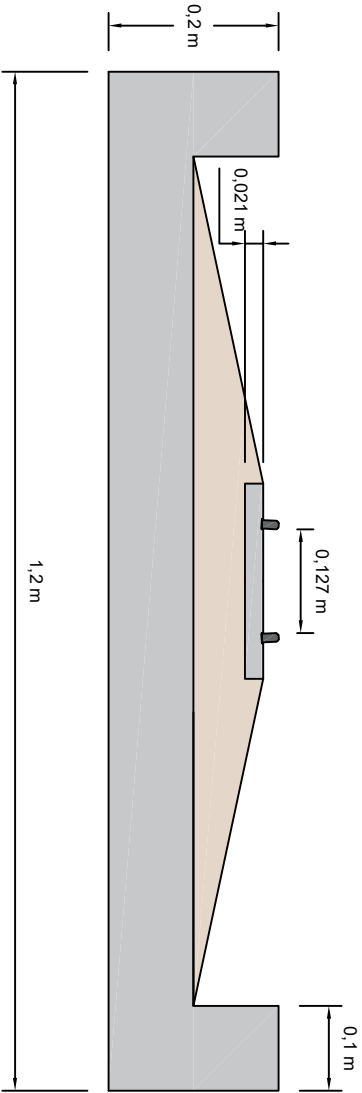


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES		
	14/07/20	Quintero, F.J.				
DIBUJADO						
COMPROBADO						
ESCALA:				Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria a escala sobre la cubierta de la EPSL para ensayos de laboratorio.		
1:175						
Segunda alternativa de trazado				Nº PLANO		
				3		
				SUSTITUYE A:		
				SUSTITUIDO POR:		

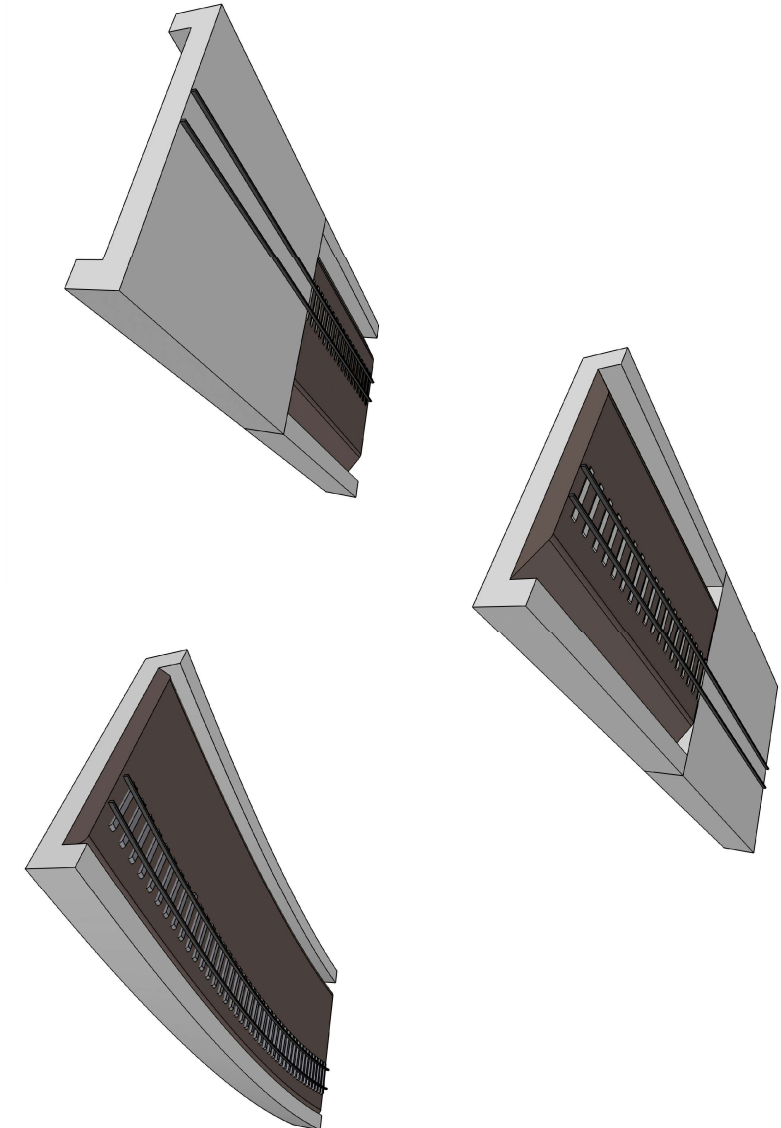
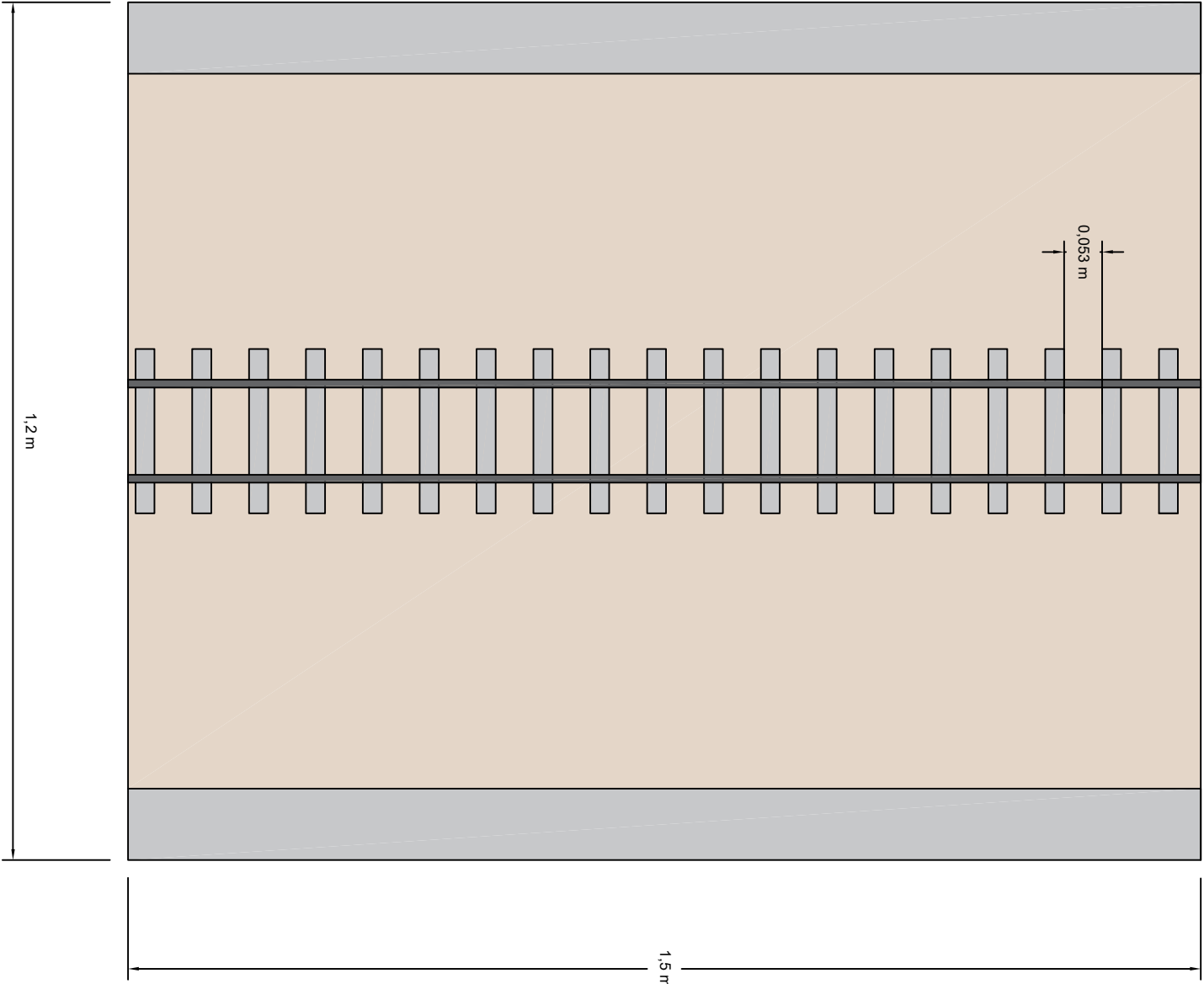




ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES				FIRMA		FECHA		NOMBRE	
						14/07/20		Quintero, F.J.	
COMPROBADO									
ESCALA:		Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria a escala sobre la cubierta de la EPSL para ensayos de laboratorio.							
1:175		Trazado del ferrocarril dentro del sistema de cajones							
		Nº PLANO 6							
		SUSTITUYE A:							
		SUSTITUIDO POR:							



Sistema de cajones

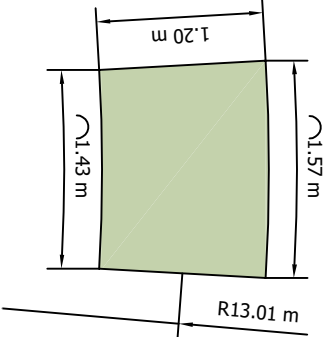


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES			
DIBUJADO	14/07/20	Quintero, F.J.					
COMPROBADO							
ESCALA:	Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria a escala sobre la cubierta de la EPSL para ensayos de laboratorio.			Nº PLANO	8		
Sistema de cajones y traviesas				SUSTITUYE A:			
				SUSTITUIDO POR:			

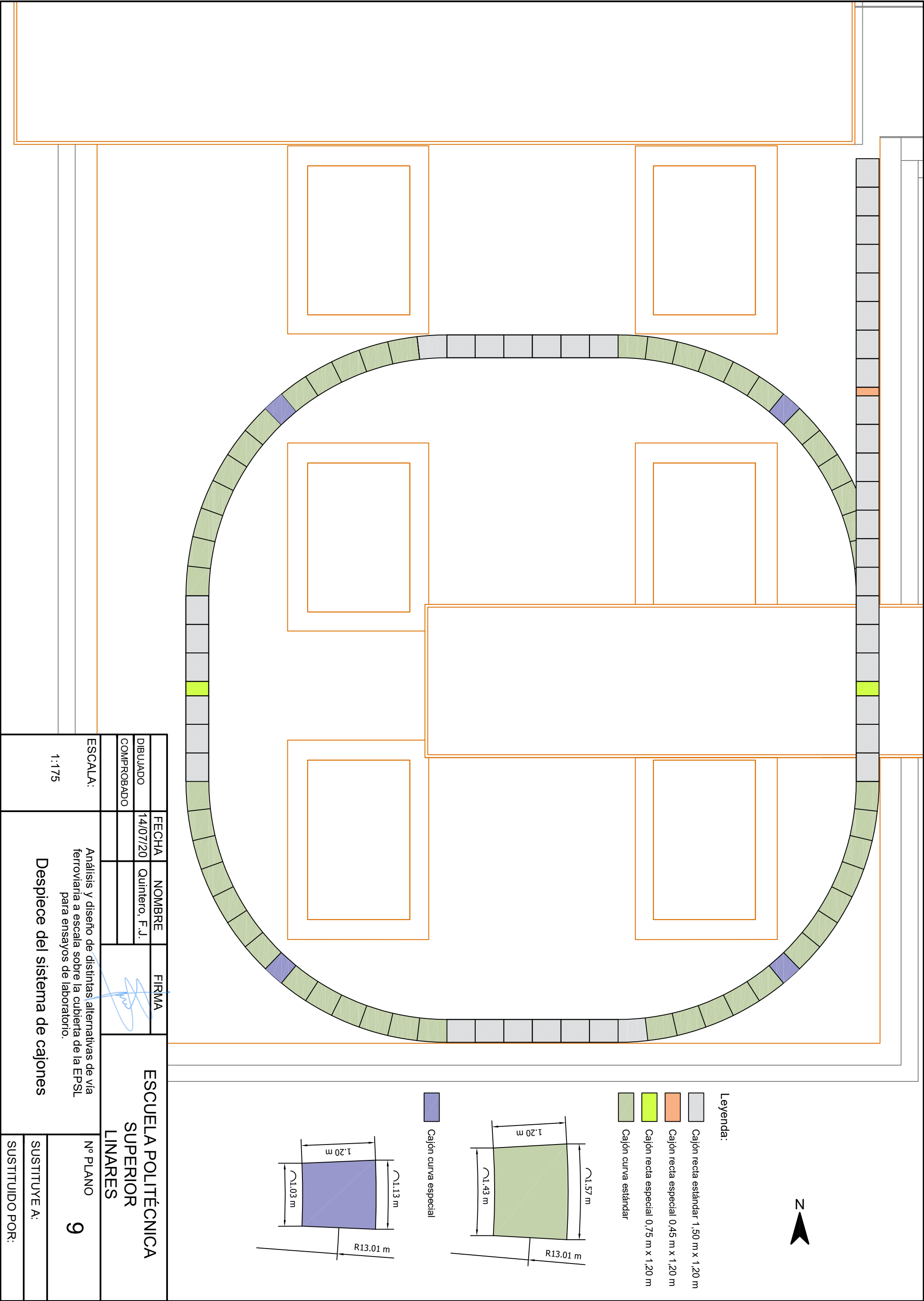
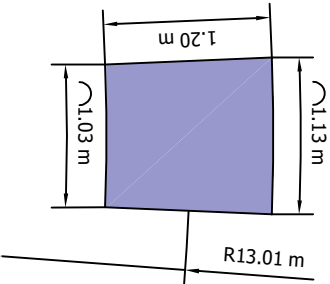


Legenda:

- Cajón recta estándar 1,50 m x 1,20 m
- Cajón recta especial 0,45 m x 1,20 m
- Cajón recta especial 0,75 m x 1,20 m
- Cajón curva estándar



Cajón curva especial



FECHA		NOMBRE		FIRMA		ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO		14/07/20		Quintero, F.J.			
COMPROBADO							
ESCALA:		Análisis y diseño de distintas alternativas de vía ferroviaria a escala sobre la cubierta de la EPSL para ensayos de laboratorio.					
1:175		Despiece del sistema de cajones					
Nº PLANO		9					
SUSTITUYE A:							
SUSTITUIDO POR:							