

# NORMATIVA TÉCNICA BÁSICA DE VÍA DE METRO DE MADRID 1ª Fase



**Documento Técnico: Geometría de Vía.**



Metro de Madrid, S.A.

**Unidad de Obra Civil**  
Gerencia de Ingeniería  
de Mantenimiento



NA/C.03.025E - Febrero de 2004



---

**DOCUMENTO TÉCNICO  
GEOMETRÍA DE VÍA**

---

**Documento N°: MM-DT-0-01**

**Edición: 0**

**Fecha: Febrero 2004**



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1 EXPOSICIÓN GENERAL.....	3
1.2 OBJETO DEL DOCUMENTO.....	3
1.3 PARÁMETROS UTILIZADOS.....	3
<b>2. PARÁMETROS DE GEOMETRÍA DE VÍA.....</b>	<b>5</b>
2.1 CONSIDERACIONES GENERALES .....	5
2.2 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS.....	5
2.3 TOLERANCIAS.....	7
<b>3. TRAZADO EN PLANTA.....</b>	<b>8</b>
3.1 CONSIDERACIONES GENERALES .....	8
3.2 DATOS DE PARTIDA .....	8
3.3 ESTUDIO DEL PERALTE.....	9
3.3.1 Conveniencia del peralte.....	9
3.3.2 Análisis de la velocidad, peralte e insuficiencia en curvas circulares.....	10
3.3.3 Ley de variación de la insuficiencia de peralte.....	12
3.3.4 Ley de variación de velocidad.....	12
3.3.5 Aceleración no compensada sobre el viajero .....	13
3.3.6 Leyes de variación para una aceleración transversal no compensada nula ...	13
3.4 LONGITUD DE LA TRANSICIÓN.....	15
3.4.1 Consideraciones generales.....	15
3.4.2 Longitud de curva de transición por confort del viajero .....	15
3.4.3 Longitud de la curva de transición por limitación geométrica .....	16
3.4.4 Longitud de la curva de transición por limitación dinámica .....	16
3.5 APLICACIÓN A METRO DE MADRID.....	17
3.5.1 Consideraciones generales.....	17
3.5.2 Longitudes mínimas de trazado en planta.....	17
3.5.3 Valores de los parámetros con la $a_{tnc} = 0,65 \text{ m/s}^2$ .....	18
3.5.4 Valores de los parámetros con la $a_{tnc} = 0 \text{ m/s}^2$ .....	26



<b>4. TRAZADO EN ALZADO</b> .....	<b>32</b>
4.1 CONSIDERACIONES GENERALES .....	32
4.2 RASANTES.....	32
4.3 CURVAS DE ACUERDO .....	33
4.3.1 Generalidades.....	33
4.3.2 Acuerdo parabólico .....	33
4.4 APLICACIÓN A METRO DE MADRID.....	34
4.4.1 Pendientes admisibles .....	34
4.4.2 Longitud mínima de pendiente constante.....	34
4.4.3 Aceleración vertical normal y máxima.....	34
4.4.4 Parámetros de la parábola .....	35
4.4.5 Longitud del acuerdo vertical .....	35
<b>5. RELACIÓN ENTRE LA PLANTA Y EL ALZADO</b> .....	<b>35</b>
5.1 Consideraciones en vía general .....	35
5.2 Consideraciones para aparatos de vía .....	35
5.3 Consideraciones para estructuras.....	35
<b>6. NORMATIVA DE REFERENCIA</b> .....	<b>36</b>
<b>7. DEFINICIONES</b> .....	<b>36</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>38</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 EXPOSICIÓN GENERAL

El proyecto de trazado de una nueva vía de metro deberá combinar las alineaciones en planta y en alzado, teniendo en cuenta la disposición de la sección transversal. El objetivo es hacer posible, en condiciones óptimas de seguridad y estabilidad, el mantenimiento simultáneo de las circulaciones a la velocidad específica establecida.

En las líneas de Metro de Madrid es fundamental el estudio de las reacciones que repercuten en los viajeros, para tratar de minimizar las fuerzas que se originan en los cambios de las alineaciones y que afecten, en la menor medida posible, a su comodidad. Esto no sólo depende de la calidad de la vía y de su mantenimiento, sino también de las características del material rodante.

En el proyecto de cualquier trazado ferroviario se han de considerar condicionantes técnicos, económicos y ambientales. La trascendencia económica de la geometría de los trazados resultará fundamental para la optimización de la solución.

## 1.2 OBJETO DEL DOCUMENTO

Es objeto del presente documento establecer las velocidades de paso de las circulaciones de los trenes, la disposición de las curvas circulares, el establecimiento de la longitud de las curvas de transición, etc, en función de los diferentes parámetros de diseño que establece Metro de Madrid.

Es igualmente objeto, definir los parámetros geométricos más importantes y sus tolerancias en la recepción de vía nueva sin balasto.

## 1.3 PARÁMETROS UTILIZADOS

$v$ : velocidad (m/s)

$V$ : velocidad (km/h)

$R$ : radio de la curva (m)

$h$ : peralte real de la curva (mm)



$i$ : insuficiencia de peralte (mm)

$e$ : exceso de peralte (mm)

$w$ : distancia entre ejes de carriles (mm)

$\alpha_{ncr}$ : aceleración no compensada real que sufre el viajero ( $m/s^2$ )

$s$ : coeficiente de flexibilidad del material rodante

$j$ : variación máxima de la aceleración transversal no compensada ( $m/s^3$ )

$$a_t = \frac{v^2}{R} : \text{aceleración transversal (m/s}^2\text{)}$$

$$a_{ic} = \frac{h \cdot g}{w} : \text{aceleración transversal compensada (m/s}^2\text{)}$$

$$a_{mc} = \frac{i \cdot g}{w} : \text{aceleración transversal no compensada debido a la insuficiencia de peralte (m/s}^2\text{)}$$

$$a_{mc} = \frac{e \cdot g}{w} : \text{aceleración transversal no compensada debido al exceso de peralte (m/s}^2\text{)}$$

$L_{ct}$ : longitud mínima de la curva de transición (m)

$L_{tp}$ : longitud mínima de transición del peralte (m)

$(v_v)_{max}$ : velocidad máxima vertical (mm/s)

$(r_h)_{max}$ : rampa máxima de peralte (mm/m)

$r$ : rampa ficticia (‰)

$p$ : pendiente real en el tramo en curva (‰)

$a_{cv}$ : aceleración centrífuga vertical ( $m/s^2$ )

$R_{cv}$ : radio del acuerdo vertical (m)

$K_v$ : radio de la circunferencia osculatriz de la parábola del acuerdo vertical



## 2. PARÁMETROS DE GEOMETRÍA DE VÍA

### 2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Para las obras de construcción de vía nueva, se hace necesario especificar los requisitos y las tolerancias permitidas para la recepción de los trabajos. En la presente Norma se definen las exigencias mínimas para los principales parámetros geométricos de la vía que caracterizan la calidad geométrica de la misma.

Estas tolerancias comprenden el ancho de la vía, la nivelación longitudinal, la alineación, el peralte y el alabeo. Deberán constar en los proyectos de construcción y cumplirse en todas las obras que se realicen.

### 2.2 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS

**Ancho de vía:** distancia entre las caras activas de las dos filas de carril medida a una distancia  $Z$  por debajo de la superficie de rodadura.

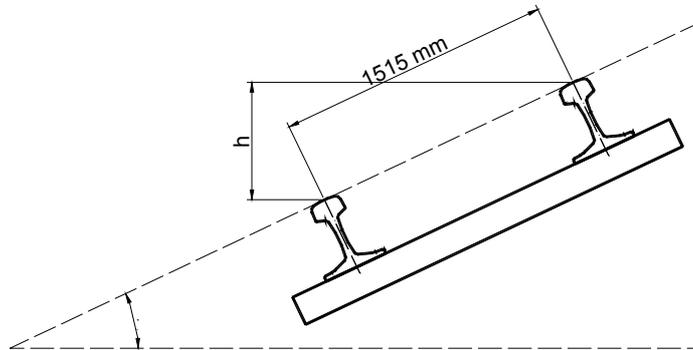
El valor de  $Z$  debe ser igual a  $14 \pm 1$  para un carril nuevo.



**Figura 1:** Medida del ancho de vía

**Peralte:** diferencia, en el sentido vertical, entre las tablas de rodadura adyacentes, calculada a partir del ángulo entre la superficie de rodadura y un plano horizontal de referencia. El peralte se expresa como la altura del lado vertical del triángulo rectángulo que tiene una hipotenusa representando el ancho de vía nominal, al que se añade el ancho de la cabeza del carril redondeado a los 10 mm más cercanos.

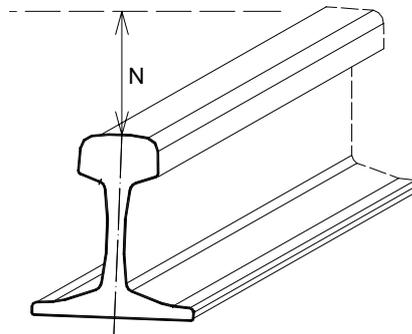
El peralte se determina midiendo el ángulo entre la superficie de rodadura y el plano horizontal de referencia o bien la diferencia en el sentido vertical entre las dos tablas de rodadura. La medida se efectúa en mm.



**Figura 2:** Medida del peralte

**Nivelación longitudinal:** parámetro que define la cota de la superficie de rodadura de un hilo de la vía, referida a un plano de comparación.

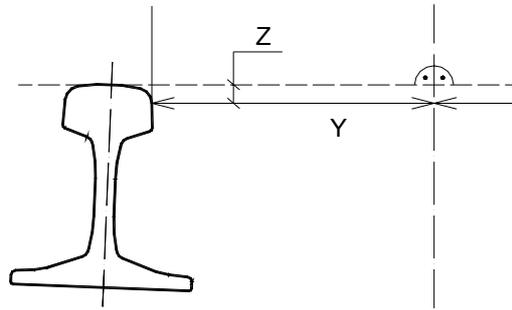
Se realiza midiendo la variación  $N$  de las altitudes consecutivas de la tabla de rodadura de cada fila de carril expresada como una desviación en relación a la posición vertical media (línea de referencia). La medida se realiza en mm.



**Figura 3:** Medida de la nivelación longitudinal

**Alineación:** distancia entre el eje de la vía real y la línea ideal de referencia dada.

Es la desviación, en posición horizontal,  $y$ , del carril con respecto a una línea de referencia. Se mide a una distancia  $Z$  bajo la superficie de rodadura, igual a la definida para la medida del ancho de vía, de  $14 \pm 1$  (ver figura 4). Se expresa en mm.



**Figura 4:** Medida de la alineación

**Alabeo:** distancia del punto de la superficie de rodadura del carril de una vía, donde debía apoyar la cuarta rueda de un vehículo, al plano determinado por los tres puntos de apoyo de las otras ruedas en los carriles.

Se mide determinando la diferencia algebraica entre dos valores de peralte medidos a una distancia dada, expresada habitualmente como un gradiente entre los dos puntos de medida. Se suele expresar en mm/m.

### 2.3 TOLERANCIAS

Para la recepción de la vía, deberán cumplirse las tolerancias mostradas en la tabla siguiente:

Parámetros	Tolerancias
Ancho de vía (mm)	-0, +2
Peralte	-2, +2
Nivelación longitudinal (mm) (cuerda de 10 m)	-2, +2
Alineación (cuerda de 10 m)	-3, +3
Alabeo (referido a 3 m)	-2, +2



## 3. TRAZADO EN PLANTA

### 3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El trazado en planta de la vía queda definido por una serie de alineaciones rectas, enlazadas mediante curvas de diferente tipología. Las curvas se definirán por el radio de curvatura  $R$ .

La conexión entre alineaciones rectas se realizará mediante curvas de radio constante o variable, y el enlace entre estas curvas y las correspondientes rectas o entre curvas de distinto radio, se efectúa mediante curvas de transición. Las curvas de transición permiten el paso gradual entre el radio de la curva circular y el radio infinito de la recta, o entre dos radios de dos curvas circulares.

En general, se recomienda que las curvas de transición sean clotoides, es decir, curvas en las que la variación del radio de curvatura es constante a lo largo de toda su longitud. Las curvas de transición utilizadas en Metro de Madrid son de este tipo.

### 3.2 DATOS DE PARTIDA

Los datos de partida en el diseño tanto de las nuevas líneas de Metro de Madrid, como de sus ampliaciones serán:

- Velocidad máxima de circulación en las nuevas líneas: 110 km/h.
- Velocidad máxima de circulación en ampliación de las líneas existentes: 70 km/h.
- Peralte máximo: 150 mm.
- Aceleración transversal no compensada máxima: se realizará el cálculo para aceleración nula y para  $0,65 \text{ m/s}^2$ .
- Coeficiente de flexibilidad: varía según tipo de coche.
- Distancia entre ejes de carriles: para UIC-54, 1.515 mm.
- Velocidad vertical máxima: 50 mm/s.
- Rampa de peralte máxima: 1,5 mm/m (valor excepcional 2 mm/m).
- Sobreaceleración máxima (jerk):  $0,020g \text{ m/s}^3$ .



### 3.3 ESTUDIO DEL PERALTE

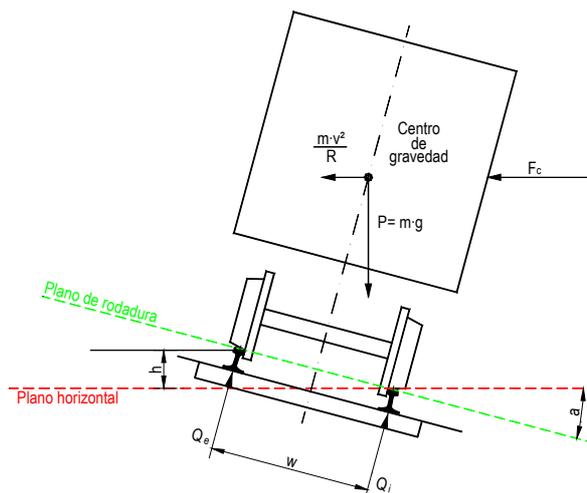
#### 3.3.1 Conveniencia del peralte

Cuando un tren circula en curva, aparece una aceleración centrífuga que provoca que el tren tienda hacia el carril exterior de la curva. Esta aceleración produce incomodidad en los viajeros, a la vez que resulta perjudicial para el material de vía, y si la velocidad es suficientemente importante, puede provocar descarrilamientos o vuelcos.

Para evitar esta acción tan desfavorable, se eleva el carril exterior una distancia  $h$  respecto al interior. Esto hace que la resultante de las fuerzas que actúan sobre el centro de gravedad del vehículo, tienda a situarse perpendicularmente al plano de la vía, llegando a compensar cualquier aceleración lateral perturbadora para la circulación.

Las razones para la implantación del peralte en curva son las siguientes:

- Limitar los esfuerzos transversales y choques a la entrada y salida de las curvas que, unidos a los movimientos de lazo, pueden producir descarrilamientos e incluso vuelcos.
- Conseguir un desgaste similar en ambos carriles, impidiendo a la vez el ripado transversal de la vía, el excesivo trabajo de los tirafondos u otras sujeciones, y la tendencia al vuelco pivotando sobre el carril exterior.
- Alcanzar mayor comodidad para los viajeros.



**Figura 5:** Esquema de fuerzas actuantes sobre el coche en curva



### 3.3.2 Análisis de la velocidad, peralte e insuficiencia en curvas circulares

Tras el estudio de la figura 5, se puede determinar cual es el peralte teórico necesario para equilibrar el efecto de la fuerza centrífuga, que aparece cuando el tren circula con una velocidad  $v$ , a partir de las ecuaciones siguientes:

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = m \cdot g \cdot \operatorname{tg} a = m \cdot g \cdot \frac{h}{w}$$

$$\frac{v^2}{R} = \frac{g \cdot h}{w}$$

$$h = \frac{v^2 \cdot w}{g \cdot R}$$

Éste peralte equilibra los efectos derivados de una velocidad dada  $v$ , que será la velocidad de proyecto del tramo de vía en estudio. Sin embargo es posible que puedan circular trenes a mayor velocidad que la de proyecto, con lo que el peralte  $h$  no será suficiente para equilibrar el sistema de fuerzas. Aparece entonces una aceleración transversal no compensada  $a_{mc}$  debido a la insuficiencia de peralte  $i$  de la curva.

$$h + i = \frac{w \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (1)$$

$$\frac{v^2}{R} = \frac{h \cdot g}{w} + \frac{i \cdot g}{w} \quad (1a)$$

Introduciendo en (1) los valores de  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  y  $w = 1.515 \text{ mm}$ , se obtiene:

$$h + i = 154,434 \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

De (1a) se obtiene:

$$a_{mc} = \frac{i \cdot g}{w} = \frac{i}{154,434} ; \quad i = a_{mc} \cdot 154,434 \quad (2a)$$

Introduciendo  $i$  en la fórmula (2):



$$h + 154,434 \cdot a_{inc} = 154,434 \cdot \frac{v^2}{R} \quad (3)$$

La variación del peralte  $h$  debe seguir una ley del tipo:

$$h = \frac{A}{R}$$

en la que la constante "A" es el producto del peralte máximo por el radio mínimo en el que se puede circular a velocidad máxima.

De la expresión (3) se puede obtener el valor del radio mínimo para el máximo valor del peralte, máxima velocidad y máxima  $a_{inc}$

$$R_{\min} = \frac{154,434 \cdot (v_{\max})^2}{h_{\max} + 154,434 \cdot (a_{inc})_{\max}} \quad (4)$$

Por lo tanto:

$$A = h_{\max} \cdot R_{\min} = h_{\max} \cdot \frac{154,434 \cdot (v_{\max})^2}{h_{\max} + 154,434 \cdot (a_{inc})_{\max}}$$

El Radio mínimo de Metro de Madrid resulta ser de 576 m, para una velocidad máxima de circulación de 110 km/h en las líneas nuevas y de 240 m para una velocidad de 70 km/h en las ampliaciones de las existentes. (El peralte máximo admisible es de 150 mm y la máxima aceleración transversal sin compensar de 0,65 m/s<sup>2</sup>).

Excepcionalmente los radios mínimos permitidos en los trazados de las líneas nuevas de Metro podrán ser de 300 m y en las ampliaciones de las existentes, de 210 m. Estos radios deberán ser cumplidamente justificados y autorizados expresamente por el Director del Proyecto.

Estos radios a velocidad máxima, producirían una aceleración transversal no compensada de:

$$150 \cdot 300 = 150 \cdot \frac{154,434 \cdot (30,56)^2}{150 + 154,434 \cdot (a_{inc})_{\max}} \quad a_{inc} = 2,14 \text{ m/s}^2$$

$$150 \cdot 210 = 150 \cdot \frac{154,434 \cdot (19,40)^2}{150 + 154,434 \cdot (a_{inc})_{\max}} \quad a_{inc} = 0,95 \text{ m/s}^2$$



Considerando la aceleración transversal no compensada máxima de  $0,65 \text{ m/s}^2$ , resulta necesario limitar la velocidad de circulación en curvas de radio reducido, con lo que se alcanza una velocidad máxima en las curvas de radio mínimo de:

$$150 \cdot 300 = 150 \cdot \frac{154,434 \cdot (v)^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} \quad v = 22,05 \text{ m/s} = 80 \text{ km/h}$$

$$150 \cdot 210 = 150 \cdot \frac{154,434 \cdot (v)^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} \quad v = 18,45 \text{ m/s} = 66 \text{ km/h}$$

La expresión de la **ley de variación del peralte** para las curvas de  $R > 576 \text{ m}$  (líneas nuevas) o  $R > 240 \text{ m}$  (ampliación existentes), en las que se circula a la velocidad máxima correspondiente, es:

$$h = \frac{A}{R} = \frac{h_{\max} \cdot 154,434 \cdot (v_{\max})^2}{h_{\max} + 154,434 \cdot (a_{inc})_{\max}} \cdot \frac{1}{R} \quad (5)$$

Para curvas de radio menor o igual a  $576 \text{ m}$  o  $240 \text{ m}$  (según vías nuevas o ampliación), el peralte será constante y de valor  $150 \text{ mm}$ .

### 3.3.3 Ley de variación de la insuficiencia de peralte

La expresión de la ley de variación de la insuficiencia de peralte para las curvas de  $R > 576 \text{ m}$  (líneas nuevas) o  $R > 240 \text{ m}$  (ampliación existentes), en las que se circula a la velocidad máxima correspondiente, se obtiene introduciendo (2) en (5):

$$i = \left[ 154,434 \cdot (v_{\max})^2 - \frac{h_{\max} \cdot 154,434 \cdot (v_{\max})^2}{h_{\max} + 154,434 \cdot (a_{inc})_{\max}} \right] \cdot \frac{1}{R} \quad (6)$$

Para curvas de radio menor o igual a  $576 \text{ m}$  o  $240 \text{ m}$  (según vías nuevas o ampliación), la insuficiencia de peralte será constante y de valor  $100 \text{ mm}$  ( $a_{inc} = 0,65 \text{ m/s}^2$ ).

### 3.3.4 Ley de variación de velocidad

La expresión de la ley de variación de velocidad para las curvas de radio menor de  $576 \text{ m}$  o  $240 \text{ m}$  (según vías nuevas o ampliación), en las que se circula a velocidad inferior a la máxima, resulta, para un peralte máximo:



$$v = \sqrt{R \cdot \left[ (a_{mc})_{\max} + \frac{h_{\max}}{154,434} \right]} \quad (7)$$

Para curvas con radio superior a 576 m o 240 m (según vías nuevas o ampliación), la velocidad será constante y de valor 110 km/h o 70 km/h, respectivamente, obteniéndose de (5) peraltes inferiores a 150 mm.

### 3.3.5 Aceleración no compensada sobre el viajero

Para evaluar el efecto de la aceleración transversal no compensada sobre el viajero, hay que tener en cuenta un aspecto fundamental: la suspensión del vehículo. La suspensión en los vehículos ferroviarios alivia el efecto de las vibraciones y aceleraciones aleatorias. Sin embargo, la existencia de la suspensión causa problemas en curvas, debido a que la aceleración transversal comprime el sistema amortiguador exterior y alarga el interior, con lo que se reduce la componente efectiva del peralte  $h$ . Esto hace que aparezca una aceleración no compensada mayor que la que teóricamente debería presentarse, de valor:

$$\alpha_{ncr} = a_{nct} (1 + s) \quad (8)$$

### 3.3.6 Leyes de variación para una aceleración transversal no compensada nula

Si las condiciones de explotación exigen que la aceleración transversal no compensada sea nula, la ecuación (1) pasa a ser la siguiente:

$$h = \frac{w \cdot v^2}{g \cdot R}$$

Si tenemos en cuenta que la velocidad máxima de circulación es 110 km/h en vías nuevas (70 km/h en ampliación de líneas), el peralte máximo admisible 150 mm y anulando la aceleración transversal sin compensar, resulta que el radio mínimo para Metro es de Madrid es de 960 m en líneas nuevas y 400 m en ampliaciones.

Introduciendo los valores de los parámetros y procediendo como se indica en los apartados anteriores, se obtienen las leyes correspondientes a la máxima comodidad del viajero:



**Ley de variación del peralte**, para curvas de radio mayor de 960 m o 400 m (según sean vías nuevas o ampliación):

$$h = \frac{A}{R} = 154,434 \cdot (v_{\max})^2 \cdot \frac{1}{R} \quad (9)$$

Para curvas de radio menor o igual a 960 m o 400 m (según sean vías nuevas o ampliación), el peralte será constante y de valor 150 mm.

**Ley de variación de la velocidad**, para curvas de radio menor de 960 m o 400 m (según sean vías nuevas o ampliación):

$$v = \sqrt{R \cdot \frac{h_{\max}}{154,434}} \quad (10)$$

Para curvas de radio mayor o igual a 960 m o 400 m (según sean vías nuevas o ampliación), la velocidad será constante y de valor 110 km/h o 70 km/h respectivamente.

Existen vehículos que circulan a una velocidad inferior a la de diseño del trazado. En estos casos se produce una aceleración transversal no compensada dirigida hacia el centro de la curva.

$$h - e = \frac{w \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (a)$$

$$h - e = 154,434 \cdot \frac{v^2}{R} \quad (b)$$

$$a_{mc} = \frac{e \cdot g}{w} = \frac{e}{154,434} \quad (c)$$

$$h - 154,434 \cdot a_{mc} = 154,434 \cdot \frac{v^2}{R} \quad (d)$$



La **ley de variación de exceso de peralte**, para la circulación de vehículos a menor velocidad que la establecida en el diseño del trazado, se obtendría introduciendo (c) en (d):

$$e = h - 154,434 \cdot \frac{v^2}{R} \quad (11)$$

### 3.4 LONGITUD DE LA TRANSICIÓN

#### 3.4.1 Consideraciones generales

Para lograr una variación progresiva de la aceleración transversal no compensada en el paso de recta a curva circular, lo suficientemente suave para alcanzar un grado alto de confort, es necesario establecer una cierta longitud de curva de transición,  $L_{tc}$ .

Por otro lado, para conseguir una variación progresiva del peralte desde la recta a la curva mediante un alabeo compatible geoméricamente con el paso de las circulaciones, se necesita una determinada longitud de transición de peralte,  $L_{tp}$ .

La tercera condición para calcular la longitud de la curva de transición, es una condición dinámica. La longitud de transición,  $L_{td}$  es la necesaria para que se produzca la adaptación de la suspensión del vehículo a la nueva situación.

Tras el análisis de cada una de ellas, se asegurará durante la fase de realización de proyecto que se dispone de la **longitud suficiente para acomodar la mayor de las referidas longitudes de transición**.

#### 3.4.2 Longitud de curva de transición por confort del viajero

La longitud mínima de la curva de transición  $L_{tc}$  se establecerá en base a la máxima variación admisible de la aceleración transversal en la unidad de tiempo, también conocida por "jerk",  $j$ .

$$\frac{da_{mc}}{dt} = j \geq \frac{a_{mc}}{\frac{L_{tc}}{v}}$$
$$L_{tc} \geq \frac{a_{mc} \cdot v}{j} = \frac{i \cdot g \cdot v}{w \cdot j} \quad (12)$$



Si, por dificultades constructivas, no fuera posible implantar la  $L_{tc}$  resultante de la expresión (12), se optará por reducir la velocidad de circulación  $v$ .

Cuando la aceleración transversal no compensada sea nula, la longitud mínima de la curva de transición no vendrá dada por la condición de máxima variación de la aceleración transversal.

### 3.4.3 Longitud de la curva de transición por limitación geométrica

La longitud mínima de transición de peralte  $L_{tp}$  debe considerar la rampa máxima de peralte  $(r_h)_{max}$ , de manera que se cumpla:

$$L_{tp} = \frac{h}{(r_h)_{max}} \quad (13)$$

La rampa de peralte máxima es 1,5 mm/m, pero puede tomar un valor excepcional de 2 mm/m.

### 3.4.4 Longitud de la curva de transición por limitación dinámica

La longitud mínima de transición se calcula a partir de la velocidad vertical máxima  $(v_v)_{max}$ :

$$L_{td} = \frac{h \cdot v}{(v_v)_{max}} \quad (14)$$



### 3.5 APLICACIÓN A METRO DE MADRID

#### 3.5.1 Consideraciones generales

Considerando los parámetros de diseño indicados en el apartado 3.2:

Velocidad máxima de circulación en nuevas líneas	$v_{max}$	110 km/h
Velocidad máxima de circulación en ampliación	$v_{max}$	70 km/h
Peralte máximo	$h_{max}$	150 mm
Aceleración transversal máxima no compensada	$(a_{tnc})_{max}$	0,65 m/s <sup>2</sup>
		0 m/s <sup>2</sup>
Distancia entre ejes de carril	$w$	1.515 mm
Velocidad vertical máxima	$(v_v)_{max}$	50 mm/s
Rampa de peralte máxima	$(r_p)_{max}$	1,5 mm/m (2 mm/m)*
Sobreaceleración máxima ("jerk")	$j_{max}$	0,020 g m/s <sup>3</sup>

\* Valor excepcional

En la Tabla 1 del Anexo de este documento, se indica un listado de los parámetros de diseño de las líneas de Metro de Madrid.

#### 3.5.2 Longitudes mínimas de trazado en planta

Longitud mínima de recta entre curvas circulares	0,4 $v$
Longitud mínima de la curva circular	0,4 $v$

$v$ : velocidad de proyecto de la curva (km/h)



### 3.5.3 Valores de los parámetros con la $a_{tnc} = 0,65 \text{ m/s}^2$

#### 3.5.3.1 Radio mínimo para circular a 110 km/h

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot 30,55^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} = 575,9 \text{ m}$$

$$\mathbf{R_{min} = 575,9 \text{ m}}$$

#### 3.5.3.2 Radio mínimo para circular a 70 km/h

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot 19,44^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} = 240 \text{ m}$$

$$\mathbf{R_{min} = 240 \text{ m}}$$

#### 3.5.3.3 Velocidad máxima para el radio mínimo de trazado (300 m) en nuevas líneas

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot v^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} = 300 \text{ m}$$

$$\mathbf{v_{max} = 79,4 \text{ km/h}}$$

#### 3.5.3.4 Velocidad máxima para el radio mínimo de trazado (210 m) en ampliaciones

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot v^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} = 210 \text{ m}$$

$$\mathbf{v_{max} = 66,4 \text{ km/h}}$$



### 3.5.3.5 Aceleración transversal que sufre el viajero

Se calculará la aceleración real que sufre el viajero según la ecuación (8):

$$\alpha_{ncr} = a_{ncr}(1 + s)$$

El coeficiente de flexibilidad  $s$  toma los valores que figuran en la tabla siguiente, en función del tipo de material móvil que circula por cada línea. Este coeficiente representa el coche con su máxima carga, que es el valor más desfavorable para la aceleración del viajero.

Tipo de coche	Coefficiente de flexibilidad
2.000	0,327
6.000	0,340
7.000	0,440
8.000	0,424

La aceleración transversal no compensada que sufre el viajero se limitará a **1 m/s<sup>2</sup>**.

### 3.5.3.6 Variación del peralte para $R > R_{min}$

En trazado de nuevas líneas, con curvas de radio mayor de 576 m, el peralte se obtiene de la expresión (5):

$$h = \frac{150 \cdot 154,434 \cdot (30,55)^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} \cdot \frac{1}{R}$$

$$h = \frac{86.379,70}{R}$$

$R$  (m) y  $h$  (mm)

En ampliación de líneas existentes, con curvas de radio mayor de 240 m, el peralte se obtiene de la expresión (5):

$$h = \frac{150 \cdot 154,434 \cdot (19,4)^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} \cdot \frac{1}{R}$$



$$h = \frac{34.833,15}{R}$$

$R$  (m) y  $h$  (mm)

### 3.5.3.7 Peralte en curvas de $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor de 576 m o 240 m, el peralte será el máximo admisible:

$$h = 150 \text{ mm}$$

### 3.5.3.8 Variación de la insuficiencia del peralte para $R > R_{min}$

En el trazado de nuevas líneas, para curvas de radio mayor de 576 m, la insuficiencia de peralte se obtiene de la expresión (6):

$$i = \left[ 154,434 \cdot (30,55)^2 - \frac{150 \cdot 154,434 \cdot (30,55)^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} \right] \cdot \frac{1}{R}$$

$$i = \frac{57.806,60}{R}$$

$i$  (mm) y  $R$  (m)

En el trazado para ampliaciones, para curvas de radio mayor de 240 m, la insuficiencia de peralte se obtiene de la expresión (6):

$$i = \left[ 154,434 \cdot (19,40)^2 - \frac{150 \cdot 154,434 \cdot (19,40)^2}{150 + 154,434 \cdot 0,65} \right] \cdot \frac{1}{R}$$

$$i = \frac{23.302,33}{R}$$

$i$  (mm) y  $R$  (m)

### 3.5.3.9 Insuficiencia de peralte en curvas de $R < R_{min}$

Para curvas de radio menores de 576 m o 240 m, la insuficiencia de peralte es la que corresponde a una  $a_{mc}$  constante de 0,65 m/s<sup>2</sup> en todas ellas.

De la expresión (2a) se tiene:



$$i = 0,65 \cdot 154,434$$

$$i = 100 \text{ mm}$$

### 3.5.3.10 Variación de velocidad en curvas de $R < R_{min}$

Para líneas de nuevo trazado, con curvas de radio menor del radio mínimo, la velocidad de circulación se obtiene de la expresión (7).

$$v = \sqrt{R \cdot \left[ 0,65 + \frac{150}{154,434} \right]}$$

$$v = 1,273 \cdot \sqrt{R} \quad v(\text{m/s}) \text{ y } R(\text{m})$$

$$v = 4,584 \cdot \sqrt{R} \quad v(\text{km/h}) \text{ y } R(\text{m})$$

### 3.5.3.11 Longitud de la curva de transición por confort para $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor del radio mínimo, la longitud mínima de la curva de transición por confort se obtiene de la expresión (12):

$$L_{tc} \geq \frac{100 \cdot 9,81 \cdot 1,273 \sqrt{R}}{1515 \cdot (0,020 \cdot 9,81)}$$

$$L_{tc} \geq 4,218 \cdot \sqrt{R}$$

### 3.5.3.12 Longitud de la curva de transición por confort para $R > R_{min}$

En trazado de nuevas líneas, con curvas de radio mayor de 576 m, la longitud de la curva de transición se obtiene de la misma expresión (12), pero con los valores de  $i$  y  $v$  correspondientes.

$$L_{tc} \geq \frac{(57.806,60 / R) \cdot 9,81 \cdot 30,55}{1515 \cdot (0,020 \cdot 9,81)}$$

$$L_{tc} \geq \frac{58.294,15}{R}$$



En trazado de ampliación de líneas, con curvas de radio mayor de 240 m, la longitud de la curva de transición se obtiene de la misma expresión (12), pero con los valores de  $i$  y  $v$  correspondientes.

$$L_{tc} \geq \frac{(23.302,33/R) \cdot 9,81 \cdot 19,40}{1515 \cdot (0,020 \cdot 9,81)}$$

$$L_{tc} \geq \frac{14.919,64}{R}$$

### 3.5.3.13 Longitud de transición de peralte por limitación geométrica, para $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor del radio mínimo, la longitud de la transición de peralte se obtiene de la expresión (13).

$$L_{tp} \geq \frac{150}{1,5} = 100 \text{ m}$$

En casos excepcionales se admite una rampa de peralte de 2 mm/m. En estos casos se obtendría una longitud de transición del peralte excepcional de:

$$L_{tp} \geq \frac{150}{2} = 75 \text{ m}$$

### 3.5.3.14 Longitud de transición de peralte por limitación geométrica, para $R > R_{min}$

En trazado de nuevas líneas, con curvas de radio mayor de 576 m, la longitud de transición de peralte se obtiene de la expresión (13):

$$L_{tp} \geq \frac{86.379,70/R}{1,5}$$

$$L_{tp} \geq \frac{57.586,47}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

En los casos excepcionales en los que se adopte una rampa de peralte máxima de 2 mm/m, la expresión de la longitud de transición de peralte sería:



$$L_{tp} \geq \frac{86.379,70 / R}{2}$$

$$L_{tp} \geq \frac{43.189,85}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

En ampliación de líneas existentes, para curvas de radio mayor de 240 m, la longitud de transición de peralte se obtiene de la expresión (13):

$$L_{tp} \geq \frac{34.833,15 / R}{1,5}$$

$$L_{tp} \geq \frac{23.222,10}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

En los casos excepcionales en los que se adopte una rampa de peralte máxima de 2 mm/m, la expresión de la longitud de transición de peralte sería:

$$L_{tp} \geq \frac{34.833,15 / R}{2}$$

$$L_{tp} \geq \frac{17.416,58}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

### 3.5.3.15 Longitud de la curva de transición por limitación dinámica, para $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor del radio mínimo, la longitud de la curva de transición por limitación dinámica se obtiene de la expresión (14):

$$L_{td} \geq \frac{150 \cdot 1.273 \cdot \sqrt{R}}{50}$$



$$L_{td} \geq 3,819 \cdot \sqrt{R}$$

$R$  (m) y  $L_{td}$  (m)

### 3.5.3.16 Longitud de la curva de transición por limitación dinámica, para $R > R_{min}$

En el trazado de nuevas líneas, con curvas de radio mayor de 576 m, la longitud de la curva de transición por limitación dinámica se obtiene de la expresión (14):

$$L_{td} \geq \frac{86.379,70 \cdot 30,55}{50 \cdot R}$$

$$L_{td} \geq \frac{52.778,00}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{td}$  (m)

En el trazado de ampliación de las líneas existentes, con radios mayor de 240 m, la longitud de la curva de transición por limitación dinámica se obtiene de la expresión (14):

$$L_{td} \geq \frac{34.833,15 \cdot 19,40}{50 \cdot R}$$

$$L_{td} \geq \frac{13.515,26}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{td}$  (m)



### 3.5.3.17 Cuadro resumen de fórmulas ( $a_{tnc} = 0,65 \text{ m/s}^2$ )

PARÁMETRO		Radio de la curva				
		Vías nuevas		Ampliación		
		$< R^*_{\min}$	$> R^*_{\min}$	$< R^*_{\min}$	$> R^*_{\min}$	
Peralte	$h$ (mm)	150	$h = \frac{86.379,70}{R}$	150	$h = \frac{34.833,15}{R}$	
Insuficiencia de peralte	$i$ (mm)	100	$i = \frac{57.806,60}{R}$	100	$i = \frac{23.302,33}{R}$	
Velocidad	$v$	m/s	$v = 1,273 \cdot \sqrt{R}$	30,55	$v = 1,273 \cdot \sqrt{R}$	19,40
		km/h	$v = 4,584 \cdot \sqrt{R}$	110	$v = 4,584 \cdot \sqrt{R}$	70
Longitud curva de transición***	$L_{ct}$ (m)	$L_{ct} \geq 4,22 \cdot \sqrt{R}$	$L_{ct} \geq \frac{58.294,15}{R}$	$L_{ct} \geq 4,22 \cdot \sqrt{R}$	$L_{ct} \geq \frac{14.919,64}{R}$	
	$L_{tp}$ (m)	$L_{tp} \geq 100^{**}$	$L_{tp} \geq \frac{57.586,47}{R}$	$L_{tp} \geq 100^{**}$	$L_{tp} \geq \frac{23.222,10}{R}$	
	$L_{td}$ (m)	$L_{td} \geq 3,82 \cdot \sqrt{R}$	$L_{td} \geq \frac{52.778,00}{R}$	$L_{td} \geq 3,82 \cdot \sqrt{R}$	$L_{td} \geq \frac{13.515,26}{R}$	

\* $R_{\min}$  = 576 m en vía nueva

$R_{\min}$  = 240 m en ampliaciones

\*\*75 m en casos excepcionales.

\*\*\*Se limitará a la más restrictiva

En la Tabla 2 del Anexo del presente documento se indican los parámetros geométricos en función de los diferentes radios de trazado.



### 3.5.4 Valores de los parámetros con la $a_{tnc} = 0 \text{ m/s}^2$

#### 3.5.4.1 Radio mínimo para circular a 110 km/h

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot 30,55^2}{150} = 960,89 \text{ m}$$

$$\mathbf{R_{min} = 960,9 \text{ m}}$$

#### 3.5.4.2 Radio mínimo para circular a 70 km/h

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot 19,40^2}{150} = 400 \text{ m}$$

$$\mathbf{R_{min} = 400 \text{ m}}$$

#### 3.5.4.3 Velocidad máxima para el radio mínimo de trazado (300 m) en nuevas líneas

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot v^2}{150} = 300 \text{ m}$$

$$\mathbf{v_{max} = 61,45 \text{ km/h}}$$

#### 3.5.4.4 Velocidad máxima para el radio mínimo de trazado (210 m) en ampliaciones

De (4) se obtiene:

$$\frac{154,434 \cdot v^2}{150} = 210 \text{ m}$$

$$\mathbf{v_{max} = 51,40 \text{ km/h}}$$



#### 3.5.4.5 Variación del peralte para $R > R_{min}$

Para curvas de radio mayor de 960 m, el peralte se obtiene de la expresión (5):

$$h = 154,434 \cdot (30,55)^2 \cdot \frac{1}{R}$$

$$h = \frac{144.133,64}{R}$$

$R$  (m) y  $h$  (mm)

Para curvas de radio mayor de 400 m, el peralte se obtiene de la expresión (5):

$$h = 154,434 \cdot (19,40)^2 \cdot \frac{1}{R}$$

$$h = \frac{58.122,78}{R}$$

$R$  (m) y  $h$  (mm)

#### 3.5.4.6 Peralte en curvas de $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor de 960 m o 400 m, el peralte será el máximo admisible.

$$h = 150 \text{ mm}$$

#### 3.5.4.7 Variación de la insuficiencia de peralte

La insuficiencia de peralte es nula, ya que la aceleración transversal no compensada también lo es.

#### 3.5.4.8 Variación de velocidad en curvas de $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor del radio mínimo, la velocidad de circulación se obtiene de la expresión (7).

$$v = \sqrt{R \cdot \frac{150}{154,434}}$$



$$v = 0,985 \cdot \sqrt{R} \quad v \text{ (m/s) y } R \text{ (m)}$$

$$v = 3,548 \cdot \sqrt{R} \quad v \text{ (km/h) y } R \text{ (m)}$$

### 3.5.4.9 Longitud de la curva de transición por confort

No hay longitud mínima de la curva de transición por motivos de confort del viajero ya que la aceleración transversal no compensada es nula.

### 3.5.4.10 Longitud de transición de peralte por limitación geométrica, para $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor del radio mínimo, la longitud de la transición de peralte se obtiene de la expresión (13).

$$L_{tp} \geq \frac{150}{1,5} = 100 \text{ m}$$

En casos excepcionales se admite una rampa de peralte de 2 mm/m. En estos casos, se obtendría una longitud de transición del peralte excepcional de:

$$L_{tp} \geq \frac{150}{2} = 75 \text{ m}$$

### 3.5.4.11 Longitud de transición de peralte por limitación geométrica, para $R > R_{min}$

Para líneas de nuevo trazado, con curvas de radio mayor de 960 m, la longitud de transición de peralte se obtiene de la expresión (13):

$$L_{tp} \geq \frac{144.133,64 / R}{1,5}$$

$$L_{tp} \geq \frac{96.089,09}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

En los casos excepcionales en los que se adopte una rampa de peralte máxima de 2 mm/m, la expresión de la longitud de transición de peralte sería:

$$L_{tp} = \frac{144.133,64 / R}{2}$$



$$L_{tp} = \frac{72.066,82}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

Para ampliación de líneas, con curvas de radio mayor de 400 m, la longitud de transición de peralte se obtiene de la expresión (13):

$$L_{tp} \geq \frac{58.122,78 / R}{1,5}$$

$$L_{tp} \geq \frac{38.748,52}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

En los casos excepcionales en los que se adopte una rampa de peralte máxima de 2 mm/m, la expresión de la longitud de transición de peralte sería:

$$L_{tp} = \frac{58.122,78 / R}{2}$$

$$L_{tp} = \frac{29.061,39}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{tp}$  (m)

#### 3.5.4.12 Longitud de la curva de transición por limitación dinámica, para $R < R_{min}$

Para curvas de radio menor del mínimo, la longitud de la curva de transición por limitación dinámica se obtiene de la expresión (14):

$$L_{td} \geq \frac{150 \cdot 0,985 \cdot \sqrt{R}}{50}$$

$$L_{td} \geq 2,955 \cdot \sqrt{R}$$

$R$  (m) y  $L_{td}$  (m)



### 3.5.4.13 Longitud de la curva de transición por limitación dinámica, para $R > R_{min}$

Para líneas de nuevo trazado, con curvas de radio mayor de 960 m, la longitud de la curva de transición por limitación dinámica se obtiene de la expresión (14):

$$L_{td} \geq \frac{144.133,64 \cdot 30,55}{50 \cdot R}$$

$$L_{td} \geq \frac{88.065,65}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{td}$  (m)

En ampliación de líneas existentes, con curvas de radio mayor de 400 m, la longitud de la curva de transición por limitación dinámica se obtiene de la expresión (14):

$$L_{td} \geq \frac{58.122,78 \cdot 19,40}{50 \cdot R}$$

$$L_{td} \geq \frac{22.551,64}{R}$$

$R$  (m) y  $L_{td}$  (m)



### 3.5.4.14 Cuadro resumen de fórmulas ( $a_{tnc} = 0 \text{ m/s}^2$ )

PARÁMETRO		RADIO DE LA CURVA				
		Vías nuevas		Ampliación		
		$< R^*_{\min}$	$> R^*_{\min}$	$< R^*_{\min}$	$> R^*_{\min}$	
Peralte	$h$ (mm)	150	$h = \frac{144.133,64}{R}$	150	$h = \frac{58.122,78}{R}$	
Velocidad	$v$	m/s	$v = 0,985 \cdot \sqrt{R}$	30,55	$v = 0,985 \cdot \sqrt{R}$	19,40
		km/h	$v = 3,548 \cdot \sqrt{R}$	110	$v = 3,548 \cdot \sqrt{R}$	70
Longitud de la curva de transición***	$L_{tp}$ (m)	$L_{tp} \geq 100^{**}$	$L_{tp} \geq \frac{96.089,09}{R}$	$L_{tp} \geq 100^{**}$	$L_{tp} = \frac{38.748,52}{R}$	
	$L_{td}$ (m)	$L_{td} \geq 2,95 \cdot \sqrt{R}$	$L_{td} \geq \frac{88.065,65}{R}$	$L_{td} \geq 2,95 \cdot \sqrt{R}$	$L_{td} \geq \frac{22.551,64}{R}$	

\* $R_{\min} = 960$  m en vía nueva

$R_{\min} = 400$  m en ampliaciones

\*\*75 m en casos excepcionales.

\*\*\*Se limitará a la más restrictiva

En la Tabla 3 del Anexo del presente documento se indican los parámetros geométricos en función de los diferentes radios de trazado.



## 4. TRAZADO EN ALZADO

### 4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El perfil longitudinal de las líneas de Metro de Madrid se compone de un conjunto de rasantes rectas, unidas entre sí por curvas de acuerdo circulares o parabólicas.

Las rampas y pendientes se construyen para ganar o perder cota y están condicionadas por el terreno. La particularidad del ferrocarril metropolitano es que la mayor parte de su trazado discurre en túnel. Para elegir el valor de la rampa máxima hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Adherencia rueda-carril.
- Potencia de los vehículos utilizados.
- Tráfico exclusivamente de viajeros.
- Posibilidad de arranque y frenado.

### 4.2 RASANTES

La máxima inclinación teórica de las rasantes viene condicionada por la adherencia entre la rueda y el carril.

Metro de Madrid limita la inclinación de las rasantes por razones de explotación de las líneas, no admitiéndose inclinaciones superiores al 35‰, es decir, **35 milésimas**. Este valor máximo es superior al de otras administraciones ferroviarias, debido a que el tráfico de Metro de Madrid es exclusivamente de viajeros, que necesita menor capacidad tractora que el tráfico de mercancías.

El valor mínimo de la rasante es de **5 milésimas** en la vía general, para que se puedan evacuar las aguas hacia los conductos de drenaje. En estaciones este valor pasa a ser de **0 milésimas**, ya que, por motivos funcionales, no puede tener inclinación.

La resistencia específica debido a las curvas debe sumarse a la resistencia de las rampas como una pendiente ficticia, según la ecuación:

$$r = \frac{500}{R} + p \quad (14)$$

Siendo  $R$  el radio, en m, de la curva en planta y  $p$  la inclinación de la rampa en ‰.



En los tramos en curva se considerará la rampa ficticia a efectos de valorar la inclinación de rasante máxima permitida.

## 4.3 CURVAS DE ACUERDO

### 4.3.1 Generalidades

Las distintas rasantes se enlazan entre si por curvas de acuerdo que, si bien en algunas líneas antiguas fueron circulares, en los nuevos trazados son parabólicas.

Estas curvas de acuerdo introducen una aceleración centrífuga en el plano de la curva (el plano horizontal), que se expresa por:

$$a_{cv} = \frac{v^2}{R_{av}} \cdot g \quad (15)$$

Esta aceleración provoca reacciones molestas en los usuarios del ferrocarril, que es más acusada en los puntos altos que en los bajos. En Metro de Madrid esta aceleración se limita a  $0,15 \text{ m/s}^2$ . Como consecuencia de ello, resultan unos valores mínimos de los radios y de las longitudes de las curvas del acuerdo.

### 4.3.2 Acuerdo parabólico

La curva de acuerdo será una parábola de eje vertical, de ecuación:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot K_v}, \text{ en la que } x, y \text{ son las coordenadas de la curva (ver figura 6)}$$

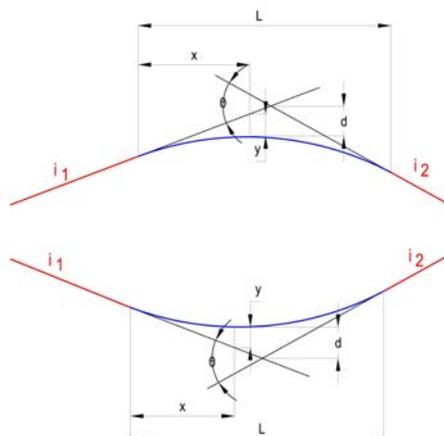


Figura 6: Parábola de acuerdo vertical



Definiendo  $\theta$  como el valor absoluto de la diferencia algebraica de las rasantes en los extremos del acuerdo en tanto por uno, se cumplirá que:

$$K_v = \frac{L}{\theta}, \text{ siendo } L \text{ la longitud de la curva del acuerdo vertical.}$$

La longitud de la curva del acuerdo cumplirá la condición  $L \geq 0,4 \cdot v$ , siendo  $v$  la velocidad de proyecto del tramo (km/h)

## 4.4 APLICACIÓN A METRO DE MADRID

### 4.4.1 Pendientes admisibles

Pendiente máxima	35 milésimas*
Pendiente mínima	5 milésimas
Pendiente en estaciones	nula

(\*) Si el tramo se encuentra en curva, esta pendiente será la pendiente ficticia, calculada según la fórmula (14) del presente documento.

### 4.4.2 Longitud mínima de pendiente constante

Longitud mínima con pendiente constante ( $L_{min}$ )	$4 V$
---	-------

$L_{min}$  en m y  $V$  en km/h.

Para la velocidad máxima de 110 km/h, resulta una longitud mínima de 44 m, y para la velocidad mínima de 80 km/h, la longitud mínima de pendiente constante será igual a 32 m.

### 4.4.3 Aceleración vertical normal y máxima

En Metro de Madrid la aceleración vertical se limita a  $0,15 \text{ m/s}^2$ , si bien en casos excepcionales se admite  $0,30 \text{ m/s}^2$ . Por tanto, de la ecuación (15) se obtiene el siguiente resultado:



$$0,15 = \frac{v^2}{R} \cdot g, \text{ para el dimensionamiento normal del acuerdo}$$

$$0,30 = \frac{v^2}{R} \cdot g, \text{ para casos excepcionales}$$

#### 4.4.4 Parámetros de la parábola

Según la velocidad de proyecto de cada tramo, se calculará la longitud mínima de la curva del acuerdo vertical. Esta longitud, a su vez, dependerá del valor del parámetro de la parábola  $K_v$ .

Se tomará como valor mínimo  $K_v = 2.000$ .

#### 4.4.5 Longitud del acuerdo vertical

La longitud de la curva del acuerdo vendrá determinada por la ecuación:

$$L = K_v \cdot \theta$$

## 5. RELACIÓN ENTRE LA PLANTA Y EL ALZADO

### 5.1 Consideraciones en vía general

- No es aconsejable hacer coincidir los acuerdos verticales con curvas de transición en planta, ya que dificulta el montaje de vía.
- En tramos en rampa coincidentes con curvas en planta, se considerará la pendiente ficticia a efectos de pendiente máxima.

### 5.2 Consideraciones para aparatos de vía

- No se colocarán aparatos de vía en tramos en los que se realice un acuerdo vertical o curvas de transición en planta.
- En general, los aparatos de vía se colocarán en tramos rectos, horizontales o no. Se limitará la rasante máxima en desvíos a 2 milésimas.

### 5.3 Consideraciones para estructuras

- Se evitará proyectar acuerdos verticales o curvas de transición en planta sobre estructuras, dado que dificultan el cálculo y la construcción de las estructuras.



## 6. NORMATIVA DE REFERENCIA

prEN 13848-1: "RAILWAY APPLICATIONS/TRACK. TRACK GEOMETRY QUALITY-PART 1: CHARACTERISATION OF TRACK GEOMETRY". (Marzo 2.003).

prEN 13231-1: "RAILWAY APPLICATIONS/TRACK. ACCEPTANCE OF WORKS. PART 1: WORKS ON TRACK. PLAIN LINE" (Septiembre 2.003).

ANFORDERUNGSKATALOG ZUM BAU DER FESTEN FAHRBAHN. 4. Überarbeitete Auflage. (01.08.2002).

## 7. DEFINICIONES

**Aceleración transversal no compensada:** aceleración centrífuga del tren no compensada por el peralte de la sección en curva.

**Alabeo:** distancia del punto de la superficie de rodadura del carril de una vía, donde debía apoyar la cuarta rueda de un vehículo, al plano determinado por los tres puntos de apoyo de las otras ruedas en los carriles.

**Alineación:** distancia entre el eje de la vía real y la línea ideal de referencia dada.

**Ancho de vía:** distancia entre las caras activas de las dos filas de carril medida a una distancia de  $14\pm 1$  por debajo de la superficie de rodadura.

**Coefficiente de flexibilidad:** coeficiente que introduce el efecto de la suspensión de los vehículos. Este coeficiente mayor la aceleración transversal que sufre el vehículo, para determinar la aceleración que sufre el viajero en el interior del coche.

**Exceso de peralte:** corresponde a la situación de un tren circulando en curva con una velocidad real menor que la que equilibra el sistema. La velocidad de equilibrio sería aquella que hace nula la aceleración transversal no compensada.

**Insuficiencia de peralte:** corresponde a la situación de un tren circulando en curva con una velocidad real mayor que la que equilibra el sistema. La velocidad de equilibrio sería aquella que hace nula la aceleración transversal no compensada.

**Nivelación longitudinal:** parámetro que define la cota de la superficie de rodadura de un hilo de la vía, referida a un plano de comparación.



**Peralte:** diferencia de cota entre las superficies de rodadura de los dos carriles de una vía, dentro de una misma sección normal a ella, en la zona de curva.

**Rampa de peralte:** variación lineal del peralte en toda la longitud de la curva de transición, levantando el hilo externo. En el caso más desfavorable será de 2 mm/m.

**Sobreaceleración máxima (jerk):** variación máxima de la aceleración transversal no compensada.



## ANEXO



Tabla 1

Parámetros geométricos para nuevas líneas de Metro de Madrid		
Ancho de vía (mm)		1.445
Distancia entre ejes de carril (mm)	$w$	1.515
Tipo de carril		UIC-54
Rasante (milésimas)	$r$	max: 35 min: 5
Rasante en estaciones (milésimas)	$r$	0
Radio mínimo de alineación circular en nuevos trazados(m)	$R_{min}$	300
Radio mínimo de alineación circular en ampliación de líneas existentes(m)	$R_{min}$	210
Peralte máximo (mm)	$h_{max}$	150
Tipo de curva de transición		Clotoide
Aceleración sin compensar máxima ( $m/s^2$ )	$a_{tnc}$	0,65
Aceleración sin compensar máxima del viajero ( $m/s^2$ )	$\alpha_{ncr}$	1
Insuficiencia de peralte máxima (mm)	$i$	100
Velocidad máxima de circulación para líneas de nueva construcción(km/h)	$v_{max}$	110
Velocidad máxima de circulación para líneas en ampliación(km/h)	$v_{max}$	70
Diagrama de peraltes en la curva de transición		Lineal
Máxima pendiente en el diagrama de peraltes (rampa máxima de peralte) (mm/m)	$(r_p)_{max}$	normal: 1,5 excepcional: 2,0



Tabla 1

Parámetros geométricos para nuevas líneas de Metro de Madrid		
Máxima variación del peralte (velocidad vertical máxima) (mm/s)	$(V_v)_{max}$	50
Máxima variación de la aceleración transversal sin compensar (jerk) ( $m/s^3$ )	$j$	0,020 g
Coefficiente de flexibilidad	$s$	Coche 2.000: 0,327 Coche 6.000: 0,340 Coche 7.000: 0,440 Coche 8.000: 0,424
Longitud mínima de recta entre curvas circulares (m)		0,4 V
Longitud mínima de alineaciones de curvatura constante (m)		0,4 V
Tipo de acuerdo vertical		Parabólico
Máxima aceleración admisible en acuerdos verticales (aceleración centrífuga vertical) ( $m/s^2$ )	$a_{cv}$	normal: 0,15 excepcional: 0,30
Parámetro mínimo de acuerdo vertical	$K_v$	2.000
Distancia mínima con pendiente constante entre dos acuerdos verticales (m)		0,4 V



Tabla 2

Radio (m)	Peralte (mm)	Insuficiencia de peralte (mm)	Acel. sin compensar (m/s <sup>2</sup> )	Velocidad de circulación		Longitud de transición				Rampa de peralte real (mm/m)	Velocidad vertical (mm/s)
				(m/s)	(km/h)	L <sub>CONFORT</sub> (m)	L <sub>GEOMÉTRICA</sub> (m)	L <sub>DINÁMICA</sub> (m)	L <sub>TRANSICIÓN</sub> (m)		
210	150	100,4	0,65	18,5	66,4	61,1	100,0	55,4	100,0	1,50	27,7
220	150	100,4	0,65	18,9	68,0	62,6	100,0	56,7	100,0	1,50	28,3
230	150	100,4	0,65	19,3	69,5	64,0	100,0	57,9	100,0	1,50	29,0
240	150	100,4	0,65	19,7	71,0	65,4	100,0	59,2	100,0	1,50	29,6
250	150	100,4	0,65	20,1	72,5	66,7	100,0	60,4	100,0	1,50	30,2
260	150	100,4	0,65	20,5	73,9	68,0	100,0	61,6	100,0	1,50	30,8
270	150	100,4	0,65	20,9	75,3	69,3	100,0	62,8	100,0	1,50	31,4
280	150	100,4	0,65	21,3	76,7	70,6	100,0	63,9	100,0	1,50	32,0
290	150	100,4	0,65	21,7	78,1	71,8	100,0	65,1	100,0	1,50	32,5
300	150	100,4	0,65	22,1	79,4	73,1	100,0	66,2	100,0	1,50	33,1
325	150	100,4	0,65	23,0	82,6	76,0	100,0	68,9	100,0	1,50	34,4
350	150	100,4	0,65	23,8	85,8	78,9	100,0	71,5	100,0	1,50	35,7
375	150	100,4	0,65	24,7	88,8	81,7	100,0	74,0	100,0	1,50	37,0
400	150	100,4	0,65	25,5	91,7	84,4	100,0	76,4	100,0	1,50	38,2
425	150	100,4	0,65	26,2	94,5	87,0	100,0	78,7	100,0	1,50	39,4
450	150	100,4	0,65	27,0	97,2	89,5	100,0	81,0	100,0	1,50	40,5
475	150	100,4	0,65	27,8	99,9	91,9	100,0	83,3	100,0	1,50	41,6
500	150	100,4	0,65	28,5	102,5	94,3	100,0	85,4	100,0	1,50	42,7
525	150	100,4	0,65	29,2	105,0	96,7	100,0	87,5	100,0	1,50	43,8
550	150	100,4	0,65	29,9	107,5	98,9	100,0	89,6	100,0	1,50	44,8
576	150	100,4	0,65	30,6	110,0	101,2	100,0	91,6	101,2	1,48	45,3
600	144	96,3	0,62	30,6	110,0	97,2	96,0	88,0	97,2	1,48	45,3
700	123	82,6	0,53	30,6	110,0	83,3	82,3	75,4	83,3	1,48	45,3
800	108	72,3	0,47	30,6	110,0	72,9	72,0	66,0	72,9	1,48	45,3
900	96	64,2	0,42	30,6	110,0	64,8	64,0	58,7	64,8	1,48	45,3
960	90	60,2	0,39	30,6	110,0	60,7	60,0	55,0	60,7	1,48	45,3
1000	86	57,8	0,37	30,6	110,0	58,3	57,6	52,8	58,3	1,48	45,3
1250	69	46,2	0,30	30,6	110,0	46,6	46,1	42,2	46,6	1,48	45,3



Radio (m)	Peralte (mm)	Insuficiencia de peralte (mm)	Acel. sin compensar (m/s <sup>2</sup> )	Velocidad de circulación		Longitud de transición				Rampa de peralte real (mm/m)	Velocidad vertical (mm/s)
						L <sub>CONFORT</sub> (m)	L <sub>GEOMÉTRICA</sub> (m)	L <sub>DINÁMICA</sub> (m)	L <sub>TRANSICIÓN</sub> (m)		
1500	58	38,5	0,25	30,6	110,0	38,9	38,4	35,2	38,9	1,48	45,3
1750	49	33,0	0,21	30,6	110,0	33,3	32,9	30,2	33,3	1,48	45,3
2000	43	28,9	0,19	30,6	110,0	29,1	28,8	26,4	29,1	1,48	45,3
2500	35	23,1	0,15	30,6	110,0	23,3	23,0	21,1	23,3	1,48	45,3
3000	29	19,3	0,12	30,6	110,0	19,4	19,2	17,6	19,4	1,48	45,3
3500	25	16,5	0,11	30,6	110,0	16,7	16,5	15,1	16,7	1,48	45,3
4000	22	14,5	0,09	30,6	110,0	14,6	14,4	13,2	14,6	1,48	45,3
4500	19	12,8	0,08	30,6	110,0	13,0	12,8	11,7	13,0	1,48	45,3
5000	17	11,6	0,07	30,6	110,0	11,7	11,5	10,6	11,7	1,48	45,3

**300:** radio mínimo de trazado en nuevas líneas

**210:** radio mínimo de trazado en ampliación de líneas

**576:** radio mínimo para circular a la velocidad máxima (110 km/h)

**240:** radio mínimo para circular a la velocidad máxima (70 km/h)



Tabla 3

Radio (m)	Peralte (mm)	Insuficiencia de peralte (mm)	Acel. sin compensar (m/s <sup>2</sup> )	Velocidad de circulación		Longitud de transición				Rampa de peralte real (mm/m)	Velocidad vertical (mm/s)
				(m/s)	(km/h)	L <sub>CONFORT</sub> (m)	L <sub>GEOMÉTRICA</sub> (m)	L <sub>DINÁMICA</sub> (m)	L <sub>TRANSICIÓN</sub> (m)		
210	150	0,0	0,00	14,3	51,4	0,0	100,0	42,8	100,0	1,50	21,4
220	150	0,0	0,00	14,6	52,6	0,0	100,0	43,9	100,0	1,50	21,9
230	150	0,0	0,00	14,9	53,8	0,0	100,0	44,8	100,0	1,50	22,4
240	150	0,0	0,00	15,3	55,0	0,0	100,0	45,8	100,0	1,50	22,9
250	150	0,0	0,00	15,6	56,1	0,0	100,0	46,7	100,0	1,50	23,4
260	150	0,0	0,00	15,9	57,2	0,0	100,0	47,7	100,0	1,50	23,8
270	150	0,0	0,00	16,2	58,3	0,0	100,0	48,6	100,0	1,50	24,3
280	150	0,0	0,00	16,5	59,4	0,0	100,0	49,5	100,0	1,50	24,7
290	150	0,0	0,00	16,8	60,4	0,0	100,0	50,3	100,0	1,50	25,2
300	150	0,0	0,00	17,1	61,5	0,0	100,0	51,2	100,0	1,50	25,6
325	150	0,0	0,00	17,8	64,0	0,0	100,0	53,3	100,0	1,50	26,7
350	150	0,0	0,00	18,4	66,4	0,0	100,0	55,3	100,0	1,50	27,7
375	150	0,0	0,00	19,1	68,7	0,0	100,0	57,3	100,0	1,50	28,6
400	150	0,0	0,00	19,7	71,0	0,0	100,0	59,1	100,0	1,50	29,6
425	150	0,0	0,00	20,3	73,1	0,0	100,0	61,0	100,0	1,50	30,5
450	150	0,0	0,00	20,9	75,3	0,0	100,0	62,7	100,0	1,50	31,4
475	150	0,0	0,00	21,5	77,3	0,0	100,0	64,4	100,0	1,50	32,2
500	150	0,0	0,00	22,0	79,3	0,0	100,0	66,1	100,0	1,50	33,1
525	150	0,0	0,00	22,6	81,3	0,0	100,0	67,7	100,0	1,50	33,9
550	150	0,0	0,00	23,1	83,2	0,0	100,0	69,3	100,0	1,50	34,7
576	150	0,0	0,00	23,7	85,2	0,0	100,0	71,0	100,0	1,50	35,5
600	150	0,0	0,00	24,1	86,9	0,0	100,0	72,4	100,0	1,50	36,2
700	150	0,0	0,00	26,1	93,9	0,0	100,0	78,2	100,0	1,50	39,1
800	150	0,0	0,00	27,9	100,4	0,0	100,0	83,6	100,0	1,50	41,8
900	150	0,0	0,00	29,6	106,4	0,0	100,0	88,7	100,0	1,50	44,3
960	150	0,0	0,00	30,5	109,9	0,0	100,0	91,6	100,0	1,50	45,8
1000	144	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	96,1	88,1	96,1	1,50	45,8
1250	115	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	76,9	70,5	76,9	1,50	45,8



Radio (m)	Peralte (mm)	Insuficiencia de peralte (mm)	Acel. sin compensar (m/s <sup>2</sup> )	Velocidad de circulación		Longitud de transición				Rampa de peralte real (mm/m)	Velocidad vertical (mm/s)
						L <sub>CONFORT</sub>	L <sub>GEOMÉTRICA</sub>	L <sub>DINÁMICA</sub>	L <sub>TRANSICIÓN</sub>		
				(m/s)	(km/h)	(m)	(m)	(m)	(m)		
1500	96	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	64,1	58,7	64,1	1,50	45,8
1750	82	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	54,9	50,4	54,9	1,50	45,8
2000	72	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	48,1	44,1	48,1	1,50	45,8
2500	58	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	38,4	35,2	38,4	1,50	45,8
3000	48	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	32,0	29,4	32,0	1,50	45,8
3500	41	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	27,5	25,2	27,5	1,50	45,8
4000	36	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	24,0	22,0	24,0	1,50	45,8
4500	32	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	21,4	19,6	21,4	1,50	45,8
5000	29	0,0	0,00	30,6	110,0	0,0	19,2	17,6	19,2	1,50	45,8

**300:** radio mínimo de trazado en nuevas líneas

**210:** radio mínimo de trazado en ampliación de líneas

**960:** radio mínimo para circular a la velocidad máxima (110 km/h)

**400:** radio mínimo para circular a la velocidad máxima (70 km/h)