



NAP 2-0-1.4

NORMA ADIF PLATAFORMA

# METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS

1ª EDICIÓN: ABRIL 2023

|   |            |  |              |
|---|------------|--|--------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA   |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |              |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS<br>POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |              |
| NAP 2-0-1.4   | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 1 de 46 |

## CONTROL DE CAMBIOS Y VERSIONES

| Revisión |       | Modificaciones | Puntos Revisados |
|----------|-------|----------------|------------------|
| Nº       | Fecha |                |                  |
|          |       |                |                  |
|          |       |                |                  |
|          |       |                |                  |

## EQUIPO REDACTOR

Grupo de Trabajo GT-112. Estructuras.

|   |  |
|---|--|
| Propone:  | Aprueba:   |
| Grupo de trabajo GT-112<br>Fecha: 26 de abril de 2023 | Comité de Normativa<br>Reunión de XX de XX de XXXX |

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

## PÁGINA

|   |    |
|---|----|
| 1.- INTRODUCCIÓN.....   | 4  |
| 2.- OBJETO DE LA METODOLOGÍA .....  | 4  |
| 3.- ÁMBITO DE APLICACIÓN .....  | 4  |
| 4.- METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO.....   | 4  |
| 4.1.-ESTADO ESTRUCTURAL INICIAL .....   | 5  |
| 4.1.1.-CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS EVENTOS PELIGROSOS .....                                     | 6  |
| 4.1.2.-ESTIMACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS PARA LOS VIAJEROS Y TRIPULACIÓN DEL TREN .....                               | 10 |
| 4.1.3.-CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO PARA LOS VIAJEROS Y TRIPULACIÓN DEL TREN .....                             | 11 |
| 4.2.-ESTIMACIÓN DEL RIESGO PARA LOS USUARIOS DE LA ESTRUCTURA .....   | 14 |
| 4.2.1.-CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS EVENTOS PELIGROSOS .....                                     | 14 |
| 4.2.2.-ESTIMACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS Y CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO PARA LOS USUARIOS DE LA ESTRUCTURA ..... | 14 |
| 5.- NORMATIVA DEROGADA .....  | 15 |
| 6.- DISPOSICIONES TRANSITORIAS Y ENTRADA EN VIGOR .....   | 15 |
| 7.- NORMATIVA DE REFERENCIA Y BIBLIOGRAFÍA .....  | 15 |
| ANEXO 1. MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....   | 18 |
| ANEXO 2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO.....  | 23 |
| ANEXO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A ESTRUCTURAS CLASE A .....   | 35 |
| ANEXO 4. IMPACTOS A BAJAS VELOCIDADES.....  | 45 |

## 1.- INTRODUCCIÓN

El impacto de vehículos ferroviarios descarrilados contra elementos que soportan estructuras, sobre las vías ferroviarias o junto a ellas, es un fenómeno de muy baja probabilidad de ocurrencia, como así demuestra la experiencia nacional e internacional. Sin embargo, las potenciales consecuencias de este tipo de accidentes pueden llegar a ser graves, por lo tanto requieren su análisis.

## 2.- OBJETO DE LA METODOLOGÍA

El presente documento define una metodología para la evaluación, debida a un cambio según el Reglamento de ejecución UE Nº 402/2013 que la requiera, del riesgo de colapso de una estructura existente como consecuencia del impacto de un vehículo descarrilado en elementos de apoyo de la estructura próximos a las vías.

## 3.- ÁMBITO DE APLICACIÓN

El ámbito comprende impactos de vehículos ferroviarios descarrilados contra elementos estructurales, ya construidos y próximos a las vías.

Se restringe la aplicación de la presente metodología a elementos estructurales situados a una distancia al eje de la vía más próxima menor de:

- 5,40 m para vías de ancho ibérico (1668 mm).
- 5,00 m para vías de ancho UIC (1435 mm).
- 4,40 m para vías de ancho métrico (1000 mm).

Queda fuera del alcance la evaluación del riesgo de descarrilamientos, impactos o colisiones en puntos de la red ferroviaria cuyas potenciales consecuencias no estén directamente ligadas al posible colapso de una estructura.

Además, no forman parte del ámbito de aplicación los túneles, túneles artificiales y otras estructuras similares.

En el anexo 1 se recogen las medidas de mitigación que pueden generar una reducción en la probabilidad de ocurrencia del evento peligroso o las consecuencias.

En el anexo 3 se justifica la aplicación de la metodología a estructuras clase A definidas según la Ficha UIC 777-2R.

## 4.- METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO

La presente metodología se basa en la estimación explícita del riesgo como principio de aceptación. Los riesgos se estimarán de forma cuantitativa.

La definición cuantitativa del valor de riesgo puede ser expresada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de ocurrencia} \times \text{consecuencias}$$

Para calcular la **probabilidad de ocurrencia** (descarrilamiento, impacto, colapso estructural, etc.) se debe emplear el método probabilístico incluido en la ficha:

- UIC 777-2R "Estructuras sobre líneas ferroviarias. Requisitos de construcción para la zona de vía".

En cuanto a la estimación de las **consecuencias** será necesario seguir las indicaciones de los siguientes documentos:

- Consecuencias para los viajeros y tripulación de los trenes:
  - UIC 777-2R "Estructuras sobre líneas ferroviarias. Requisitos de construcción para la zona de vía".
- Consecuencias para los usuarios de la estructura:
  - Norma UNE – EN 1990. Bases de cálculo de estructuras.
  - Norma UNE – EN 1991 – 1 – 7. Acciones en estructuras. Acciones accidentales.
  - Bibliografía de referencia (ver apartado 6).

El enfoque elegido es separar ambos riesgos (usuarios de la estructura y viajeros/tripulación de los trenes) y efectuar dos comprobaciones diferentes:

- Nivel de riesgo para los viajeros y tripulación del tren:
  - Aceptable: finaliza el proceso de evaluación del riesgo para los viajeros y tripulación del tren.
  - ALARP: se deben aplicar medidas de mitigación para reducir el riesgo tanto como sea razonablemente práctico.
  - Inaceptable: es necesario implementar medidas de mitigación que reduzcan el riesgo hasta uno de los dos niveles anteriores.
- Nivel de riesgo para los usuarios de la estructura:
  - Aceptable: finaliza el proceso de evaluación del riesgo para los usuarios de la estructura.
  - Inaceptable: es necesario implementar medidas de mitigación que reduzcan el riesgo hasta un nivel aceptable.

El riesgo se separa debido a los siguientes motivos:

- La ficha 777-2R trata todas las estructuras de igual modo, independientemente de su uso. Es decir, las consecuencias del colapso de la estructura son siempre las mismas sin importar el número potencial de víctimas.
- Se considera que no debe recibir el mismo tratamiento un paso superior de una vía de alta capacidad (autovía, autopista, etc.) y un paso superior de una vía de baja capacidad (por ejemplo, un camino de servicio).
- Las comprobaciones de la ficha 777-2R de la UIC ya consideran las posibles víctimas del paso superior, por lo tanto, estamos del lado de la seguridad (doble comprobación).

#### 4.1.-ESTADO ESTRUCTURAL INICIAL

Para la correcta aplicación de la presente metodología será necesario realizar, con antelación, una

|  |            |  |              |
|--|------------|--|--------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |              |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |              |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 5 de 46 |

inspección principal de los elementos estructurales afectados por la evaluación del riesgo de colapso.

Para ello, resultan de aplicación las siguientes Normas Técnicas de Adif:

- NAP 2-4-1.4. Inspección principal de pasos superiores sobre el ferrocarril.
- NAP 2-4-1.0. Inspección principal de puentes de ferrocarril.

La presente metodología toma como hipótesis fundamental de partida:

Nivel de gravedad de los daños (Inspección Principal)  $\leq$  N2.

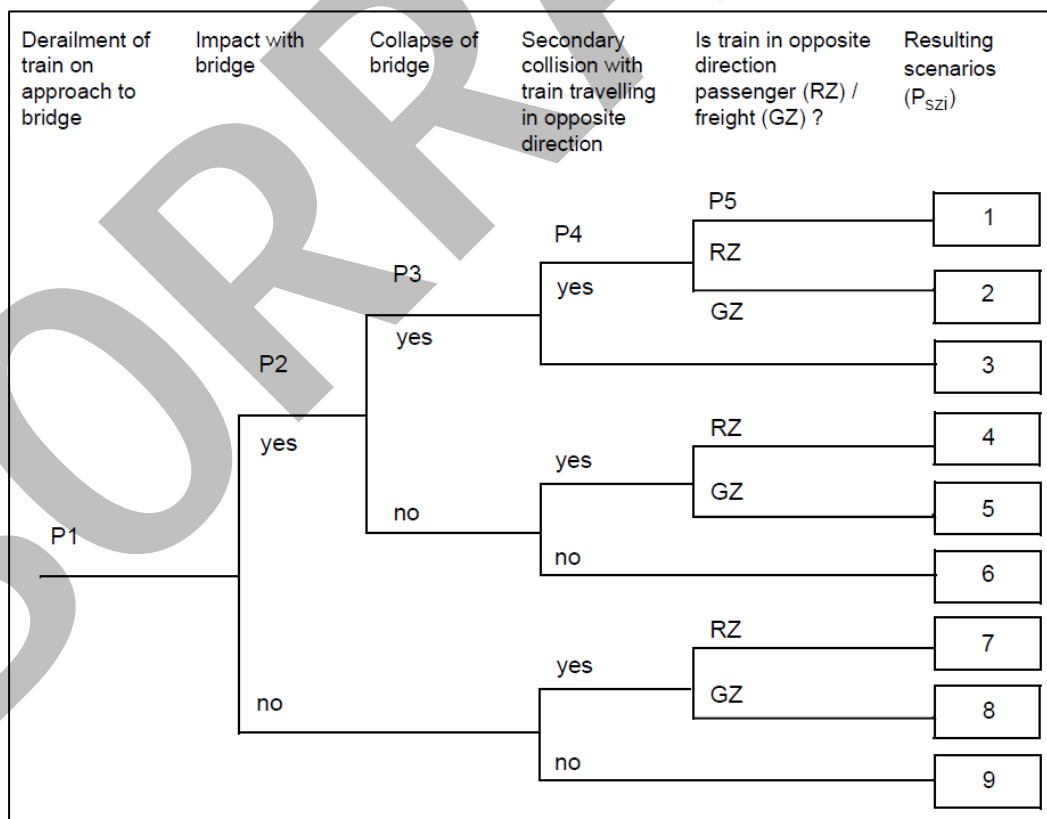
#### 4.1.1.-CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS EVENTOS PELIGROSOS

Como ya se indicó anteriormente, la norma UIC 777-2R desarrolla un método probabilístico en su anexo F para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un accidente.

Así, la probabilidad anual de ocurrencia de un accidente se expresa como producto de los siguientes factores:

$$P_{Szi} = P1 \cdot P2 \cdot P3 \cdot P4 \cdot P5$$

Además, incluye un árbol de eventos donde se muestran los diferentes escenarios resultantes del posible descarrilamiento en las proximidades de una estructura:



Hay que tener en cuenta que en los caminos "no" la probabilidad será (1-P).

Aquí, cabe aclarar que el único objeto de la presente metodología es evaluar el nivel de riesgo del posible impacto y/o colapso de una estructura, considerando las potenciales consecuencias para los viajeros, tripulación del tren, los usuarios de dicha estructura y de la infraestructura ferroviaria. Es decir, todos los eventos considerados en el árbol de la UIC 777-2R, junto con sus probabilidades y consecuencias van directamente ligados a la existencia de una estructura sobre o junto a las vías ferroviarias y a su posible colapso.

P1: probabilidad de que un tren descarrile en su aproximación a la estructura:

$$P1 = e_r \cdot d \cdot Z_d \cdot 365 \cdot 10^{-3}$$

Siendo:

$e_r$ : tasa de descarrilamiento. Proviene de datos estadísticos (UIC) de descarrilamientos producidos y depende de la existencia de aparatos de vía en la zona de influencia de la estructura y del tipo de tren.

**Tabla 1. Derailment rates for track with and without switches**

|                  | Track without switches<br>(plain track)<br>(train-kilometres) | Track with switches<br>(based on station areas)<br>(train-kilometres) |
|------------------|---|---|
| Passenger trains | $0,25 \times 10^{-8}$   | $2,5 \times 10^{-8}$  |
| Freight trains   | $2,5 \times 10^{-8}$  | $25 \times 10^{-8}$   |

$d$ : distancia a la estructura que un tren descarrilado llegaría a recorrer, suponiendo una deceleración constante "a" con el tren circulando paralelo a la traza. Si el descarrilamiento se produjera a una distancia superior, no llegaría a impactar contra la estructura.

$$d = \frac{V^2}{2 \cdot a}$$

La UIC propone una deceleración uniforme de  $3 \text{ m/s}^2$ , lo que supondría para una velocidad expresada en m/s, una distancia de parada (en metros) de:

$$d = \frac{V^2}{6}$$

Introduciendo la velocidad en Km/h, la distancia en metros se calcularía:

$$d = \frac{V^2}{77,76}$$

Para simplificar la ecuación, la UIC propone utilizar la aproximación:

$$d = \frac{V^2}{80}$$

$Z_d$ : número de circulaciones diarias por la vía. Se debe emplear como valor de cálculo la media de las circulaciones diarias oficiales por tramos de Adif o Adif-AV. En caso de que exista un estudio de demanda que prevea un aumento de tráfico significativo se tendrá en cuenta para evaluar las probabilidades de P1.

A falta de datos y, según las recomendaciones de la UIC (ficha 777-2R) se puede tomar:

- 100 trenes/día para vía única
- 200 trenes/día para vía doble

P2: probabilidad de que un tren que ha descarrilado colisione contra la estructura:

Para vía única:

$$P2 = \left[ \frac{(b-a)^2}{b} \right] \cdot 0,5 \cdot \frac{c}{d}$$

Para vía doble:

$$P2 = \left\{ \left[ \frac{(b-a)^2}{b} \right] + \left[ \frac{(b-(a+4,2))^2}{b} \right] \right\} \cdot 0,25 \cdot \frac{c}{d}$$

Siendo:

$$d = \frac{V^2}{80}$$

V: velocidad en km/h en el punto de descarrilamiento.

b: máxima desviación lateral previsible del tren descarrilado:

Su valor se calcula con la expresión:  $b = V^{0,55}$

a: distancia entre el eje de vía y el paramento de la estructura.

c: distancia paralela a la vía, a distancia "a", expuesta a riesgo de impacto por parte de un tren descarrilado.

$$c = \left( \frac{d}{b} \right) \cdot (b-a) \quad \text{para valores de } b > a$$

$$c = 0 \text{ para } b \leq a$$

P3: probabilidad de que la estructura colapse como resultado del impacto:

A mayor distancia entre el punto de descarrilamiento y la estructura, menor será la velocidad del tren y por tanto la energía transmitida en una posible colisión, aumentando la probabilidad de que la estructura no colapse. También se tiene en cuenta la robustez de los soportes.

Según el documento de la UIC, su valor se calcula:

Para  $b - t - a > 0$

$$P3 = \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left[ t \cdot \frac{(2b - 2a - t)}{(b-a)^2} \right] \right\} \cdot \alpha$$



Donde:

$t$ : desviación lateral a partir de la cual la velocidad del tren descarrilado ha bajado de 60 km/h. Se calcula con la siguiente expresión:

$$t = \frac{a \cdot d'}{d - d'}$$

$d'$ : longitud del mayor camino de descarrilamiento paralelo a la vía, a partir del cual la velocidad del tren ha caído por debajo de 60 km/h. Usando la deceleración de 3 m/s<sup>2</sup> para el tren descarrilado, el valor de  $d'$  resulta ser de 45 m.

$\alpha$ : factor adimensional que tiene en cuenta la robustez de los soportes y el grado de continuidad de la configuración estructural del soporte. En el caso de estructuras robustas e hiperestáticas se puede adoptar un  $\alpha = 0,5$ . En cualquier otro caso el valor deberá ser igual a 1,0.

Se podrá justificar un valor de  $P3 = 0$  cuando se compruebe, de manera justificada, que la estructura y/o sus posibles refuerzos o protecciones son capaces de resistir los esfuerzos provocados por un posible impacto.

$P4$ : Probabilidad de que un tren que circule por otra vía colisione contra el tren descarrilado:

Este factor tiene en cuenta la posible ocurrencia de una colisión secundaria de otro tren contra el tren descarrilado inicialmente. Es de aplicación, únicamente, cuando bajo la estructura existen dos o más vías.

Se deciden adoptar los siguientes valores:

$P4 = 0,1$  si tráfico  $\leq 100$  trenes/día

$P4 = 0,2$  si tráfico  $> 100$  trenes/día

La elección de estos valores no es arbitraria. Para comprobar su procedencia se puede revisar el apéndice F.4 de la ficha UIC 777-2R.

$P5$ : Tipo de tren circulando por la otra vía (en sentido opuesto):

Es un factor corrector en función de que la colisión secundaria se pudiera producir contra un tren de viajeros o de mercancías. Es de aplicación, únicamente, cuando bajo la estructura existen dos o más vías.

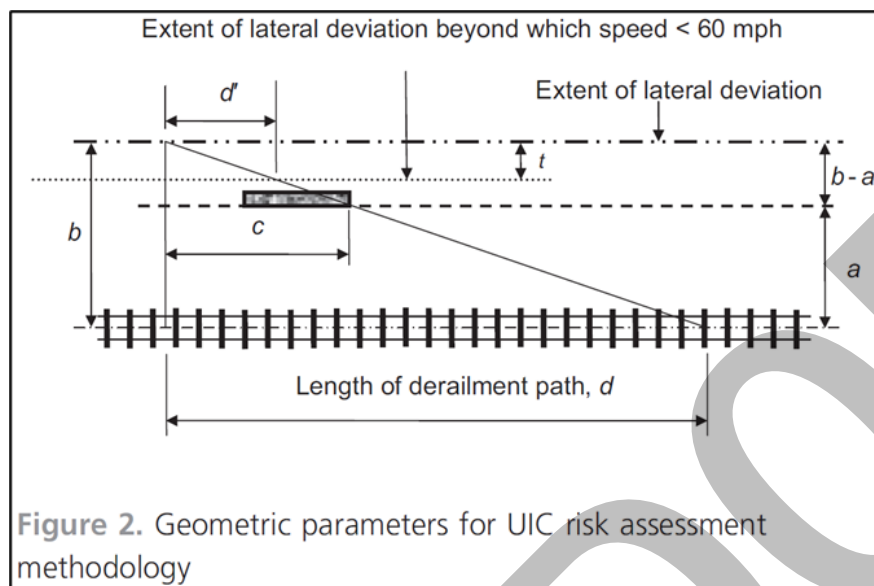
A falta de más datos se puede adoptar un valor de 0,5.

La referencia de este valor se puede encontrar en el apéndice F.4 de la ficha UIC 777-2R.

Esquema general de la metodología:

A continuación, se incluye un esquema de con los diferentes factores que influyen el cálculo de las probabilidades (*"Assessing the risk to railway structures from train impact"*, John Lane y Kevin Thompson, 2014):

|  |            |  |              |
|--|------------|--|--------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |              |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |              |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 9 de 46 |



**Nota:** las unidades de velocidad (mph) son una errata, se puede comprobar como la ficha 777-2R se cita de manera expresa el valor de 60 km/h.

#### 4.1.2.-Estimación de las consecuencias para los viajeros y tripulación del tren

La estimación del daño (número de víctimas mortales) para cada uno de los escenarios contemplados en el árbol de eventos del apartado 4.1.1. se puede obtener de la tabla 7 (UIC 777-2R. Apéndice F.7). Los escenarios Sz1 a Sz9 corresponden a trenes de viajeros y los escenarios Sz10 a Sz18 corresponden a trenes de mercancías.

Dicha tabla, para el caso de trenes de viajeros, considera que, de media, viajan 300 personas por tren.

Para velocidades de comprobación intermedias, se considera aceptable efectuar interpolaciones.

Table 7 : Average extent of damage per scenario and speed category (number of fatalities)

| Scenario for extent of damage | V = 120 km/h | V = 160 km/h | V = 230 km/h | V = 300 km/h |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Sz1                           | 15           | 27           | 56           | 96           |
| Sz2                           | 10           | 18           | 36           | 62           |
| Sz3                           | 8            | 14           | 30           | 51           |
| Sz4                           | 11           | 20           | 41           | 70           |
| Sz5                           | 7            | 12           | 25           | 43           |
| Sz6                           | 5            | 10           | 20           | 34           |
| Sz7                           | 9            | 16           | 33           | 56           |
| Sz8                           | 6            | 10           | 20           | 34           |
| Sz9                           | 3            | 5            | 10           | 17           |
| Sz10                          | 13           | 7            | -            | -            |
| Sz11                          | 3            | 2            | -            | -            |
| Sz12                          | 3            | 2            | -            | -            |
| Sz13                          | 8            | 5            | -            | -            |
| Sz14                          | 0,3          | 0,2          | -            | -            |
| Sz15                          | 0,04         | 0,02         | -            | -            |
| Sz16                          | 6            | 4            | -            | -            |
| Sz17                          | 0,3          | 0,2          | -            | -            |
| Sz18                          | 0,02         | 0,01         | -            | -            |

Como se puede observar en la tabla anterior, para el caso de trenes de mercancías (Sz10 a Sz18), las columnas están en orden inverso al que deberían. Así, por ejemplo, para el escenario Sz10 y velocidad 120 km/h le debería corresponder el valor de la 2ª columna (7 víctimas).

#### 4.1.3.-Criterio de aceptación del riesgo para los viajeros y tripulación del tren

Para el caso de estructuras de ingeniería civil es habitual adoptar un criterio de riesgo para un grupo de personas (riesgo social) ya que, el criterio de riesgo individual suele ser menos importante, dando lugar a valores de fiabilidad requerida inferiores.

Este tipo de riesgo puede ser representado por las curvas  $F-N$  (curvas ALARP) donde el eje horizontal ( $N$ ) representa las consecuencias y el eje vertical ( $F$ ) representa la probabilidad de que se superen dichas consecuencias. Este tipo de gráficos constituyen, en sí mismos, una medida del riesgo (probabilidad de ocurrencia  $\times$  consecuencia) y se puede establecer una región ALARP dentro de ellos (mediante dos líneas paralelas descendentes).

Dichas líneas descendentes, tomando el criterio de riesgo social, se expresan por la siguiente ecuación:

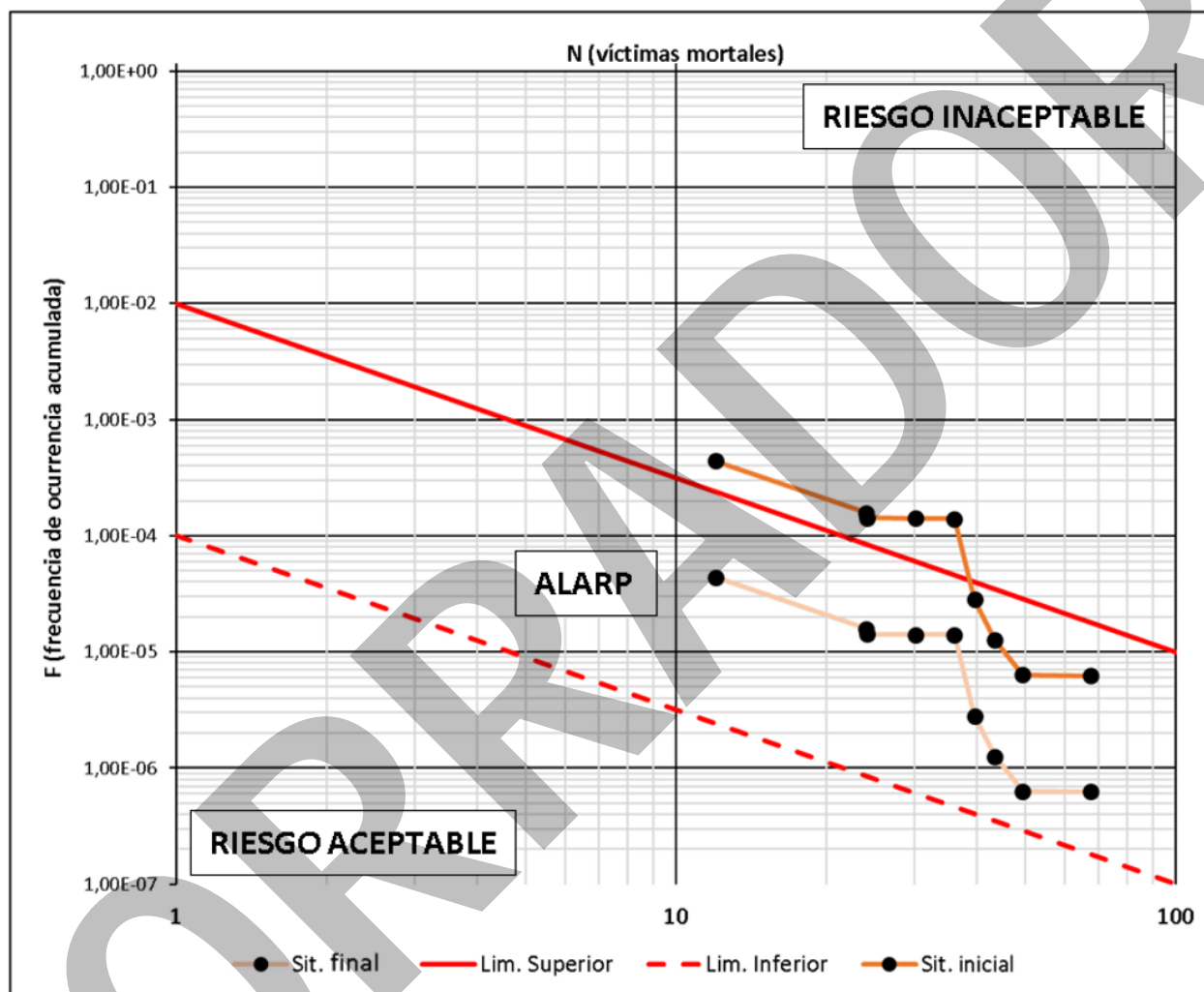
$$F \leq a \cdot N^{-k}$$

Donde  $a$  y  $k$  son constantes que pueden ser definidas mediante publicaciones de referencia y la

normativa adecuada, como se indica en el Anexo 2, obteniendo la siguiente expresión:

$$F \leq 10^{-2} \cdot N^{-1,5}$$

Por lo tanto, obtenemos el siguiente gráfico donde se deben representar cada uno de los escenarios con su probabilidad (acumulada) y consecuencia.



Niveles de riesgo:

- Riesgo aceptable: no es necesario adoptar medidas de mitigación.
- Riesgo inaceptable: es necesario adoptar medidas de mitigación.
- Riesgo ALARP: como criterio de aceptación del riesgo (viajeros y tripulación del tren) se empleará ALARP (*"as low as reasonably practicable"*). Según este criterio, se deben reducir los riesgos tanto como sea razonablemente práctico en función de los costes derivados de los posibles daños y las medidas de seguridad. Es decir, si se considera que los costes de una medida son desproporcionados con respecto a los beneficios para la seguridad que ésta proporciona, teniendo en cuenta cualquier incertidumbre en las estimaciones del riesgo, se considera que dicha medida no es necesaria.

### Estimación del riesgo en términos monetarios:

Para la estimación de costes es necesario considerar un factor de aversión al riesgo ( $A_{pf}$ ) cuyo valor suele oscilar entre 1 y 10, adoptando normalmente un valor de 2 (GCGN5612. Rail Traffic Loading Requirements for the Design of Railway Structures), es decir, el riesgo percibido será:

$$R_b = A_{pf} \cdot D_{szi}$$

Para estimar el riesgo en términos monetarios es necesario conocer el valor por evitar o prevenir un fallecido ( $V_{pf}$ ). Para ello se puede acudir al último estudio realizado por la DGT en el año 2011 (El valor monetario de una vida estadística en España). Dicho estudio se puede localizar tanto en la web oficial de la DGT ([www.dgt.es](http://www.dgt.es)) como en la web oficial del ministerio de sanidad ([www.sanidad.gob.es](http://www.sanidad.gob.es)). Dicho estudio arrojaba un valor de:

$$V_{pf}(2011) = 1.400.000 \text{ €}$$

El propio estudio indica que, este valor, debe actualizarse según el ritmo de crecimiento del PIB per cápita nominal. Así, por ejemplo, a partir de la información proporcionada por el INE:

PIB per cápita (2011): 22.761 €

PIB per cápita (2019): 26.417 € (16,06 % de incremento).

$$V_{pf}(2019) = 1.625.000 \text{ €}$$

Por lo tanto, el riesgo (en €) valdrá:

$$R_{bm} = V_{pf} \cdot D_{szi}$$

### Comparación de costes:

Para comparar los costes de las medidas preventivas/reactivas (nivel de riesgo no aceptable) con la reducción del riesgo que éstas proporcionan (en términos monetarios) se deben seguir las indicaciones de los apartados F.13 en adelante de la ficha 777-2 de la UIC.

En el caso de disponer de varias medidas de mitigación diferentes, es habitual emplear el siguiente criterio para elegir la adecuada:

$$\Delta R_{bpm} / C_{tot} \geq 1$$

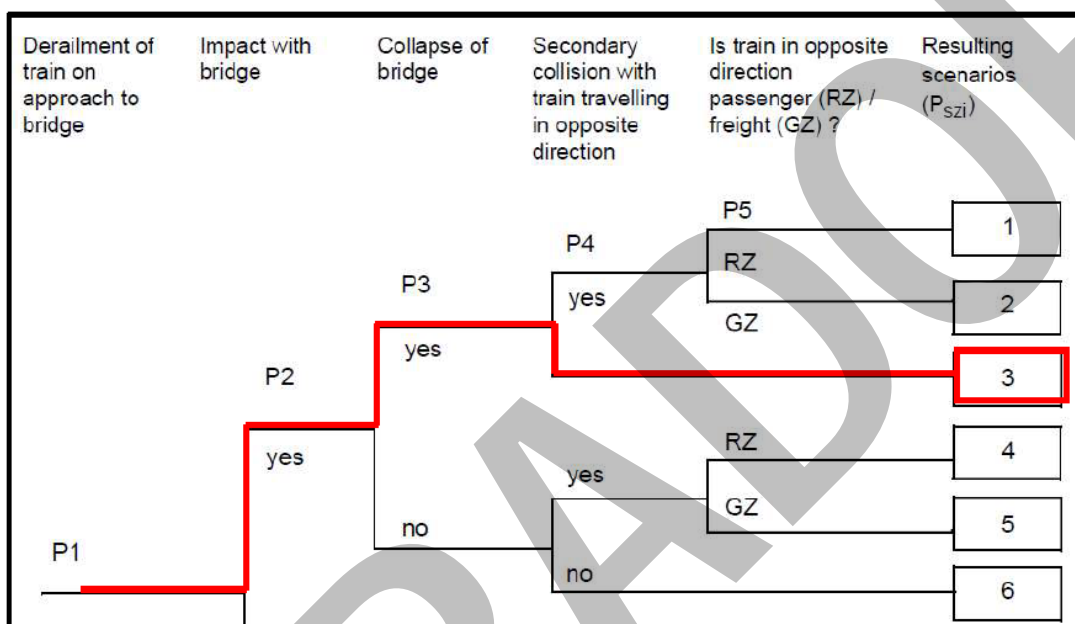
Es decir, la diferencia de riesgo en términos monetarios entre la situación inicial y final (con la medida de mitigación) debe ser mayor o igual al coste total de la medida de mitigación.

Para el coste de la medida de mitigación es necesario considerar los factores (inversión inicial, vida útil, mantenimiento, tasa de interés, etc.) que figuran en el apartado 13 de la ficha 777-2R de la UIC.

## 4.2.-ESTIMACIÓN DEL RIESGO PARA LOS USUARIOS DE LA ESTRUCTURA

### 4.2.1.-Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de los eventos peligrosos

De manera similar al apartado 4.1.1., se empleará la metodología del apéndice F de la ficha UIC – 777-2. Sin embargo, para este caso sólo es necesario calcular un escenario (el de mayor probabilidad de ocurrencia para el colapso de la estructura): Sz3.



Por lo tanto, para este caso, la fórmula a emplear será la siguiente:

$$P_{SZ3} = P1 \cdot P2 \cdot P3$$

Para la determinación de los factores P1, P2, P3 se seguirán las directrices del apartado 4.1.1.

### 4.2.2.-Estimación de las consecuencias y criterio de aceptación del riesgo para los usuarios de la estructura

Para estimar el grado de consecuencias que conlleva el colapso de la estructura se debe tener en cuenta (de forma cuantitativa o cualitativa) el número de usuarios que pueden resultar afectados. Para ello, lo habitual, según la normativa de aplicación y las publicaciones de referencia, es estimar las consecuencias en función de la importancia y el uso de la estructura (ver anexo 2).

La comprobación que se debe efectuar (escenario 3 del árbol de eventos de la ficha UIC 777-2R) será la siguiente:

$P_{SZ3} < P_{f, \text{máx. admisible}}$  → riesgo aceptable: no es necesario adoptar medidas de mitigación adicionales.

$P_{SZ3} > P_{f, \text{máx. admisible}}$  → riesgo inaceptable: es necesario adoptar medidas de mitigación adicionales.

En el caso de efectuar una comprobación de una línea con tráfico mixto (pasajeros y mercancías)

la comprobación a efectuar sería la siguiente:

$$P1_{Merc} \cdot P2_{Merc} \cdot P3_{Merc} + P1_{Pas} \cdot P2_{Pas} \cdot P3_{Pas} \leq P_{f, \text{ máx. admisible}}$$

A continuación, se fijan los valores límite de las probabilidades de fallo (ver la justificación de los valores en el Anexo 2 y 3):

| Tipo de estructura   | $P_{f, \text{ máx. admisible}}$ |
|--|---------------------------------|
| Paso superior existente ferroviario (puente de FFCC sobre vía de FFCC)                     | 1,00E-6                         |
| Paso superior existente de alta capacidad (autopistas y autovías)                          | 1,00E-6                         |
| Paso superior existente de media capacidad (IMD > 50)                                      | 1,00E-5                         |
| Paso superior existente de baja capacidad (IMD ≤ 50)                                       | 1,00E-4                         |
| Edificios existentes densamente ocupados con $A_{col} \geq 10.000 \text{ m}^2$ o sin datos | 1,00E-6                         |
| Otros edificios  | Ver anexo 4                     |

Siendo:

$A_{col}$ : área potencial de colapso afectada por el posible impacto contra uno o varios soportes próximos a la vía.

## 5.-NORMATIVA DEROGADA

La presente NAP no deroga ningún documento normativo.

## 6.- DISPOSICIONES TRANSITORIAS Y ENTRADA EN VIGOR

La presente NAP entrará en vigor en la fecha de su aprobación.

## 7.- NORMATIVA DE REFERENCIA Y BIBLIOGRAFÍA

En el contenido de esta norma se hace referencia a los documentos normativos que se citan a continuación.

En el caso de documentos referenciados sin edición y fecha se utilizará la última edición vigente; en el caso de normas citadas con versión exacta, se debe aplicar esta edición concreta.

En el caso de normas UNE-EN que establezcan condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción, que sean transposición de normas EN cuya referencia haya sido publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea, será de aplicación la última versión comunicada por la Comisión y publicada en el DOUE.

- Reglamento de ejecución (UE) Nº402/2013 relativo a la adopción de un método común de



seguridad para la evaluación y valoración del riesgo.

- ADIF-PG-101-003-007-SC-031. Gestión de riesgos del sistema de gestión de seguridad en la circulación en Adif y Adif-AV.
- Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (IAPF).
- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11).
- UNE - EN 1990:2019. Bases de cálculo de estructuras.
- UNE - EN 1991-1-7:2018. Acciones en estructuras. Acciones accidentales.
- UIC 777-2R. Estructuras sobre líneas ferroviarias. Requisitos de construcción para la zona de vía. (Ed 2ª, septiembre de 2002).
- NAP 2-0-0.4 ED3. Julio 2021. Pasos superiores.
- NAP 2-4-1.4. ED1+M1. Julio 2021. Inspección principal de pasos superiores sobre el ferrocarril.
- NAP 2-4-1.0. ED2. Enero 2023. Inspección principal de puentes de ferrocarril.
- ISO 2394:2015. Principios generales sobre fiabilidad estructural.
- ISO 13822:2010. Bases para el diseño de estructuras – evaluación de estructuras existentes.
- ISO 10252:2020. Bases para el diseño de estructuras – acciones accidentales.
- Handbook of RAMS in Railway Systems. Theory and Practice. Chapter 20. Target Reliability for New and Existing Railway Civil Engineering Structures. Miroslav Sykora et al. 2018.
- Assessing the risk to railway structures from train impact. John Lane y Kevin Thompson, 2014.
- Probabilistic Assessment of Existing Structures – Joint Committee on Structural Safety Report.
- Concrete for extreme conditions, Proceedings of the International Conference, University of Dundee, UK. Reliability of concrete column exposed to accidental action due to impact. Holický y Marková, 2002.
- IRS-70729 Prevention and Mitigation of Derailment.
- Derailment protection and containment for rail underbridges. Rail Industry Safety and Standards Board (RISSB) code of practice.
- Report on the findings of: Current practice and effectiveness of derailment containment provisions on high-speed lines. HSL-Zuid. Booz | Allen | Hamilton.
- Assessment of freight train derailment risk reduction measures (ERA). Det Norske Veritas.
- Reliability and risk acceptance criteria for civil engineering structures. Dimitris Diamantidis

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 16 de 46 |



et al. 2016.

- Human safety criteria for risk-based structural design. Miroslav Sykora et al. 2018.
- Another look at risk and structural reliability criteria. V.M. Trbojevic. 2008.
- REDUCING RISKS, PROTECTING PEOPLE (R2P2). HSE's decision-making process. 2001.
- Economic and human safety reliability levels for existing structures. Steenbergen et al. 2015.
- Rail Industry Guidance Note. GCGN5612. Rail Traffic Loading Requirements for the Design of Railway Structures.
- Bridge Branch Design Information Manual. Main Roads Western Australia.

## ANEXO 1. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

### ÍNDICE DE CONTENIDO

### PÁGINA

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....                           | 19 |
| 2. OBJETIVOS DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN ..... | 19 |
| 3. LISTADO DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN .....       | 19 |

BORRADOR

## 1. INTRODUCCIÓN

Las medidas de mitigación deben ser adecuadas para cada una de las amenazas/causas identificadas como posible origen del descarrilamiento o empeoramiento de las consecuencias del mismo (deriva lateral del vehículo, impacto contra la estructura, colapso de la misma, daños a personas, etc.).

Para ello, es fundamental identificar para cada una de las posibles amenazas, su probabilidad de ocurrencia, su gravedad y las barreras o medidas de seguridad que eliminen o mitiguen el riesgo.

Únicamente es posible llevar a cabo este proceso de manera individualizada para cada punto particular de la infraestructura ferroviaria, teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de descarrilamiento (remonte de pestaña, rotura de elementos de guiado, etc.) y las condiciones específicas del tramo (tipo de tráfico, trazado, etc.).

Como criterio general, en situaciones de alto riesgo (por ejemplo, presencia de un desvío), puede ser necesario emplear una combinación de medidas mitigadoras, justificando su elección y diseño de manera adecuada.

## 2. OBJETIVOS DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Atendiendo al orden temporal de la secuencia de eventos del posible accidente:

- Reducir las probabilidades de descarrilamiento (preferentemente).
- Reducir las consecuencias de los posibles descarrilamientos:
  - Mantener los ejes, bogies o vehículos descarrilados paralelos a la vía y lo más próximos posible a los carriles de la vía por la que circulan.
  - Evitar el impacto contra las estructuras de los vehículos descarrilados. Especialmente impactos frontales contra elementos de alta rigidez.
  - Reducir al máximo las probabilidades de colapso de la estructura.

En general, se deben minimizar los posibles daños a los viajeros, tripulación de los trenes y usuarios de la estructura.

## 3. LISTADO DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN

A continuación, se ofrece una lista no exhaustiva de referencia con las posibles medidas de seguridad o barreras.

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 19 de 46 |

| Nº | Barrera/Medida de seguridad  | Descripción   |
|----|--|---|
| 1  | Eliminar la estructura existente.  | El riesgo para los viajeros y tripulación del tren se considera mitigado (respecto al posible colapso estructural).   |
| 2  | Sustituir la estructura existente por otra con un diseño adecuado.   | Estructura que evite o disipe un posible impacto de manera eficaz.<br><br>Se debe evitar la disposición de soportes frágiles.<br><br>Es posible calcular la reducción del riesgo mediante la metodología cuantitativa del presente documento (equivale a un refuerzo estructural en la situación final respecto a la inicial).  |
| 3  | Eliminación/desplazamiento de un desvío u otro tipo de aparato de vía en las inmediaciones de la estructura. | La existencia de desvíos y otros aparatos de vía en las inmediaciones de las estructuras constituye un potencial peligro debido al aumento de las probabilidades de descarrilamiento.<br><br>La distancia de influencia del desvío respecto a la estructura a partir de la cual se considera que no tiene influencia se puede estimar mediante la siguiente expresión:<br>$d(m) = \frac{V(km/h)^2}{80}$<br><br>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (presencia de aparatos de vía en la situación final respecto a la inicial).   |
| 4  | Limitaciones de velocidad  | Una disminución de velocidad reduce la probabilidad de descarrilamiento y sus posibles consecuencias.<br><br>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (velocidad en la situación final respecto a la inicial).  |
| 5  | Limitaciones del número de trenes (tráfico)  | Reducir o limitar el tráfico disminuye la probabilidad de descarrilamiento y, por lo tanto, el riesgo total.<br><br>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (tráfico de pasajeros/mercancías en la situación final respecto a la inicial).   |
| 6  | Contracarriles   | En caso de disponer como media de mitigación contracarriles que reduzcan las probabilidades de ocurrencia del descarrilamiento se aplicará un factor reductor de P1 de la siguiente manera:<br>$P1' = P1 \cdot P_{f,cc}$<br><br>Siendo: $P_{f,cc} < 1,0$<br><br>$P_{f,cc}$ expresa la probabilidad de fallo de un contracarril con un diseño adecuado y en condiciones normales de explotación. A falta de datos (ensayos, simulaciones, datos históricos, etc.) se puede adoptar un valor de 0,5 (ver anexo G.1 de la ficha 777-2R).<br><br>Los contracarriles serán instalados de forma que eviten el remonte de la pestaña con el consecuente descarrilamiento. Se limita su aplicación a velocidades inferiores a 160 km/h.<br><br>Existen otros dispositivos diferentes como encarriladoras o carriles de seguridad que limitan la desviación lateral de un vehículo que ya ha descarrilado (ver siguiente medida nº 7). |

| Nº | Barrera/Medida de seguridad  | Descripción  |
|----|--|--|
| 7  | Encarriladoras o carriles de seguridad                                     | <p>Para considerar la restricción lateral del tren que ejercen carriles de seguridad o encarriladoras se multiplicará P2 por un factor que reduzca la probabilidad de impacto:</p> $P2' = P2 \cdot P_{f,RL}$ <p>Siendo: <math>P_{f,RL} &lt; 1,0</math></p> <p><math>P_{f,RL}</math> expresa la probabilidad de fallo de la medida de mitigación (encarriladora/carril de seguridad) una vez se ha producido el descarrilamiento. A falta de datos (ensayos, simulaciones, datos históricos) se puede adoptar un valor de 0,5 (ver anexo G.1 de la ficha 777-2R).</p> <p>Se limita su aplicación a velocidades inferiores a 160 km/h.</p>   |
| 8  | Dispositivos de guiado/contención (muretes de contención). DCD tipo 3.     | <p>Son elementos que limitan la desviación lateral de los vehículos ferroviarios una vez producido el descarrilamiento y deben ser capaces de absorber grandes fuerzas horizontales.</p> <p>Deben estar lo más cerca posible de la vía con una altura mínima de 76 cm sobre cota superior de carril. Es fundamental que este tipo de dispositivos no agraven la posibilidad de vuelco de los vehículos ferroviarios (altura suficiente del muro).</p> <p>Para considerar la restricción lateral del tren que ejercen los muros se multiplicará P2 por un factor que reduzca la probabilidad de impacto:</p> $P2' = P2 \cdot P_{f,RL}$ <p>Siendo: <math>P_{f,RL} &lt; 1,0</math></p> <p><math>P_{f,RL}</math> expresa la probabilidad de fallo de la medida de mitigación (muro) una vez se ha producido el descarrilamiento. A falta de datos (ensayos, simulaciones, datos históricos, etc.) se puede adoptar un valor de 0,5 (ver anexo G.1 de la ficha 777-2R).</p> <p>Se limita su aplicación a velocidades inferiores a 200 km/h.</p> |
| 9  | Refuerzo de las estructuras (soportes, estribos, muros y/o cimentaciones). | <p>Se deben diseñar para soportar el impacto de un vehículo descarrilado.</p> <p>Su forma geométrica debe tratar de evitar un impacto frontal y actuar como elemento de guiado-contención (ver últimas medidas de seguridad).</p> <p>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (refuerzo estructural en la situación final respecto a la inicial).</p>  |
| 10 | Desplazamiento de los soportes de la estructura.                           | <p>Se pretende alejarlos de la vía para reducir las probabilidades y la magnitud del impacto. Esta medida, en general, es poco viable.</p> <p>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (distancia entre el eje de la vía y la estructura en la situación final respecto a la inicial).</p>   |
| 11 | Elevación de la cota de la cimentación (plintos).                          | <p>Debe constituir una estructura resistente al impacto.</p> <p>Su forma en planta debería ser similar al soporte de un aliviadero de presa o unir de manera continua varios soportes.</p> <p>Deberían diseñarse con una distancia mínima de 76 cm sobre cota superior del carril.</p> <p>En general, es un sistema válido para cualquier velocidad.</p> <p>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (refuerzo estructural en la situación final respecto a la inicial).</p>   |

| Nº | Barrera/Medida de seguridad  | Descripción  |
|----|--|--|
| 12 | Estructuras similares a andenes.   | <p>Son elementos con una función de guiado-contención que resisten, al menos, a un impacto tangencial.</p> <p>Deberían diseñarse con una distancia mínima de 76 cm sobre cota superior del carril.</p> <p>En general, es un sistema válido para cualquier velocidad.</p> <p>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (refuerzo estructural en la situación final respecto a la inicial).</p>   |
| 13 | Muros resistentes al impacto que protejan soportes susceptibles de colapsar bajo un impacto. | <p>Para no agravar las consecuencias del impacto para los viajeros y la tripulación de los trenes será necesario adoptar soluciones que eviten un impacto frontal (ver la siguiente medida).</p> <p>Es recomendable, si es posible, combinarlo con otras medidas de seguridad como la disposición de contracarriles.</p> <p>Es posible calcular la reducción del riesgo, en términos monetarios, mediante la metodología cuantitativa del presente documento (refuerzo estructural en la situación final respecto a la inicial).</p> |
| 14 | Muros desviadores en estribos y refuerzos de soportes  | <p>Además del refuerzo de estribos de puentes, resulta conveniente disponer muros desviadores que eviten choques frontales con estructuras reforzadas (reducción de las consecuencias de la colisión para los viajeros/tripulación).</p>   |

BORRADOR

## ANEXO 2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO

### ÍNDICE DE CONTENIDO

### PÁGINA

|   |    |
|---|----|
| 1.CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO PARA LOS VIAJEROS Y LA TRIPULACIÓN DEL TREN ..... | 24 |
| 2.CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO PARA LOS USUARIOS DE LA ESTRUCTURA .....          | 28 |

BORRADOR

## 1. CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO PARA LOS VIAJEROS Y LA TRIPULACIÓN DEL TREN

Para el caso de estructuras de ingeniería civil es habitual adoptar un criterio de riesgo para un grupo de personas ya que, el criterio de riesgo individual suele ser menos importante, dando lugar a valores de fiabilidad requerida inferiores (JCSS 2001a; Steenbergen et al. 2015; Caspeele et al. 2016).

Este tipo de riesgo puede ser representado por las curvas  $F-N$  (también conocidas como curvas ALARP) donde el eje horizontal ( $N$ ) representa las consecuencias y el eje vertical ( $F$ ) representa la probabilidad de que se superen dichas consecuencias. Este tipo de gráficos constituyen, en sí mismos, una medida del riesgo (probabilidad de ocurrencia x consecuencia) y se puede establecer una región ALARP dentro de ellos (mediante dos líneas paralelas descendentes).

Dichas líneas descendentes, tomando el criterio de riesgo grupal, se expresan por la siguiente ecuación:

$$F \leq a \cdot N^{-k}$$

Donde  $a$  y  $k$  son constantes que pueden ser definidas mediante publicaciones de referencia y la normativa adecuada, como se indica en los siguientes párrafos.

La constante  $a$  representa la frecuencia de ocurrencia de eventos con una o más víctimas y  $k$  considera el grado de aversión al riesgo ( $k > 1$  define curvas con aversión al riesgo y  $k < 1$  con propensión al riesgo).

### Revisión de los criterios de Reino Unido y Holanda:

A continuación, se expone parte del contenido del artículo *"Another look at risk and structural reliability criteria"* de Vladimir Milan Trbojevic. Se puede encontrar en el volumen 101 de la revista *"Structural Safety"* editada por Elsevier.

Este artículo ha sido citado en más de 50 documentos de investigación sobre seguridad estructural por otros autores de reconocido prestigio en la materia y que también figuran en la presente metodología (por ejemplo, *"Handbook of RAMS in Railway Systems"* Miroslav Sykora et al. 2018).

Es interesante revisar el criterio de aceptación de riesgo social de Reino Unido y Holanda ya que estos dos países destacan en el empleo de análisis cuantitativos de riesgo. (Trbojevic, 2008).

El criterio de Reino Unido es menos estricto que el de Holanda. El límite superior de la zona de riesgo tolerable no se usa como un instrumento de control preciso del riesgo, sino que se trabaja con el método ALARP para tratar de disminuir los riesgos. (Trbojevic, 2008).

En Holanda, el riesgo debe estar por debajo del límite superior de la zona de riesgo tolerable, sin embargo, no es necesario seguir reduciendo el riesgo más allá. (Trbojevic, 2008).

Por lo tanto, el nivel de seguridad alcanzado por ambos niveles es similar. (Trbojevic, 2008).

#### 1. Reino Unido. "Health and Safety Executive (HSE). Reducing risks, protecting people" (R2P2):

Define la curva  $F-N$  mediante un punto de anclaje de la siguiente forma: se considera intolerable un accidente con 50 personas fallecidas o más, con una frecuencia de 1/5.000 por año (límite superior de la zona de riesgo tolerable). La zona de riesgo tolerable queda delimitada por el límite inferior que se sitúa tres órdenes de magnitud más abajo del límite superior.

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 24 de 46 |

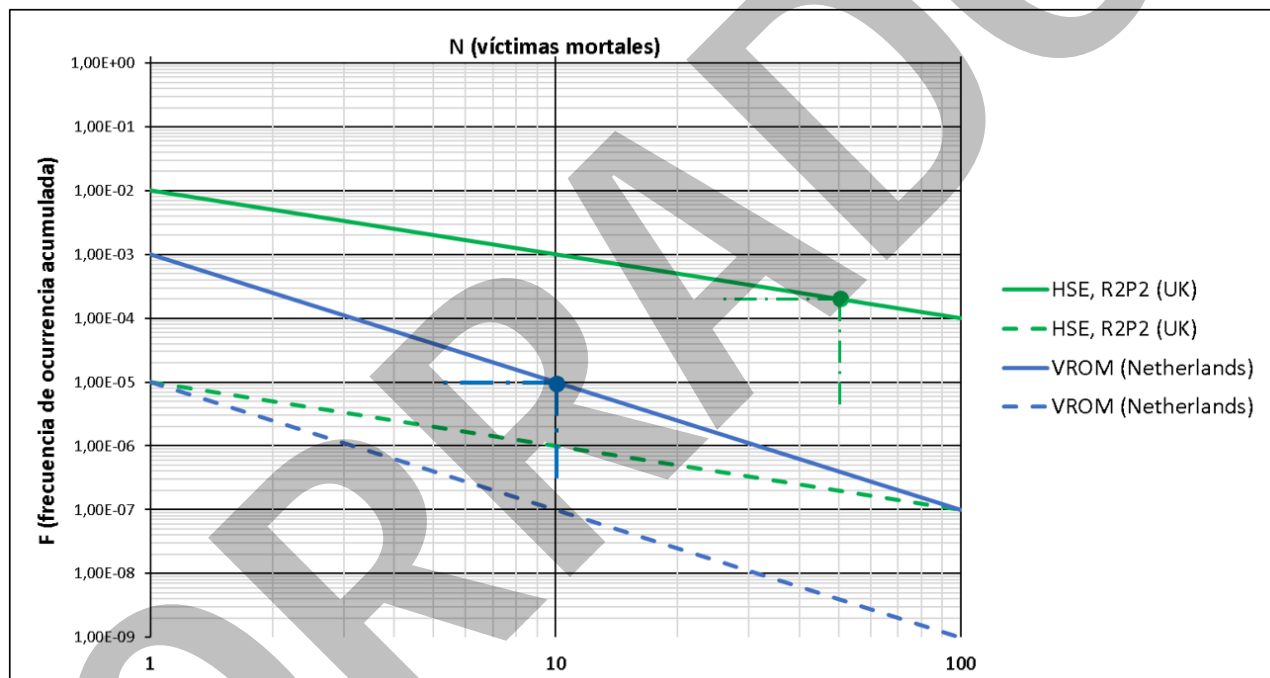


La pendiente de ambas curvas (factor de aversión) es  $-1$  que, como se puede ver en el propio artículo de Trbojevic y otras publicaciones, puede ser insuficiente para peligros con un gran número de posibles víctimas.

## 2. Holanda. "Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment" (VROM):

Se basa en la equivalencia entre un nivel de riesgo individual de  $10^{-6}$  corresponde a un punto de anclaje para el riesgo social de  $10^{-5}$  por año para 10 o más fallecidos. Además, aplican un factor de aversión de 2 (pendiente de la curva de  $-2$ ) para asignar un mayor peso a accidentes con grandes consecuencias. La zona de riesgo tolerable queda delimitada por el límite inferior que se sitúa dos órdenes de magnitud más abajo del límite superior.

En la siguiente figura podemos ver los dos criterios de aceptación de riesgo junto con el límite inferior que delimita la zona de riesgo tolerable (región ALARP). Además, se reflejan los puntos de anclaje para las curvas superiores de Reino Unido y Holanda.



Dado que la estrategia en el análisis de riesgo en la presente metodología será similar a la empleada en Reino Unido (disminuir los riesgos de la zona ALARP tanto como sea razonablemente posible), la curva elegida será más restrictiva pero próxima a ella.

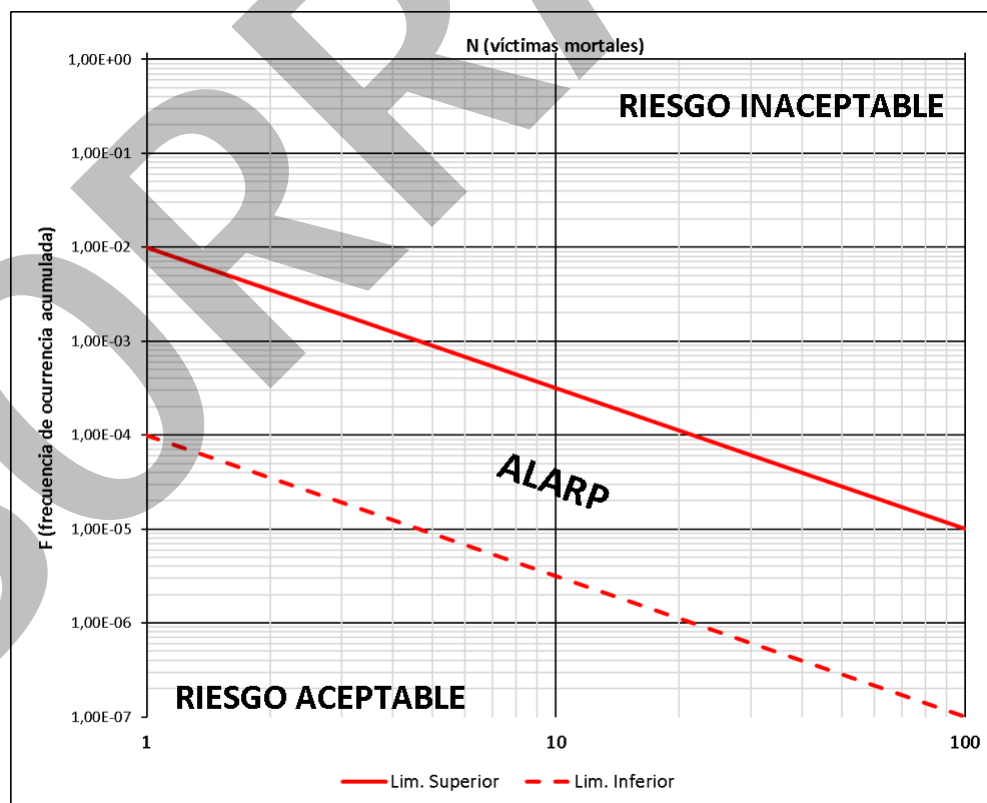
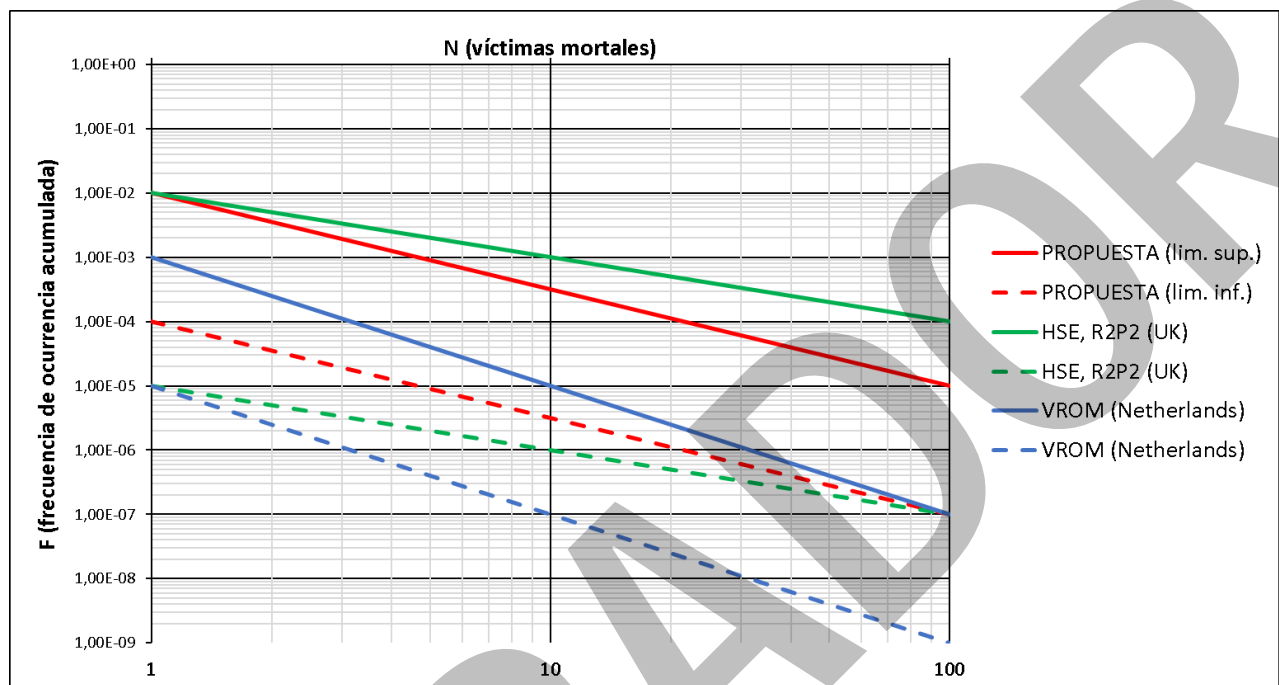
En lugar de conservar el punto de anclaje original de la curva de Reino Unido se decide conservar el origen de ésta ( $N = 1$ ) dando como resultado un coeficiente  $a = 10^{-2}$ .

El factor de aversión ( $k$ ) se encuentra, de forma habitual, entre 1 y 2 (*Vrouwenvelder et al. 2001*). Además, se puede comprobar este hecho en todas las curvas de la bibliografía de referencia.

Como solución de compromiso se decide adoptar un factor de aversión de 1,5 para considerar la mayor aversión a los accidentes con gran número de víctimas. Por lo tanto, obtenemos un coeficiente  $k = 1,5$  y la expresión que define la curva sería:

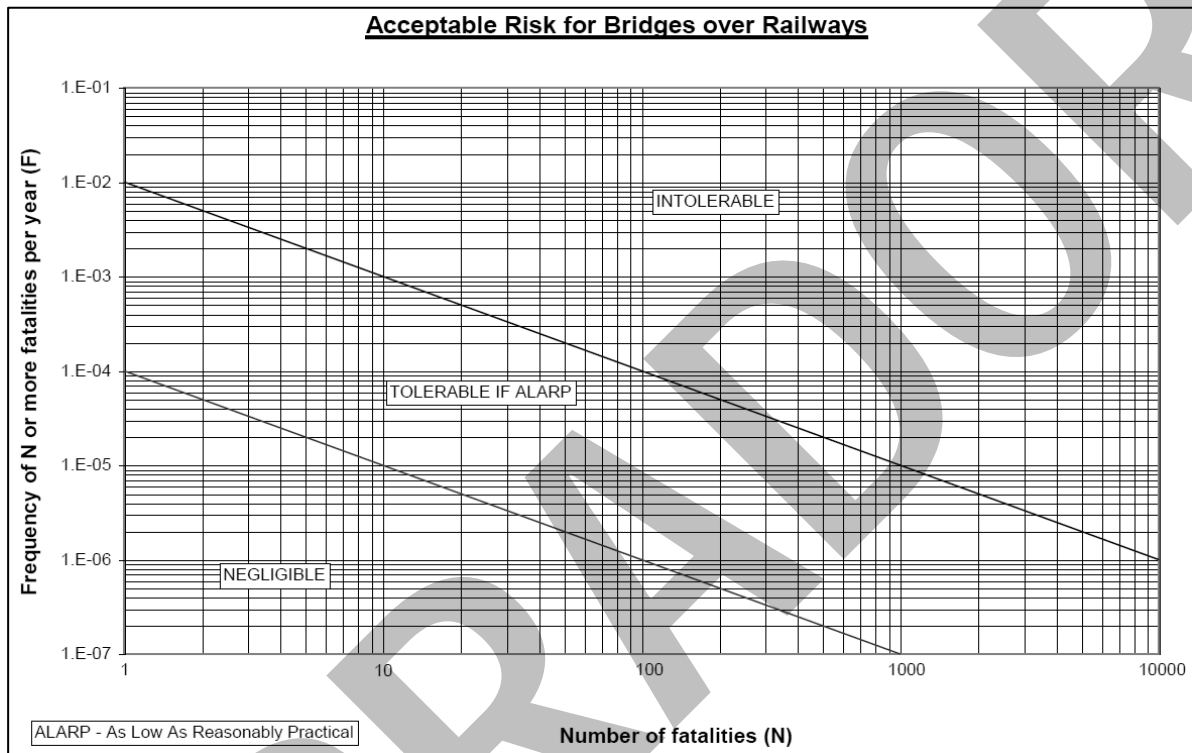
$$F \leq 10^{-2} \cdot N^{-1,5}$$

En las siguientes figuras podemos ver como quedaría definida la curva elegida. Además, como límite inferior de la región ALARP se define con otra curva de igual pendiente desplazada dos órdenes de magnitud ( $a \times 10^{-2}$ ), ya que es el valor habitualmente empleado en la definición de la región ALARP (Miroslav Sykora et al. 2018).



### Comparación con el criterio australiano:

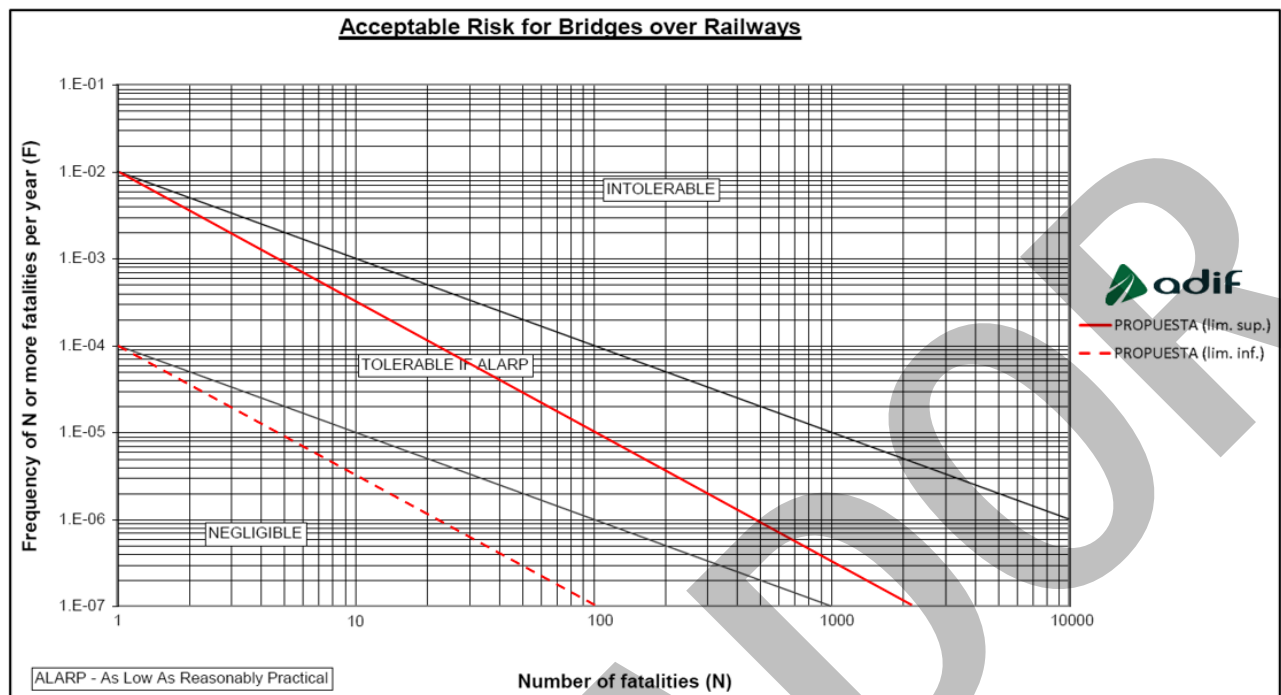
Una vez definido el criterio de aceptación del riesgo para los viajeros es posible establecer comparaciones con criterios de otras administraciones. El Gobierno del Estado de Australia Occidental, para el caso concreto de pasos superiores expuestos a un posible impacto de vehículos ferroviarios, establece como criterio de aceptación del riesgo las siguientes curvas F-N:



Fuente de la imagen: Bridge Branch Design Information Manual. Main Roads Western Australia.

La curva superior coincide con el criterio de Reino Unido y la inferior es el resultado de desplazar la anterior dos órdenes de magnitud para definir la zona ALARP.

En la siguiente imagen se puede observar como el criterio adoptado en el punto anterior (a partir de los criterios de Reino Unido y Holanda) es más restrictivo debido a que, aun partiendo del mismo origen para 1 o más víctimas, la aversión (pendiente de las curvas) es mayor.



## 2. CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL RIESGO PARA LOS USUARIOS DE LA ESTRUCTURA

### Clases de consecuencias:

Las diferentes clases de consecuencia, con su descripción y ejemplos, quedan definidas en la tabla B.1 de la norma UNE-EN 1990. Bases de cálculo de estructuras.

**Tabla B.1 – Definición de las clases de consecuencias**

| Clases de consecuencias | Descripción  | Ejemplos de edificios y obras de ingeniería civil  |
|-------------------------|--|--|
| CC3                     | <b>Consecuencia grave</b> de pérdida de vidas humanas; o consecuencias económicas, sociales o medio ambientales <b>muy importantes</b>     | Estadios, edificios en que las consecuencias de un fallo son graves (por ejemplo, una sala de conciertos)  |
| CC2                     | <b>Consecuencia moderada</b> de pérdida de vidas humanas; o consecuencias económicas, sociales o medioambientales <b>considerables</b>     | Edificios residenciales y de oficinas, edificios públicos donde las consecuencias de un fallo son moderadas (por ejemplo, un edificio de oficinas) |
| CC1                     | <b>Consecuencia leve</b> de pérdida de vidas humana y consecuencias económicas, sociales o medioambientales <b>mínimas o despreciables</b> | Edificios agrícolas en los que la gente no entra normalmente (por ejemplo, almacenes) invernaderos   |

A su vez, en el anexo (AN.2), punto 3.4 (1) de la norma UNE-EN 1991 -1-7 se indica lo siguiente para las clases de consecuencia:

*“A efectos del tratamiento de la acción accidental de impacto sobre elementos estructurales, los **puentes** se consideran en general de **clase CC2** (consecuencias de fallo medias), salvo en aquellos proyectos específicos en que la autoridad competente determine otra cosa.”*

Por lo tanto, como criterio general, se considera para los puentes una **clase de consecuencia CC2 (moderada)**.

#### Clases de fiabilidad:

A continuación, se muestran las diferentes clases de fiabilidad asociadas con las clases de consecuencias vistas en el apartado anterior.

Los valores mínimos recomendados para el índice de fiabilidad  $\beta$  (estados límites últimos) para el diseño de estructuras nuevas según la tabla B.2. de la UNE-EN 1990 (Eurocódigo, bases de cálculo) son:

**Tabla B.2 – Valores mínimos recomendados para el índice de fiabilidad  $\beta$  (estados límite últimos)**

| Clases de fiabilidad | Valores mínimos de $\beta$     |                                  |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
|                      | Periodo de referencia de 1 año | Periodo de referencia de 50 años |
| RC3                  | 5,2                            | 4,3                              |
| RC2                  | 4,7                            | 3,8                              |
| RC1                  | 4,2                            | 3,3                              |

Sin embargo, para la evaluación de estructuras existentes, la UNE-EN 1990 no establece ningún valor o criterio. Por ello, se decide acudir a la norma ISO 13822 (Bases para el diseño de estructuras – evaluación de estructuras existentes) donde en el apartado 7.5 se establece:

El empleo de niveles de fiabilidad menores para estructuras existentes es posible mediante una justificación socio – económica.

Además, el anexo F de la ISO 13822, apartado F.1. indica:

El incremento de costes que supone la mejora de una estructura existente para alcanzar los niveles de fiabilidad exigibles puede ser muy elevado, mientras que para estructuras nuevas el incremento de costes derivado de una mejora de la seguridad estructural en fase de diseño es, generalmente muy bajo. Consecuentemente, se adoptan criterios conservadores en las normas de diseño.

Tomando como referencia el principio ALARP, en general, el coste derivado de la medida de seguridad (incremento del nivel de fiabilidad en una estructura existente) para alcanzar los niveles exigibles en las normas de diseño (UNE 1990) es muy superior a la reducción de riesgo que dicha medida proporciona.

Siguiendo este mismo razonamiento, la ficha UIC 777-2, en el apartado 6.5. (evaluación de medidas para estructuras existentes) propone:

Si no existen aparatos de vía en la proximidad de la estructura, no es necesario tomar medidas adicionales.

Es decir, no es rentable en términos de reducción de riesgo y el coste que supone la medida de mitigación, salvo que las probabilidades de ocurrencia del peligro sean muy altas (la presencia de aparatos de vía aumenta las probabilidades de descarrilamiento 10 veces según la ficha 777-2).

Hasta ahora, las normas y recomendaciones anteriores no proponen una reducción concreta (en forma numérica) del valor de fiabilidad exigible. Por lo tanto, se decide tomar como referencia las publicaciones técnicas más relevantes sobre fiabilidad estructural:

|  |  |
|--|--|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS | COMITÉ DE NORMATIVA                            |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN                                     |
|  | ABRIL 2023                                     |
|  | Pág. 29 de 46                                  |

- A. *Probabilistic Assessment of Existing Structures – Joint Committee on Structural Safety Report. Dimitris Diamantidis. 2001.*
- B. *Handbook of RAMS in Railway Systems. Theory and Practice. Chapter 20. Target Reliability for New and Existing Railway Civil Engineering Structures. Miroslav Sykora, Dimitris Diamantidis, Milan Holicky, and Karel Jung. 2018.*

En dichas publicaciones los diferentes autores coinciden en una reducción del valor de fiabilidad de, al menos:

$$\Delta\beta = 0,5$$

Es importante aclarar que, la justificación de dicha reducción está fundamentada en el mismo razonamiento del anexo F de la ISO 13822.

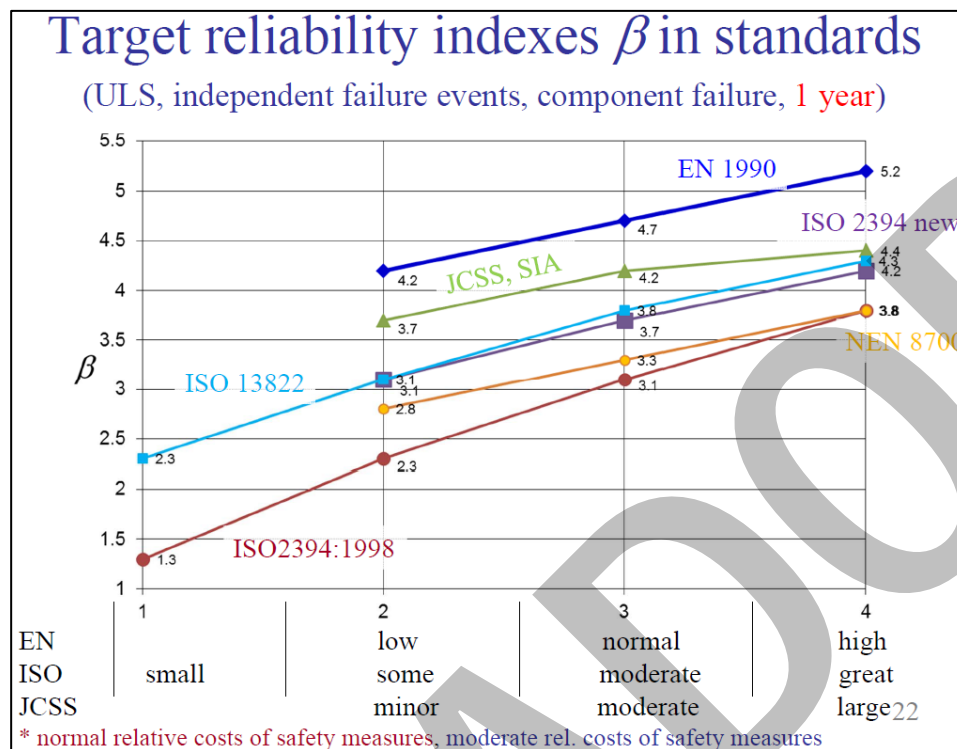
Sin embargo, es posible que existan estructuras en las que la reducción de fiabilidad no sea posible debido a la gravedad del daño frente a un posible fallo estructural, por ejemplo:

- Puentes de autovía o autopista sobre líneas ferroviarias.
- Puentes donde se producen, de forma habitual, grandes retenciones de tráfico o acumulación de personas.
- Puentes ferroviarios sobre líneas ferroviarias.
- Estaciones de viajeros.

En estos casos no se considera la reducción del valor de fiabilidad.

Por último, cabe destacar que los índices de fiabilidad empleados (UNE-EN 1990) son bastante más elevados que los considerados en el resto de las normas, incluyendo la reducción de  $\Delta\beta = 0,5$ . A continuación, se pueden observar los diferentes índices de fiabilidad (en función de las consecuencias del fallo), para el caso de ELU y periodo de referencia de 1 año, en otras normas de referencia:





#### Probabilidad de fallo máxima admisible de la estructura:

En la evaluación de la probabilidad de fallo de la estructura se deben considerar dos situaciones de diseño diferentes (*"Concrete for extreme conditions", Proceedings of the International Conference, University of Dundee, UK. Reliability of concrete column exposed to accidental action due to impact. Holický y Marková, 2002*):

- Situación persistente (normal) de diseño N, la cual ocurrirá con una probabilidad de  $P_N$ .
- Situación accidental (impacto de vehículo ferroviario) de diseño, la cual ocurrirá con una probabilidad de  $P_A$ .

Para eventos mutuamente excluyentes (N y A) se cumple  $P_N + P_A = 1$ . Aplicando el teorema de la probabilidad total, la probabilidad de fallo puede expresarse:

$$P_f = P_{fN} \cdot P_N + P_{fA} \cdot P_A$$

La probabilidad de situación accidental es, generalmente, muy baja. Su probabilidad complementaria es aproximadamente la unidad,  $P_N = 1 - P_A \approx 1$ . Por lo tanto, se obtendría la siguiente expresión:

$$P_f \approx P_{fN} + P_{fA} \cdot P_A$$

Si la probabilidad de fallo  $P_f$  está limitada por el valor objetivo  $P_{f, \text{máx. admisible}}$  se debería satisfacer la siguiente condición:

$$P_A \cdot P_{fA} \leq P_{f, \text{máx. admisible}} - P_{fN}$$

Si consideramos la metodología de la ficha 777-2 de la UIC las probabilidades se pueden expresar de la siguiente manera:

|  |  |
|--|--|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS | COMITÉ DE NORMATIVA                            |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN                                     |
| ABRIL 2023   | Pág. 31 de 46                                  |

$$P_{fA} = P3$$

$$P_A = P1 \cdot P2$$

En cuanto al término  $P_{fN}$  (probabilidad de fallo en situación normal) y, considerando las siguientes condiciones:

- 1) El valor de  $P_{fN}$  (entre  $10^{-7}$  y  $10^{-8}$ ) es significativamente más pequeño que el término  $P_{f, \text{máx. admisible}}$ , especialmente en estructuras existentes donde las exigencias de fiabilidad son más bajas y, por lo tanto,  $P_{f, \text{máx. admisible}}$  más altas.
- 2) Para estructuras existentes, en la gran mayoría de los casos, no es posible estimar  $P_{fN}$ .
- 3) El valor de  $P_{fA}$  calculado según la ficha 777-2 UIC (P3) es bastante conservador como se puede ver en la publicación de Holický y Marková, 2002.

Se decide simplificar la expresión (al menos para la comprobación de estructuras en buen estado de conservación) de la siguiente manera:

$$P_A \cdot P_{fA} = P1 \cdot P2 \cdot P3 \leq P_{f, \text{máx. admisible}}$$

La comprobación a efectuar (escenario 3 del árbol de eventos de la ficha UIC 777-2R) será la siguiente:

$P_{SZ3} < P_{f, \text{máx. admisible}} \rightarrow$  riesgo aceptable: no es necesario adoptar medidas de mitigación adicionales.

$P_{SZ3} > P_{f, \text{máx. admisible}} \rightarrow$  riesgo inaceptable: es necesario adoptar medidas de mitigación adicionales.

En el caso de efectuar una comprobación de una línea con tráfico mixto (pasajeros y mercancías) la comprobación a efectuar sería la siguiente:

$$P1_{\text{Merc}} \cdot P2_{\text{Merc}} \cdot P3_{\text{Merc}} + P1_{\text{Pas}} \cdot P2_{\text{Pas}} \cdot P3_{\text{Pas}} \leq P_{f, \text{máx. admisible}}$$

La probabilidad de fallo máxima admisible,  $P_{f, \text{máx. admisible}}$  la obtendremos de la tabla C.1 de la UNE – EN 1990.

**Tabla C.1 – Relación entre  $\beta$  y  $P_f$**

| $P_f$   | $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-4}$ | $10^{-5}$ | $10^{-6}$ | $10^{-7}$ |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\beta$ | 1,28      | 2,32      | 3,09      | 3,72      | 4,27      | 4,75      | 5,20      |

Por lo tanto, la máxima probabilidad de fallo máxima admitida (considerando que las consecuencias del colapso de la estructura son moderadas) es igual a:

Estructuras nuevas (clase CC2):  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-6}$

Estructuras existentes (salvo las de gran ocupación\*):  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-5}$

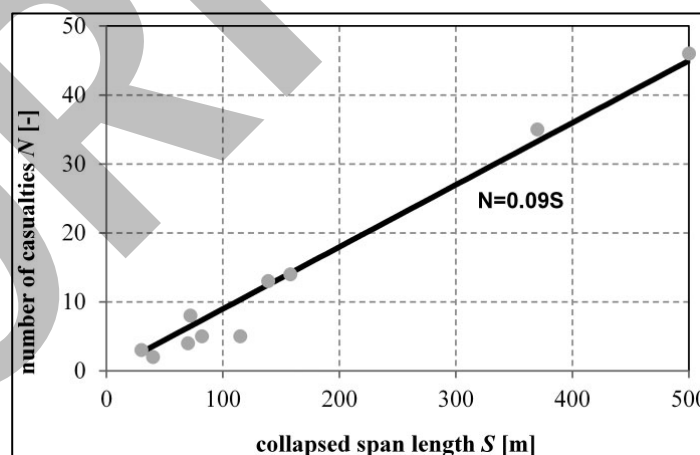


**\*Nota:** para el caso de estructuras existentes de gran ocupación (puentes de autopistas, autovías, tramos con retenciones habituales, pasarelas y estructuras con gran número de personas y otros casos similares) y, por lo tanto, con mayores consecuencias se tomará:  $\beta = 4,75$  y  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-6}$ .

Además, en el caso de un **puente ferroviario sobre una línea de ferrocarril**, para tener en cuenta también los riesgos para los usuarios de la estructura, se supondrá, al menos un  $\beta = 4,75$  independientemente de si la estructura es nueva o existente.

El valor límite de  $\beta = 4,27$  y  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-5}$  para estructuras existentes, puede ser, en determinados casos (paso superior de pequeñas dimensiones o con una IMD muy baja), demasiado exigente debido a:

- Se considera siempre una clase de consecuencia CC2 (edificios residenciales/oficinas) para todos los puentes, independientemente de sus potenciales consecuencias (anejo nacional, Eurocódigo UNE-EN 1991 -1-7).
- El resto de las normas estructurales ofrecen índices de fiabilidad menores (ver gráfica apartado anterior "*Target reliability indexes  $\beta$  in standards*").
- La reducción de fiabilidad ( $\Delta\beta = 0,5$ ) es la mínima propuesta por los autores de referencia y se aplica sobre los mayores índices de toda la normativa estructural (Eurocódigo).
- $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-5}$  equivale a un fallo cada 100.000 años (corresponde con el nivel de frecuencia "extremadamente improbable" del anexo C de la UNE-EN 50126-1 RAMS).
- En general, el número de potenciales víctimas, será inferior a 10, como se puede ver en la siguiente figura de la publicación "*Economic and human safety reliability levels for existing structures. Steenbergen et al. 2015*".



Considerando la  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-5}$  y un posible número de víctimas inferior a 10 obtenemos un criterio similar al holandés (*Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. VROM*) donde se consideraba inaceptable  $10^{-5}$  por año para 10 o más fallecidos (punto de anclaje).

Como puede verse en la figura siguiente, extraída de la publicación "*Economic and human safety reliability levels for existing structures. Steenbergen et al. 2015*" puede ser razonable reducir aún más (estructuras con consecuencia baja debido a su colapso) el índice de fiabilidad y, consecuentemente, aumentar la probabilidad de fallo máxima admisible:

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 33 de 46 |

**Table 7.** Reliability indices for bridges derived from group risk criterion

| Span length $S$ [m] | $\beta_{GR}$ (annual) |
|---------------------|-----------------------|
| $S < 20$            | 2.7                   |
| $20 < S < 50$       | 3.3                   |
| $50 < S < 100$      | 3.7                   |
| $S > 100$           | 4.4                   |

La anterior publicación, como puede verse en la figura, considera que las potenciales consecuencias del colapso de la estructura van ligadas a la longitud del vano (mayores vanos, mayor número de potenciales víctimas).

Por todo lo anterior, de forma general, se adoptarán los valores propuestos inicialmente ( $10^{-6}$  y  $10^{-5}$ ). Sin embargo, es posible que, en determinados casos y de forma justificada, reducir aún más la fiabilidad exigida a la estructura existente (pasos superiores con  $IMD \leq 50$ ).

Por último, resulta conveniente aclarar que para la comprobación del nivel de riesgo para los usuarios de la estructura no se establece una región ALARP por los siguientes motivos:

- El criterio de aceptación de riesgo, como se ha visto en los párrafos anteriores, se considera suficientemente exigente (similar al caso holandés) y no es necesario reducir el riesgo más allá.
- En cuanto a posibles situaciones donde el nivel de riesgo para los usuarios de la estructura sea aceptable pero muy próximo al límite será necesario realizar un estudio más exhaustivo sobre el número de circulaciones previsto en el tramo de análisis en función de la demanda para los próximos años.

### ANEXO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A ESTRUCTURAS CLASE A

#### ÍNDICE DE CONTENIDO

#### PÁGINA

1. CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DE LAS ESTRUCTURAS SOMETIDAS A POSIBLES IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS. CLASES A Y B. .... 36
2. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LA FICHA UIC 777-2R. .... 37
3. CRITERIOS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CLASE B A CLASE A ..... 43

## 1. CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DE LAS ESTRUCTURAS SOMETIDAS A POSIBLES IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS. CLASES A Y B.

Ficha UIC 777-2R

En la Ficha UIC 777-2R (apartado 2) se establece una clasificación cualitativa de las estructuras en función de su uso:

- Class A structures:

Superstructures supporting elevated structures that are permanently occupied (such as offices, lodgings, business premises) or serve as a temporary gathering place for people (such as theatres and cinemas) as well as all the multi-storey structures which are only subject to short-term occupancy (such as multi-storey car parks and warehouses).

- Class B structures:

Superstructures not supporting elevated structures, such as roadways, road bridges, railway bridges, footbridges, and similar structures. Single-storey structures not providing long-term occupancy (e.g. parking areas, warehouses) should be allocated to this class.

Para las estructuras Clase A se establecen, a su vez, diferentes subcategorías en función de la localización de los elementos de soporte:

- Zona 1: soportes situados a 3 metros o menos del eje de la vía más cercana a la estructura.
- Zona 2: soportes situados entre 3 y 5 metros del eje de la vía más cercana a la estructura.
  - Grupo 1: soportes expuestos al posible impacto de trenes que circulan a una velocidad máxima entre 50 y 120 km/h.
  - Grupo 2: soportes expuestos al posible impacto de trenes que circulan a una velocidad máxima de 50 km/h.
  - Grupo 3: soportes localizados junto a vías de apartado, clasificación o formación de trenes con una velocidad máxima de 20 km/h.
- Zona 3: soportes localizados al final de una vía.

En función de la zona y el grupo, la ficha UIC prescribe diferentes condiciones de diseño y construcción de las estructuras de soporte:

- ✓ Tipologías estructurales de los elementos de soporte (por ejemplo, muros continuos) y elementos protectores (barreras o muros).
- ✓ Dimensiones geométricas de los diferentes elementos.
- ✓ Fuerzas de impacto para el diseño estructural de los elementos de soporte y barreras.
- ✓ Capacidad de las toperas para el caso de estructuras situadas en zonas tipo 3.

Eurocódigo UNE-EN 1991-1-7. Acciones accidentales

El Eurocódigo UNE-EN 1991-1-7 relativo a las acciones accidentales sobre estructuras propone una clasificación similar en su apartado 4.5.1.2. (hace referencia a la propia ficha de la UIC 777-2R).

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 36 de 46 |

**Tabla 4.3 – Clases de estructuras sometidas a un impacto producido por el descarrilamiento de trenes**

|                |  |
|----------------|--|
| <b>Clase A</b> | Estructuras que pasan sobre o junto a ferrocarriles en servicio que o bien están permanentemente ocupadas, o bien sirven como lugar de acumulación temporal de personas, o bien cuentan con más de un piso                       |
| <b>Clase B</b> | Estructuras masivas que pasan sobre o junto a ferrocarriles en servicio tales como puentes de carreteras o edificios de un piso que no están permanentemente ocupados o no sirven como lugar de acumulación temporal de personas |

A continuación, establece diferentes prescripciones de diseño en función de la clase de estructura, así:

- Clase A (hasta 120 km/h): Se determinan las fuerzas de impacto que deben resistir los elementos estructurales portantes (pilares, muros, etc.).

**Tabla 4.4 – Valores de cálculo indicativos de las fuerzas de estáticas horizontales producidas por el impacto para estructuras clase A sobre o a lo largo de las vías de tren**

| Distancia "d" de los elementos estructurales al eje (centro) de la vía más próxima (m) | Fuerza $F_{dx}^a$ (kN)  | Fuerza $F_{dy}^a$ (kN)  |
|--|---|---|
| Elementos estructurales: $d < 3$ m   | A especificar para cada proyecto particular. Se proporciona más información en el anexo B | A especificar para cada proyecto particular. Se proporciona más información en el anexo B |
| Para muros continuos y estructuras tipo muro: $3 \text{ m} \leq d \leq 5 \text{ m}$    | 4 000   | 1 500   |
| $d > 5$  | 0   | 0   |

a  $x$  = dirección de las vías,  $y$  = perpendicular a la dirección de las vías.

- Clase B: Los requisitos o prescripciones pueden basarse una evaluación de riesgos. En el Anexo B (informativo) se proporcionan directrices sobre la evaluación de riesgos en el campo de las estructuras de edificación e ingeniería civil.

## 2. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LA FICHA UIC 777-2R.

Factores que influyen el nivel de riesgo para cada una de las clases de estructuras (Clase A y B)

La creación de dos clases cualitativas de estructuras, en función de su uso, se debe a:

- El riesgo en estructuras de Clase A está generalmente asociado al daño a las personas que se encuentran dentro de la estructura (primer factor que figura en la lista del punto 3.1.1. de la ficha UIC)
- El riesgo en estructuras de Clase B está generalmente asociado al daño a las personas que viajan en el tren (primer factor que figura en la lista del punto 3.1.2. de la ficha UIC, además, se indica de forma explícita en el apartado 6.1.1.).

La definición cuantitativa del valor de riesgo puede ser expresada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad de ocurrencia} \times \text{consecuencias}$$

Por lo tanto, el nivel de riesgo no sólo está influenciado por las potenciales consecuencias del accidente (daños a usuarios de la estructura o daños a viajeros) sino que, además, se debe considerar la probabilidad de ocurrencia de los eventos que generan riesgo.

Existen casos en los que no se cumple el razonamiento de la UIC, por ejemplo:

- A. Una estación de viajeros intermedia con escasa ocupación en la que el edificio está soportado por pilares próximos a las vías y los trenes que pasan o hacen parada comercial llevan un número importante de viajeros a bordo y/o circulan con una frecuencia elevada. En este caso el factor determinante en el nivel de riesgo será el posible daño sobre los viajeros del tren.
- B. Una línea por la que circulan, exclusiva o mayoritariamente, trenes de mercancías (cuyas probabilidades de descarrilamiento son 10 veces mayores según la UIC) bajo estructuras clase B como puentes con una intensidad de uso muy elevada (alta IMD) o donde se producen de forma habitual retenciones. Aquí el factor determinante no es el número de viajeros del tren sino la intensidad de uso del puente.

El principio de partida de la clasificación de las estructuras (A o B) no es erróneo, sino que se trata de una simplificación. Sin embargo, con el objetivo de disponer de una metodología cuantitativa de evaluación del riesgo completa y detallada que pueda ser empleada en el mayor número de situaciones posible es importante poder utilizar un espectro completo de situaciones diferentes en lugar de únicamente dos categorías.

En el apartado 3.1. de la ficha UIC se incluye un listado con los factores que influyen en el nivel de riesgo para cada una de las clases definidas previamente:

#### 3.1.1 - Class A structures

The risk from derailed trains to Class A structures built over tracks and to people affected by these structures depends upon the following:

- ① the number of people occupying the structure,
- ② the permissible speed of trains using the line,
- ③ the number of tracks,
- ④ the structural configuration of the structure,
- ⑤ the presence of switches and crossings in the vicinity of the structure.

The following factors also affect the risk but to a lesser extent:

- the type of train using the line (passenger, freight),
- ⑥ the curvature of the track.

#### 3.1.2 - Class B structures

The risk from derailed trains to Class B structures built over the tracks and to people affected by these structures depends mainly upon the following:

- the number of people travelling in the train,
- ⑤ the presence of switches and crossings,
- ② the permissible speed of trains using the line,
- the number of trains using the line,
- ③ the number of tracks,
- ④ the structural configuration of the structure.

The following factors also affect the risk but to a lesser extent:

- ① the number of people using the structure,
- ⑥ the curvature of the track.

Todos los factores de riesgo incluidos en el listado de la clase A figuran en el de clase B salvo:

- × El número de personas que viajan en el tren.
- × El número de trenes que circulan en el tramo afectado.
- × El tipo de tren (pasajeros/mercancías) que circula en el tramo afectado.

Todos los factores anteriores, que están únicamente incluidos en el listado de una de las dos clases (A o B), influyen en el riesgo de ambos tipos de estructura de manera determinante.

Así, por ejemplo, el número de personas que viajan en el tren es uno de los factores más importantes a considerar en el riesgo de colapso de una estructura clase A ya que, independientemente de su grado de ocupación, el número de viajeros, especialmente en líneas de cercanías y de AV con alta demanda, tiene un impacto muy grande sobre las consecuencias del posible accidente.

El número de circulaciones tiene un impacto directo en la probabilidad de ocurrencia de cualquier tipo de accidente ferroviario, independientemente del tipo de estructura afectada (clase A o clase B).

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 38 de 46 |



Por último, el tipo de tren (viajeros/mercancías) tiene un peso muy importante tanto en la probabilidad de ocurrencia del descarrilamiento (10 veces más probable para mercancías según la Ficha UIC 777-2R) como en las posibles consecuencias del accidente (gran número de personas expuestas en caso de trenes de viajeros), independientemente del tipo de estructura afectada (clase A o clase B). De hecho, se puede ver como en el apartado 3.3. donde la UIC desarrolla con mayor detalle los factores que influyen en el riesgo de las estructuras Clase B incluye también este factor.

#### Evaluación del nivel de riesgo de colapso estructural

Como se indicó anteriormente, el Eurocódigo UNE-EN 1991-1-7 prescribe una serie de condiciones de diseño para las estructuras en función de su clase (fundamentalmente resistencia a impactos para clase A y requisitos basados en una evaluación de riesgo para clase B).

La gestión de riesgos es un proceso obligatorio que el Administrador debe llevar a cabo independientemente de la clase de estructura (A o B) y, en función del resultado de dicha evaluación se establecerán diferentes barreras o medidas de mitigación (diseño, mantenimiento, etc.) en su caso.

Tanto el Eurocódigo como la ficha UIC consideran, de manera implícita, que el nivel de riesgo es aceptable frente a un posible impacto si se cumplen las prescripciones de diseño (fuerzas de impacto, entre otras) para las estructuras clase A sin necesidad de realizar un análisis más detallado.

En fase de diseño de una estructura, en general, no resulta difícil cumplir con las prescripciones de diseño establecidas en la ficha UIC y el Eurocódigo para las estructuras clase A. Además, el incremento de coste, en la mayoría de los casos, no es demasiado elevado y estaría, por lo tanto, justificado siguiendo el principio ALARP.

Si el diseño de estructuras con gran capacidad resistente frente a impactos es adecuado y no empeora las consecuencias del impacto para los viajeros del tren y no dificulta la explotación y el mantenimiento de la infraestructura se puede considerar como una estrategia de gestión del riesgo adecuada para la mayoría de las situaciones.

Sin embargo, para estructuras existentes, pequeñas mejoras del nivel de seguridad de la estructura frente a impactos sólo son alcanzables mediante una gran inversión (refuerzos y otras modificaciones estructurales complejas, barreras resistentes a impacto, perturbaciones en la explotación ferroviaria, etc.).

Siguiendo el principio ALARP este coste será, en muchos casos, desproporcionado frente al pequeño aumento de la seguridad que se consigue debido a que, una vez se produce el descarrilamiento del vehículo (condición necesaria) son múltiples los escenarios de la posible evolución del accidente. Cada uno de estos escenarios representa una consecuencia diferente, siendo el colapso estructural sólo una de ellas. Es decir, en la mayoría de los casos, especialmente a velocidades moderadas/altas, las potenciales consecuencias de un descarrilamiento son elevadas, independientemente de la capacidad resistente de la estructura susceptible de recibir el impacto.

En el caso particular de estaciones, el coste monetario, los problemas técnicos y las perturbaciones en la explotación ferroviaria provocadas por las modificaciones estructurales de los soportes del edificio localizados junto a las vías que tratan de mejorar el nivel de seguridad para cumplir las prescripciones de la normativa (en cuanto a fuerzas de impacto) son, en la mayoría de los casos, excesivamente elevados. En lugar de centrarse, únicamente, en el diseño de la estructura resulta conveniente realizar un enfoque global del problema, considerando el resto de las variables que influyen en el nivel de riesgo.

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 39 de 46 |

Por todo ello, resulta conveniente realizar una evaluación cuantitativa del nivel de riesgo para estructuras Clase A considerando los factores que tienen un mayor impacto (cantidad y tipo de tráfico ferroviario, velocidad, presencia de desvíos, protección ofrecida por el andén, etc.) al menos, para las estructuras existentes.

Este tipo de evaluaciones constituyen una herramienta fundamental en la toma de decisiones y un método racional en la priorización de los recursos. Debemos ser capaces de centrar todos nuestros esfuerzos en aquellos puntos de mayor riesgo.

Análisis de la metodología de cálculo de la ficha UIC 777-2R para clase B y su aplicación a clase A

Cálculo de la probabilidad de ocurrencia:

El cálculo de los factores que determinan la probabilidad de ocurrencia se fundamenta en el planteamiento del esquema geométrico del posible accidente, donde se introducen las variables de mayor peso (velocidad del tren, deceleración, distancia al soporte, etc.) es decir, la formulación que se presenta a continuación para cada uno de los factores (P1, P2, P3, P4 y P5.) se obtiene de mediante planteamiento teórico sencillo que no resulta afectado por la clase de estructura.

- P1: probabilidad de que un tren descarrile en su aproximación a la estructura:

$$P1 = e_r \cdot d \cdot Z_d \cdot 365 \cdot 10^{-3}$$

Siendo:

$e_r$ : tasa de descarrilamiento. Proviene de los datos estadísticos de la UIC.

$d$ : distancia a la estructura que un tren descarrilado llegaría a recorrer. Supone un movimiento rectilíneo uniformemente decelerado, cuya ecuación de la distancia recorrida (en función de la velocidad en el punto de descarrilamiento  $V$  y la magnitud de la deceleración  $a$ ) es:

$$d = \frac{V^2}{2 \cdot a} \approx \frac{V^2}{80}$$

$Z_d$ : número de circulaciones diarias por la vía.

La fórmula empleada para el cálculo de P1 es sencilla de interpretar. La tasa de descarrilamiento (en trenes por km y año) se debe multiplicar por la distancia de riesgo a la que está sometida la estructura (distancia  $d$  que recorre un tren descarrilado a máxima velocidad) y el número de trenes diarios que circulan en ese tramo. Es decir, estos dos factores amplifican la probabilidad de descarrilamiento inicialmente supuesta como tasa de descarrilamiento  $e_r$ . Los valores de 365 y  $10^{-3}$  son factores correctores de las unidades.

Como se puede comprobar, el valor de P1 y las variables que lo determinan no dependen de la tipología estructural o el uso de esta (clase A o B).

- P2: probabilidad de que un tren que ha descarrilado colisione contra la estructura:

$$P2 = \left[ \frac{b-a}{b} \right]^2 \cdot 0,5 \cdot \frac{c}{d}$$

Siendo:

$d$ : igual que en el apartado anterior.



$V$ : velocidad en el punto de descarrilamiento.

$b$ : máxima desviación lateral previsible del tren descarrilado, que depende únicamente de la velocidad en el punto de descarrilamiento:

Su valor se calcula con la expresión:  $b = V^{0,55}$

$a$ : distancia entre el eje de vía y el paramento de la estructura.

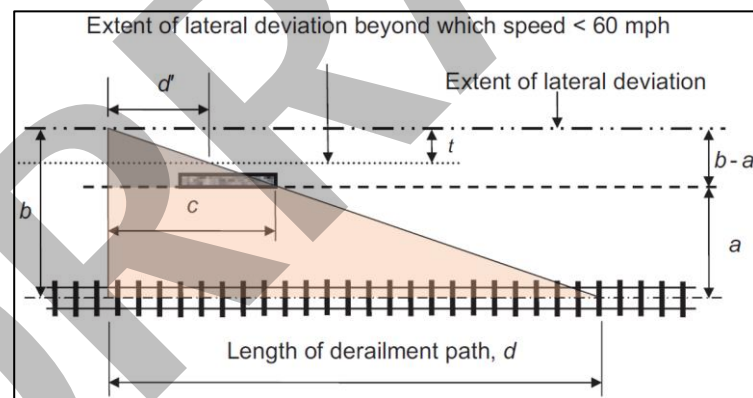
$c$ : distancia paralela a la vía, a distancia " $a$ ", expuesta a riesgo de impacto por parte de un tren descarrilado. Se calcula mediante la relación de semejanza entre el triángulo rectángulo mayor (formado por los catetos  $b$  y  $d$ ) y el triángulo rectángulo menor formado por los catetos  $c$  y  $b-a$  (ver esquema del apartado 3.3.2.)

$$c = \frac{d}{b} \cdot (b - a)$$

La expresión para el cálculo de  $P2$  puede ser simplificada de la siguiente forma:

$$P2 = \left[ \frac{V^{0,55} - a}{V^{0,55}} \right]^3$$

El término  $\left[ \frac{b-a}{b} \right]^2$  expresa la relación entre las áreas de los triángulos rectángulos sombreados en la siguiente imagen y  $\frac{c}{d}$  la relación entre la longitud expuesta al riesgo respecto a la longitud total recorrida por el vehículo descarrilado:



*Nota: las unidades de velocidad (mph) son una errata, se puede comprobar como la ficha 777-2R se cita de manera expresa el valor de 60 km/h.*

Como se puede comprobar, el valor de  $P2$  se determina resolviendo el problema geométrico que se establece como representación esquemática del accidente, donde el tren descarrilado sigue una trayectoria oblicua hacia el elemento estructural de soporte. Así, la probabilidad de  $P2$  será proporcional a la longitud expuesta al riesgo  $c$  y al área que determina dicha longitud.

Como se ha demostrado anteriormente el factor  $P2$  y sus variables no dependen de la tipología estructural o el uso de esta (clase A o B).

- $P3$ : probabilidad de que la estructura colapse como resultado del impacto:

Para  $b - t - a > 0$

$$P3 = \left[ 1 - \frac{2}{3} \left( t \cdot \frac{2b - 2a - t}{(b - a)^2} \right) \right] \cdot \alpha = \left[ 1 - \frac{2}{3} \left( t \cdot \frac{2V^{0,55} - 2a - t}{(V^{0,55} - a)^2} \right) \right] \cdot \alpha$$

Donde  $a$  y  $b$  son las variables definidas anteriormente

La expresión  $b - t - a > 0$  condiciona la aplicación de la fórmula de cálculo de P3, únicamente, a las situaciones en las que el tren impacta con el obstáculo a una velocidad mayor a 60 km/h (ver esquema del apartado 3.3.2.) donde se ha dibujado de tal forma que se cumple la citada expresión, es decir  $b > t + a$ .

Siendo  $t$  la parte final de la desviación lateral total ( $b$ ) a partir de la cual la velocidad del tren descarrilado ha bajado de 60 km/h. Se calcula como:

$$t = \frac{a \cdot d'}{d - d'} = \frac{a \cdot 45}{\frac{V^2}{80} - 45}$$

Donde:

$d'$ : longitud del mayor camino de descarrilamiento paralelo a la vía, a partir del cual la velocidad del tren ha caído por debajo de 60 km/h. Usando la deceleración de 3 m/s<sup>2</sup> para el tren descarrilado, el valor de  $d'$  resulta ser de 45 m.

$\alpha$ : factor adimensional que tiene en cuenta la robustez de los soportes y el grado de continuidad de la configuración estructural del soporte.

Empleando un criterio similar al expuesto para el factor P2 la probabilidad de colapso P3 se determina resolviendo el problema geométrico que se establece como representación esquemática del accidente, incluyendo para este caso el valor de  $t$  que permite introducir la hipótesis de  $P3 = 0$  si la trayectoria oblicua que sigue el tren se encuentra con el obstáculo cuando la velocidad del tren ha caído por debajo de 60 km/h.

Como se puede comprobar, el valor de P3 y las variables que lo determinan no dependen de la tipología estructural o el uso de esta (clase A o B) salvo el mencionado factor reductor adimensional  $\alpha$ . Para esta variable se debe adoptar un valor de 1,0 (sin influencia en la probabilidad de P3) si no existe un estudio o justificación técnica específica para la estructura objeto de análisis en cuanto a la robustez y grado de continuidad de la configuración estructural del soporte. Es decir, se trata de una justificación técnica específica respecto al comportamiento de la estructura respecto a su posible colapso sobre el cual la categorización cualitativa de las clases A y B no tiene influencia.

Respecto a la validez de los valores que arroja la expresión de P3 es importante destacar algunas de las conclusiones del estudio *Reliability of concrete column exposed to accidental action due to impact*. Holický y Marková, 2002 donde se compara el valor de P3 obtenido mediante la expresión de la UIC y el cálculo preciso de la probabilidad de colapso mediante metodologías de cálculo de fiabilidad estructural. Se demuestra que el valor de P3 estimado mediante las expresiones de la UIC resulta conservador (del lado de la seguridad).

- **P4:** Probabilidad de que un tren que circule por otra vía colisione contra el tren descarrilado: Este factor tiene en cuenta que se pueda producir una colisión secundaria contra que circula por otra vía (en caso de vía múltiple).

Se pueden adoptar los siguientes valores (apéndice F.4 de la ficha UIC):

$$P4 = 0,1 \text{ tráfico} \leq 100 \text{ trenes/día}$$

|  |            |  |               |
|--|------------|--|---------------|
| NORMA ADIF PLATAFORMA  |            | ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS |               |
| METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE COLAPSO DE ESTRUCTURAS POR IMPACTOS DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS DESCARRILADOS |            | COMITÉ DE NORMATIVA                            |               |
| NAP 2-0-1.4  | 1ª EDICIÓN | ABRIL 2023                                     | Pág. 42 de 46 |

$$P4 = 0,2 \text{ si tráfico} > 100 \text{ trenes/día}$$

Como se puede comprobar, el valor de  $P4$  no depende de la tipología estructural o el uso de esta (clase A o B).

- $P5$ : Tipo de tren circulando por la otra vía (en sentido opuesto):

Es un factor corrector en función de que la colisión secundaria se pudiera producir contra un tren de viajeros o de mercancías (en caso de vía múltiple)

A falta de más datos se puede adoptar un valor de 0,5 (apéndice F.4 de la ficha UIC).

Como se puede comprobar, el valor de  $P5$  no depende de la tipología estructural o el uso de esta (clase A o B).

Estimación de las consecuencias para el colapso de estructuras clase A

La tabla propuesta por la UIC en el apartado F.7. para la estimación del número de víctimas en función del escenario del árbol de eventos se basa en el colapso de puentes. No obstante, para el caso que nos ocupa (colapso de edificios) disponemos, además de la comprobación del riesgo para los viajeros, la comprobación del nivel de riesgo para los usuarios de la estructura.

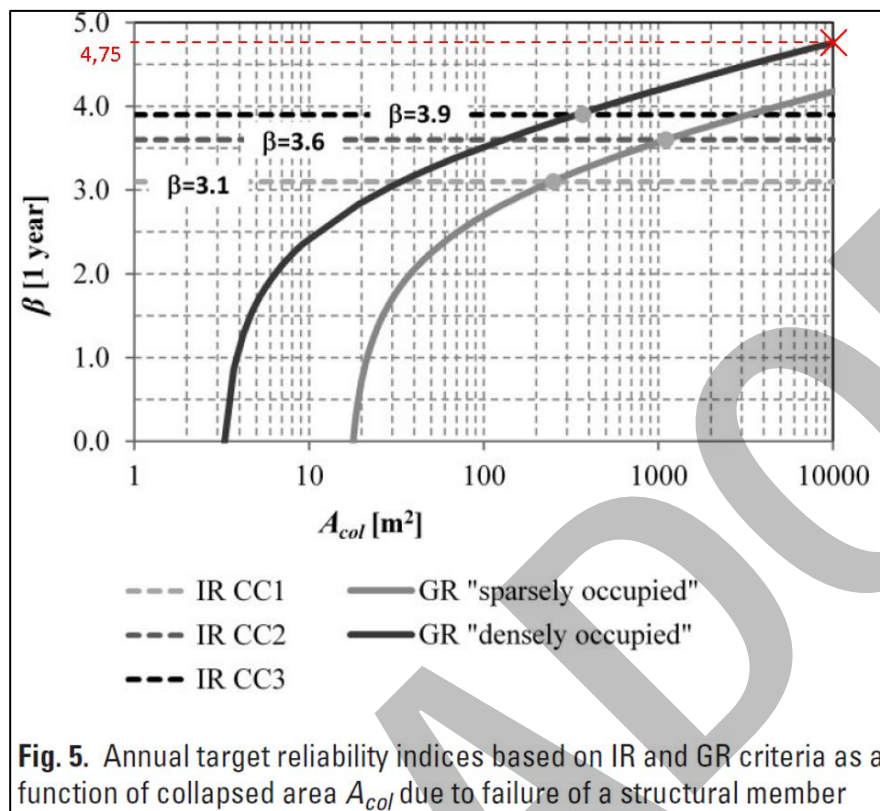
Como se expone en los siguientes apartados la comprobación del riesgo para los usuarios de la estructura y su correspondiente estimación de las consecuencias es coherente con la intensidad de uso de la estructura y las categorías de consecuencia establecidas en los Eurocódigos estructurales.

### 3. CRITERIOS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CLASE B A CLASE A

Una vez realizado el análisis sobre la metodología de cálculo de la ficha UIC para estructuras clase B y comprobada su validez para la evaluación de estructuras de clase A es necesario establecer un criterio sobre la probabilidad máxima de fallo admisible para este tipo de estructuras (fundamentalmente edificios con alta ocupación).

En la publicación *Economic and human safety reliability levels for existing structures* de Steenberg y otros autores, del año 2015, se proporcionan diferentes expresiones que relacionan el número de víctimas y la superficie de colapso del debido a un fallo estructural.

En base a estas expresiones se puede establecer la relación entre el área colapsada y el índice de fiabilidad  $\beta$  para el riesgo social (GR) y el riesgo individual (IR) como se muestra en la siguiente figura.



Como criterio general (a falta de datos o estudios que justifiquen otro valor) se tomará un índice de fiabilidad  $\beta$  conservador e igual a 4,75 correspondiente al valor máximo de área colapsada (10.000 m<sup>2</sup>), riesgo social (GR) y edificio "densamente ocupado".

Este valor de  $\beta$  corresponde con una  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-6}$

Este valor es, en la mayoría de los casos, demasiado exigente. Resulta conveniente realizar una estimación del área susceptible de colapsar y poder reducir el índice de fiabilidad y su probabilidad de fallo asociada de manera justificada.

Como puede verse en la figura anterior, el valor mínimo de  $\beta$  recomendable debe ser 3,6 ya que para valores pequeños del área colapsada el criterio de riesgo individual arroja valores más exigentes que el criterio de riesgo social. Además, se debe elegir, como mínimo, la categoría CC2 (correspondiente a edificios residenciales, de oficinas, edificios públicos, etc. donde las consecuencias de un fallo son moderadas). De esta forma el valor de la probabilidad máxima admisible sería aproximadamente  $P_{f, \text{máx. admisible}} = 10^{-4}$ .

## ANEXO 4. IMPACTOS A BAJAS VELOCIDADES

### ÍNDICE DE CONTENIDO

### PÁGINA

|  |    |
|--|----|
| 1. CRITERIO EMPLEADO EN LA FICHA UIC 777-2R..... | 46 |
|--|----|

BORRADOR

## 1. CRITERIO EMPLEADO EN LA FICHA UIC 777-2R

La metodología de la ficha 777-2R de la UIC, considera la siguiente hipótesis (de manera implícita):

No se produce el colapso de la estructura si la velocidad, en el momento del impacto, es inferior a 60 km/h (*"Assessing the risk to railway structures from train impact", John Lane y Kevin Thompson, 2014*).

Cuando el descarrilamiento se produce a bajas velocidades, es improbable que el tren impacte con la estructura debido a la contención que ejerce el propio carril de la vía. Anexo G.1 de la ficha UIC 777-2 donde se supone un factor de 0,5 para tener en cuenta esta restricción para aplicar a P2.

De hecho, se puede comprobar como la formulación de P3 (probabilidad de colapso) arroja valores incongruentes para velocidades en el punto de descarrilamiento entre 0 y 60-70 km/h.

Por ello, la propia ficha de la UIC limita la aplicación de la fórmula del factor P3, resultando válida si:

$$b - t - a > 0$$

Siendo:

$b$ : máxima desviación lateral previsible del tren descarrilado.  $b = V^{0,55}$

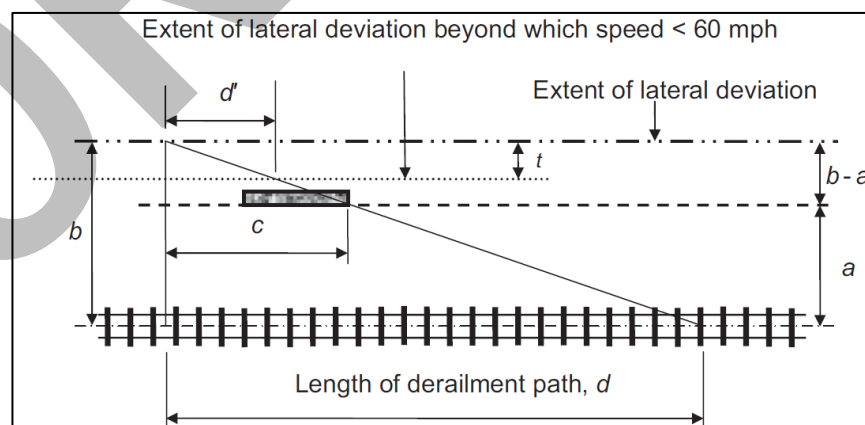
$a$ : distancia entre el eje de vía y el paramento de la estructura.

$t$ : desviación lateral a partir de la cual el tren descarrilado tiene una velocidad menor a 60 km/h.

Se calcula:  $t = \frac{a \cdot d'}{d - d'}$

$d'$ : longitud del mayor camino de descarrilamiento paralelo a la vía, a partir del cual la velocidad del tren ha caído por debajo de **60 km/h**. Usando la deceleración de 3 m/s<sup>2</sup> para el tren descarrilado, el valor de  $d'$  resulta ser de 45 m.

En el siguiente esquema se puede ver reflejada dicha hipótesis

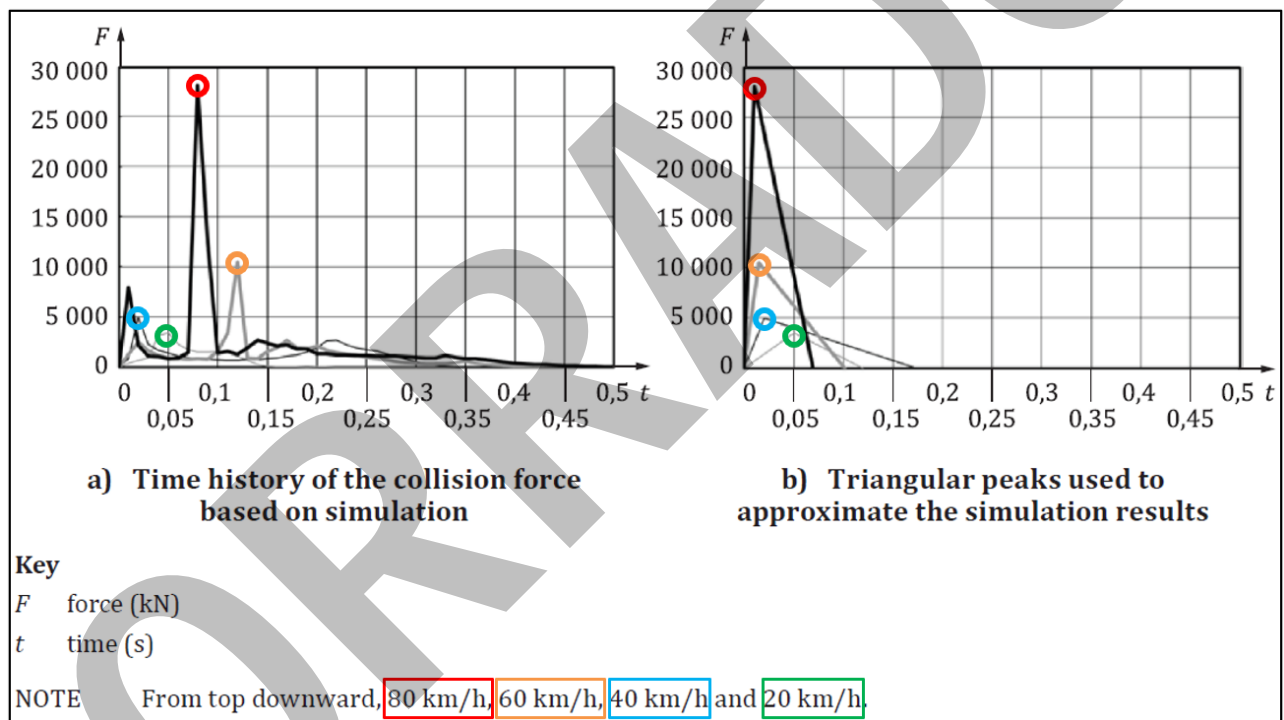


**Figure 2.** Geometric parameters for UIC risk assessment methodology

*Nota: las unidades de velocidad (mph) son una errata, se puede comprobar como la ficha 777-2R y en el artículo "Assessing the risk to railway structures from train impact" se cita de manera expresa el valor de 60 km/h.*

La razón de esta hipótesis se puede encontrar en los resultados de la simulación mediante elementos finitos que figura en el anexo A de la norma ISO 10252 ("Acciones accidentales"). La fuerza de impacto se mantiene relativamente baja para velocidades inferiores a 60 km/h, creciendo de manera exponencial para velocidades superiores a dicho valor. Además, se debe tener en cuenta que la simulación del impacto se realizó considerando la estructura contra la que impactaba el tren como infinitamente rígida, lo que genera fuerzas de impacto mucho más elevadas que las reales.

Por lo tanto, la ficha UIC 777-2R considera que las probabilidades de un posible colapso a velocidades iguales o inferiores a 60 km/h para estructuras con un estado de conservación adecuado (sin patologías o daños estructurales graves) son lo suficientemente bajas como para no tenerlas en cuenta en el cálculo.





BORRADOR