

Análisis de alternativas para reducir el riesgo de colapso de pasos superiores por impacto de trenes descarrilados

Analysis of alternatives to minimize the risk of collapse of overpasses due to the impact of railway derailed vehicles

Alejandro Clemente García^a, Pedro Martín Pérez Martínez^b, Guillermo García Hernández^c e Ismael Carpintero García^d

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. CEDEX. Coordinador de Programa Técnico-Científico. alejandro.clemente@cedex.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ADIF. Técnico de Ing. Civil. pedromartin.perez@adif.es

^cMáster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Cuadro Técnico de Ing. Civil. guillermo.garcia@adif.es

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. CEDEX. Jefe de Área de Estudios y Auscultación de Estructuras.
ismael.carpintero@cedex.es

RESUMEN

La circulación de trenes bajo pasos superiores supone un riesgo tanto para los ocupantes del vehículo como para los usuarios de la estructura por el eventual impacto del convoy contra las pilas o estribos si se produce un descarrilamiento. Se ha realizado un estudio de viabilidad técnico-económica de distintas alternativas que buscan minimizar ese riesgo, planteadas desde el punto de vista de la actuación sobre la estructura sin tener en cuenta otras opciones como las embarcadas en los trenes o las dispuestas en la propia vía.

ABSTRACT

The movement of trains under overpasses poses a risk both to the occupants of the vehicle and for the users of the structure due to the possible impact of the train against the columns or abutments in the event of a derailment. A technical-economic feasibility study has been carried out for different alternatives that seek to minimize this risk, approached from the point of view of the action on the structure without taking into account other options such as those on board the trains or those arranged on the track itself.

PALABRAS CLAVE: paso superior, robustez, redundancia, refuerzo, ferrocarril, impacto.

KEYWORDS: overpass, robustness, redundancy, reinforcement, railway, impact.

1. Antecedentes y objeto

Existe un riesgo siempre que hay circulación de trenes bajo pasos superiores debido al posible impacto contra la estructura si se produce un descarrilamiento.

El objeto de este trabajo era realizar un análisis de alternativas para minimizar el riesgo de colapso de pasos superiores existentes ante el eventual impacto de vehículos ferroviarios cuando estos descarrilan, plantear las posibles

soluciones para proteger las estructuras adyacentes a la vía, así como exponer la realización de un caso práctico para comprobar la validez de las opciones propuestas.

Las soluciones se plantean desde el punto de vista de la actuación sobre la estructura del paso superior, sin tener en cuenta otras alternativas como las embarcadas en los trenes o las dispuestas en la propia vía.

La experiencia nos muestra que, aunque es muy poco probable el colapso de la estructura, este tipo de accidentes es posible y, como las consecuencias pueden ser graves, hay que gestionar el riesgo en cualquier caso.



Figura 1. Accidentes en Villada (superior, 2006) y en O Porriño (2016).

No fue objeto del estudio la búsqueda de soluciones que evitasen el descarrilamiento de los trenes sino la protección de las pilas y del resto de la estructura de los pasos de tráfico que se encuentran sobre la vía.

El estudio realizado se estructuró de la siguiente manera:

- Análisis de la normativa.
- Análisis de otra documentación técnica relacionada con la protección frente al impacto.
- Planteamiento de alternativas de protección de la estructura.
- Caso práctico.

2. Análisis de la normativa

En este apartado se realizó un recorrido por la normativa española, así como por la europea e internacional, en lo relativo a acciones

accidentales, especialmente la acción de impacto de vehículos ferroviarios.

Se ha tratado de resumir cómo se recogen estas acciones, su magnitud y dirección, su punto de aplicación sobre la estructura, las protecciones necesarias así como otra información que pueda ser de interés.

La normativa aborda el problema realizando un análisis de riesgos, el cual depende del gálibo de la estructura, la velocidad y masa del tren, la existencia de elementos de contención o guiado, etc.

2.1. Eurocódigo I. Parte 1-7. Acciones generales. Acciones accidentales (UNE-EN 1991-1-7) [1]

El fallo potencial de la estructura originado por una causa accidental debe mitigarse en el proyecto teniendo como posibles estrategias para limitar la importancia del fallo localizado una o más de las siguientes:

- proyectando los elementos clave frente a las acciones accidentales esperables,
- proyectando la estructura de tal manera que en caso de fallo localizado su estabilidad en conjunto o de una parte de ella no estuviera en peligro,
- aplicando reglas de cálculo o de detalles constructivos prescriptivos que provean a la estructura de una robustez aceptable.

Las estructuras que pueden estar sometidas a un impacto producido por el descarrilamiento de trenes deberían clasificarse de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Clases de estructuras.

Clase	Definición
Clase A	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
Clase 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 no sirven como lugar de acumulación temporal de personas

La mayor parte de los pasos superiores sobre vía entrarían en la Clase B, aunque se permite clasificar algunos puentes como clase A aplicando lo dicho en la nota siguiente:

(3) En puentes, las acciones de impacto y las medidas para mitigar los efectos indicados deberían tener en cuenta, entre otras cosas, el tipo de tráfico bajo y sobre el puente y las consecuencias del impacto.

Las acciones que se dan en el Anejo Nacional Español para puentes de Clase A se indican en la Tabla 2:

Tabla 2. Resultados del análisis de carga.

Distancia d entre los elementos estructurales y el eje de la vía más próxima	Fuerza F_{dx} [kN]	Fuerza F_{dy} [kN]
Elementos estructurales: $d < 3$ m	*	*
Muros continuos y estructuras tipo muro: $3 \text{ m} \leq d \leq 5 \text{ m}$	4000	1500
$d > 5 \text{ m}$	0	0

(*) Este valor se debe definir en cada proyecto específico (ver anexo B Norma UNE-EN 1991-1-7). En ausencia de datos, se puede adoptar el valor de 10.000 kN para F_{dx} y 3.500 kN para F_{dy} .

Las fuerzas F_{dx} y F_{dy} deberían aplicarse, en hipótesis separadas, a una altura de 1.80 m sobre el nivel de las vías (medido desde la parte superior de la cabeza del carril).

2.2. IAPF-07. Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril

Es la instrucción de aplicación para el diseño de puentes de la red ferroviaria española de interés general [2].

El impacto se asimilará a una fuerza estática horizontal F_{lk} paralela a la vía, o bien una F_{tk} perpendicular a la vía, y con sentido hacia el

exterior del tablero, aplicadas a una altura de 1.80 m sobre el plano de rodadura del carril.

Se tendrá en cuenta si los paramentos de las pilas y otros soportes de los tableros están situados a menos de cinco metros (5,00 m) del eje de la vía más próxima, y deberán soportar las acciones horizontales siguientes:

$$F_{lk} = \alpha \cdot 4000 \text{ kN}$$

$$F_{tk} = \alpha \cdot 1500 \text{ kN}$$

Siendo α el coeficiente de clasificación definido en 2.3.1.1, cuyo valor es el siguiente:

$\alpha = 1,21$ para vías de ancho ibérico o UIC

$\alpha = 0,91$ para vías de ancho métrico

También se comprobará que:

- Con la mitad de la capacidad resistente del elemento impactado, el puente es capaz de soportar las acciones permanentes y las sobrecargas de uso.
- Con la tercera parte de esa capacidad el puente es capaz de soportar las acciones permanentes.

2.3. Código Estructural

El Código Estructural [3] se aplica para el diseño de nuevas estructuras y la evaluación de estructuras existentes frente a acciones que se definen en otros códigos. La evaluación estructural ha de realizarse conforme a su artículo 25.

Con carácter general, la intervención en una estructura existente está justificada para:

b. Restablecer las prestaciones de la estructura tras una acción accidental.

En la figura 2 se representa la evolución de las prestaciones y las solicitaciones en el tiempo:

En el apartado 25.3 del Código Estructural se describe el proceso de evaluación de la capacidad de la estructura, que se realizará, normalmente, mediante una verificación cuantitativa de su capacidad portante y, en su caso, de su aptitud al servicio, teniendo en cuenta los procesos de deterioro posibles. Para ello, puede adoptarse un procedimiento de evaluación por fases, en cada una de ellas se incrementa la precisión de las hipótesis para la

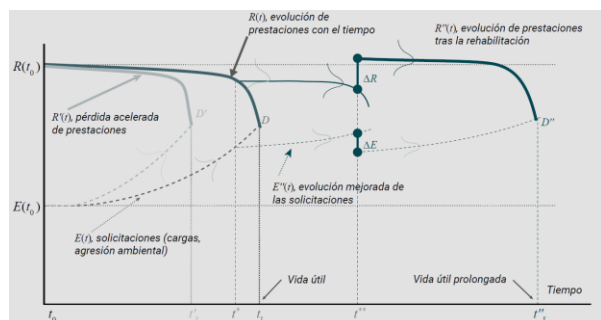


Figura 2. Índice de la prestación R y de las solicitaciones E en el tiempo (Código Estructural).

evaluación, así como el grado de detalle de los métodos de análisis respecto de la fase anterior. En la Tabla 3 se detallan los niveles de análisis estructural:

Tabla 3. Niveles de análisis estructural (Código Estructural).

Nivel	Método
1	Comprobación de la estructura frente a acciones que justifican la necesidad de la comprobación. Comprobación de la estructura para las acciones objeto de la comprobación, incluidas las acciones definidas en las bases de cálculo para obra nueva.
2	Se utilizarán los códigos de materiales con unos coeficientes parciales de ponderación corregidos (disminución de incertidumbres)
3	Contexto semiprobabilista con coeficientes parciales ajustados con el fin de obtener la misma fiabilidad que para obra nueva.
4	Aproximación sofisticada en forma de análisis no lineal tridimensional, en un contexto de formato de comprobación probabilista

Lo más habitual es adoptar inicialmente un nivel 2 de análisis para este tipo de evaluaciones de estructuras.

3.4. NAP 2-0-1.4.

La norma de ADIF NAP 2-0-1.4. [4] define una metodología para la evaluación, debida a un cambio según el Reglamento de ejecución UE N° 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, salvo que el riesgo esté mitigado por otro principio de aceptación del riesgo.

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

La metodología definida en la normativa se basa en la estimación explícita del riesgo como principio de aceptación. Los riesgos se estiman de forma cuantitativa.

Se realizan dos comprobaciones (riesgo para los usuarios de la estructura y riesgo para los viajeros/tripulación del tren), y a partir del

resultado obtenido (nivel de riesgo aceptable, ALARP: as low as reasonably practicable, inacceptable) puede ser necesario implementar medidas de mitigación.

3.5. UIC 777-2 [5].

Al igual que en otras normativas consultadas, las estructuras se dividen en dos clases (A y B) según sus usos.

Se definen tres zonas de peligro para las construcciones en función de la distancia a la que se sitúen del eje de la vía:

- Zona 1: menos de 3,0 m.
- Zona 2: entre 3,0 y 5,0 m.
- Zona 3: toperas.

Para las construcciones de Clase A en la zona 2 se repiten las mismas fuerzas que se han visto anteriormente en otras normativas europeas:

- 4.000 kN paralela al eje de la vía
- 1.500 kN perpendicular al eje de la vía

Salvo justificación en contrario, los apoyos deberán ser lo suficientemente resistentes como para reducir el riesgo de colapso del puente tras un impacto provocado por un tren descarrilado.

El método utilizado para garantizar la resistencia requerida se determina generalmente para cada caso particular, teniendo en cuenta los riesgos de descarrilamiento de trenes y colapso del puente.

Los métodos a considerar deben incluir:

- un nivel de resistencia suficiente para absorber fuerzas estáticas equivalentes,
- factores de seguridad adicionales al diseñar soportes capaces de resistir cargas muertas y variables,
- el diseño de los soportes de manera que:
 - la mitad de la sección transversal debe poder soportar cargas permanentes y las cargas de tráfico reducido,
 - un tercio de la sección transversal debe poder soportar cargas permanentes.

3.6. Otras normativas.

AREMA.

El manual de la AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) [6] dedica un apartado a la protección de la subestructura del puente, en especial a las pilas adyacentes a las vías. Hace una distinción entre las pilas que se sitúan en intervalos de distancia a la vía entre 0-12-25 pies (0,00 m – 3,60 m – 7,60 m). Para cada uno de estos intervalos se dan diferentes características mínimas de los pilares o muros de protección necesarios, de los cuales aporta algunos ejemplos como se indica en la figura siguiente.

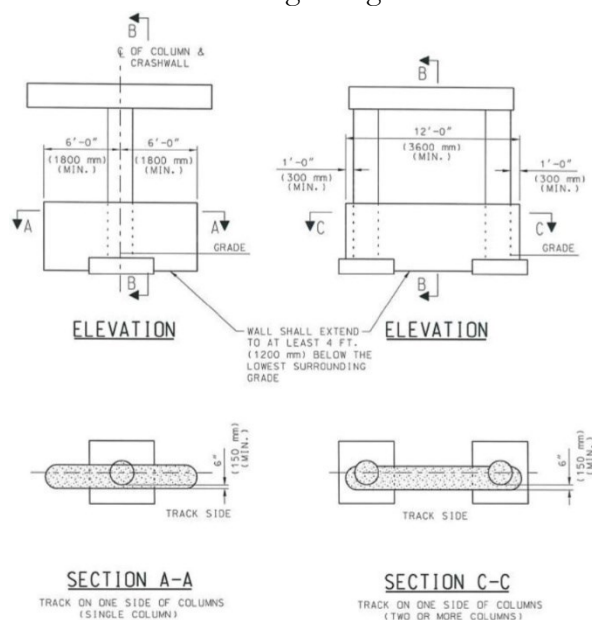


Figura 3. Requerimientos de muros de protección de pilas.

AS5100. Diseño de puentes

Esta normativa australiana [7] tiene un alto nivel de detalle ya que se definen clases de estructuras, zonas, velocidades de circulación, etc. que sirven para obtener las cargas de diseño como las posibles alternativas para proteger las estructuras.

Además, la superestructura se diseñará con suficiente redundancia para poder soportar la carga muerta más un mínimo del 20% de la carga de tráfico de diseño ($\gamma_g G + \gamma_{gs} G_{gs} + 0.2\gamma_q Q$) en ELU con uno o más pilares eliminados. El número de apoyos a retirar y la

carga de tráfico para la acción redundante se determina por un análisis de riesgo.

CIVIL-SR-012. Protección contra colisión de elementos de soporte adyacentes a los ferrocarriles [8]

Se trata de una serie de requisitos técnicos de los Ferrocarriles del Estado australiano de Queensland, que desarrollan la norma AS5100 [7] y modifica sus acciones de cálculo. Detalla los criterios que deben cumplir los soportes de estructuras sobre o adyacentes a las vías ferroviarias

Con el mismo criterio que otras normativas da las acciones a considerar en función de:

- Clase de la estructura: A, B, C.
- Zona de la estructura: 1 a 5
 - Zona 1: apoyo a menos de 3 m del eje
 - Zona 2: de 3 m a 5 m
 - Zona 3: de 5 m a 10 m
 - Zona 4: de 10 m a 20 m
 - Zona 5: detrás del final de las vías.
- Categoría de velocidad: 1 a 3
 - Categoría de velocidad 1: 51 - 160 km/h (se supone que son trenes de pasajeros).
 - Categoría de velocidad 2: 21 - 50 km/h (se supone que son trenes de pasajeros).
 - Categoría de velocidad 3: < 20 km/h (se supone que son trenes de mercancías).

En el caso de las estructuras existentes, los pilares que no satisfagan los requisitos anteriores deben tener muros deflectores como elementos de protección delante de ellos. Serán independientes cuando el espacio lo permita, pero si no, serán integrales y deben cumplir unas características geométricas mínimas.

4. Análisis de otra documentación

Se ha llevado a cabo una recopilación y análisis de multitud de documentos (artículos, estudios, códigos de buenas prácticas, informes, manuales, etc.). Entre ellos cabe destacar los siguientes:

- Concrete structures subjected to impact and blast loadings. Chunwei Zhang, Gholamreza Gholipour, 2022 [9].
- Shock, Impact and Explosion Structural Analysis and Design. M. Y. H. Bangash, 1993 [10].
- Containment capacity and estimation of crashworthiness of derailment containment walls against high-speed trains. Hyun-Ung Bae, Kyung-Min Yun and Nam-Hyoung Lim, 2018 [11].
- Impact Force Evaluation of the Derailment Containment Wall for High-Speed Train through a Collision Simulation. Hyun-Ung Bae et al. 2018 [12].
- Safety of High Speed Ground Guided Transportation Systems - Intrusion Barrier Design Study. Federal Railroad Administration, USA. 1995 [13].
- Devices to Guide Derailed Trains: Infrastructure Mounted Equipment. T1143. Rail safety and standards board Ltd. 2021 [14]

En estos documentos se informa, entre otras muchas cosas, de que existen estudios de impacto y efectos de carga explosiva en estructuras de forma independiente pero no conjunta [9]; se dan métodos de análisis para estructuras de hormigón cuando se someten a cargas de impacto y explosión [10]; explican modelos de varios grados de libertad, el amortiguamiento de las estructuras y vehículos, etc. para su estudio frente al impacto [11]; análisis de la capacidad de los muros de contención que se usan en una red de alta velocidad coreana [12]; análisis dinámico de impactos de trenes contra muros de contención [13]; análisis de la magnitud de la acción equivalente de diseño de un muro de contención frente a impactos mediante modelos dinámicos; estudio sobre dispositivos de guiado para los trenes descarrilados [14], etc.

5. Análisis de alternativas

De todas las opciones disponibles, es posible actuar sobre cuatro aspectos de la infraestructura ferroviaria:

- Vehículo
- Vía
- Operación
- Estructura

Las tres primeras no fueron objeto del informe por lo que se desarrolla la cuarta de ellas, es decir, las alternativas desde el punto de vista de la estructura. Estas deben suponer una mejora de las condiciones siendo un punto básico el de no empeorar las actuales.

Alternativa 0

- No se actúa sobre la estructura: con esta alternativa se comprueba la capacidad real para soportar el impacto, lo que da una medida de su sensibilidad. Es la opción a priori más económica y la situación no empeora después de la actuación. Sin embargo, puede ser difícil obtener los datos para realizar la comprobación estructural.

Proteger o reforzar las pilas existentes

- Refuerzo o recrecido de las pilas: como ventajas, se consigue una mayor capacidad resistente de la estructura frente a las acciones de impacto y pueden ser aprovechables las cimentaciones de las pilas originales.

Por otra parte, actuar sobre las pilas podría suponer mayores daños para el tren que descarrila; podría aumentar las acciones de sismo; puede requerir la interrupción total del tráfico en el puente para realizar la construcción si el gálibo horizontal es insuficiente; y un recrecido hacia el eje de la vía reduce el gálibo horizontal.

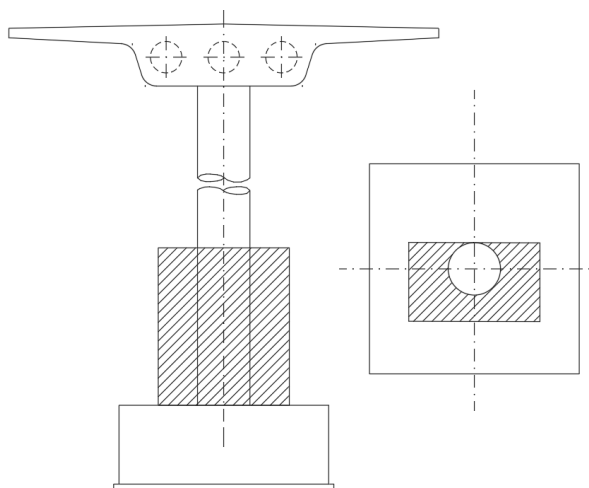


Figura 4. Esquema de alzado y planta del refuerzo de la pila.

- Muros uniendo pilas aisladas: en el caso de pilas de varios fustes, proporciona una mejor protección que el simple refuerzo de la pila aislada, pero su ejecución puede suponer la afección al tráfico en la vía y sobre el puente; se necesitarían nuevas cimentaciones y es una solución, en general, más cara que la anterior.

- Muros protectores delante de las pilas: mejor protección que el simple refuerzo y se evita realizar la conexión con las pilas existentes. De la misma manera, se afecta a ambos tráficos, se necesitan nuevas cimentaciones y se reduce el gálibo horizontal.

Separar o eliminar las pilas

- Ménsulas: se trata de retranquear las pilas de su posición original hasta la distancia suficiente para que no sea necesario considerar el impacto sobre las pilas.

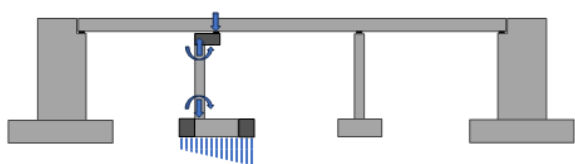


Figura 5. Esquema para absorber la excentricidad de la reacción sobre las nuevas pilas.

Con las ménsulas se consigue ganar gálibo horizontal minorando el riesgo de impacto sobre las pilas. Además, se mantiene la luz entre apoyos del tablero por lo que no se necesitará su refuerzo y la ejecución es factible sin corte de tráfico. Por otra parte, el coste es muy elevado y la ejecución técnicamente muy compleja [15].

- Sustitución de las pilas: se consigue una mayor capacidad resistente frente a las acciones de impacto. Es una solución de ejecución muy difícil pero podría ejecutarse con cortes de tráfico puntuales.

- Separación de las pilas con refuerzo del tablero: en este caso se retranquean las pilas a la posición necesaria cambiando el punto de apoyo del tablero. Se trata de una solución de compleja materialización que además requiere un análisis de la situación del tablero reforzado en ELU y ELS y del mecanismo de refuerzo para garantizar su puesta en carga. En este tipo de refuerzos suele ser condicionante la rigidez ya que al aumentar la luz las flechas son mucho mayores.

Un paso más allá sería sustituir el tablero en lugar de reforzar el existente (p.e. puentes de vigas).

Nueva estructura

- En un caso extremo, útil donde no se pueda aplicar ninguna de las otras soluciones. Tiene graves inconvenientes como el presupuesto elevado, el cierre total del tráfico en ambas vías, etc. Además, una nueva estructura genera la necesidad de gestionar una gran cantidad de residuos por lo que se trata de la solución menos sostenible y que más recursos consume de las estudiadas.

- Paso superior: elimina el riesgo de impacto del tren contra las pilas. Puede ser una opción adecuada si la estructura del puente original se encuentra en mal estado.

- Paso inferior: elimina por completo el riesgo de impacto del tren contra las pilas ya que se han suprimido. Podría permitir el mantenimiento del tráfico en la parte superior del puente durante la construcción, p.e. si se modifica el PK en el que se sitúa la nueva estructura.

Por otra parte, podría requerir la expropiación de terrenos y la construcción de nuevas vías de acceso.

- Eliminar la estructura existente: con esta opción se elimina por completo el riesgo pero debería reordenarse el tráfico hacia otro paso

superior o inferior cercano que permita el cruce sobre o bajo la vía. Puede ser una opción en el caso de pasos superiores de camino que tengan poco tráfico.

6. Caso práctico

Con el objeto de comprobar el resultado del trabajo, a modo de ejemplo, se eligió un paso superior existente para su evaluación frente a la acción de impacto provocada por un potencial descarrilamiento.

El objeto del caso práctico era analizar la susceptibilidad de las pilas frente a la acción accidental de impacto ferroviario.

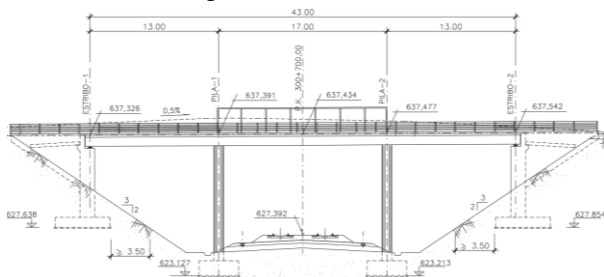


Figura 6. Alzado del paso superior del caso práctico.

El cálculo de la estructura parte de un modelo de nudos y barras que reproduce el esquema del paso superior. Las pilas se encuentran empotradas en la cimentación y en el tablero, y los apoyos de neopreno en los estribos se modelizaron mediante muelles con una cierta rigidez en el sentido horizontal.

En un primer cálculo se introdujeron las cargas de impacto (junto con el resto de las cargas de la combinación correspondiente) y se comprobó qué sección de la pila fallaría en primer lugar.

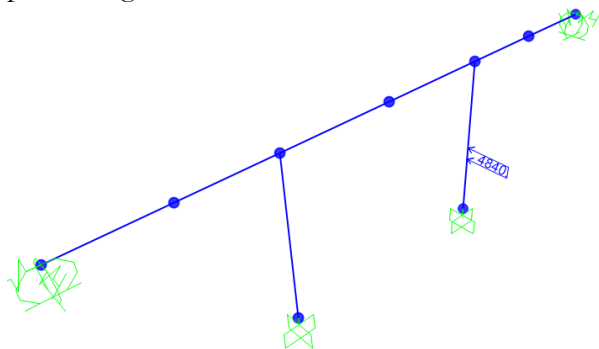


Figura 7. Modelo de cálculo del programa SAP2000.

Una vez hecho esto, se supuso que dicha sección plastificaba y se convertía en una rótula plástica. Con el incremento de carga restante se calculó un nuevo modelo rotulado en la sección plastificada (la base de la pila) para determinar la siguiente sección que plastificaría; y así sucesivamente hasta que la estructura colapsaba (se convertía en un mecanismo) comprobándose qué elementos era necesario reforzar en su caso.

Una vez analizadas las alternativas, se realizó un presupuesto aproximado de cada una de ellas, que es a su vez otra de las variables con la que comparar las soluciones. Cabe señalar que el objeto de este análisis era el de poder establecer una comparación a nivel económico de las alternativas, no el de disponer de una valoración económica detallada de cada una de ellas.

Como conclusión del caso práctico se tiene que la mejor alternativa es el refuerzo o recrecido de las pilas. Se trata de una opción económica siempre que no haya que reforzar la cimentación pues se incrementa el presupuesto de manera significativa, así como el plazo de ejecución. Para el caso de cimentaciones superficiales es la opción más aconsejable (siempre que tengan margen para absorber los esfuerzos de la acción de impacto ferroviario). Otra solución apropiada sería la de ejecutar muros uniendo las pilas para el caso de pasos superiores con pilas de dos o más fustes.

7. Conclusiones

Para la evaluación de estructuras existentes frente al riesgo de colapso por descarrilamiento de un tren en España es de aplicación el Código Estructural [3], que para un nivel 2 de análisis establece aplicar la reglamentación de acciones vigente, que actualmente es la IAPF [2]. En los aspectos no contemplados por esta IAPF se debería adoptar como normativas de referencia, y en este orden, la UIC [5] y los Eurocódigos (en particular el EC-1) [1].

Cabe destacar también la norma de Adif NAP 2-0-1.4 [4] que define una metodología para la evaluación 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.

Se han encontrado puntos en común en muchas de las normativas y reglamentos analizados, que son: clase de estructura (según su importancia), zona de peligro (según la proximidad a la vía), protección o exposición del elemento, velocidad de la vía y capacidad del soporte dañado (una vez ha sufrido el impacto).

Cabe comentar aquí, a modo de reflexión complementaria, que el cálculo dinámico (modelos de elementos finitos en programas de cálculo del tipo LS-DYNA) para analizar el impacto ferroviario sobre las pilas es complejo y podría usarse en casos de relevancia como, por ejemplo, en estaciones o pasos superiores de cierta entidad, en los que la inversión para realizar el cálculo sea rentable o dé unos resultados más exactos que el cálculo simplificado con fuerzas estáticas. Una solución intermedia podría realizarse con modelos equivalentes de dos grados de libertad que den aproximaciones ajustadas al problema.

Por último, las recomendaciones de diseño que pueden darse y, como medidas más eficaces en lo referente a la actuación sobre la estructura, se pueden destacar las siguientes:

- Empleo de soportes redundantes que proporcionan estructuras más robustas, lo que aumenta la probabilidad de que se limite el daño, por ejemplo, evitando los fustes únicos y potenciando el uso de muros o pilas tabique.
- Diseño de estructuras integrales que permiten absorber los impactos de manera más eficiente.
- Diseño de detalles dúctiles similares a los que se usan en el proyecto de estructuras en zonas sísmicas.

Referencias

- [1] Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-7: Acciones generales. Acciones accidentales. UNE-EN 1991-1-7. 2018.
- [2] IAPF. Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril. 2010
- [3] Código estructural. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana; Secretaría General Técnica, SG de Normativa y Estudios Técnicos. 2021.
- [4] NAP 2-0-1.4. Metodología para la evaluación del riesgo de colapso de estructuras por impactos de vehículos ferroviarios descarrilados. 1ª ed. junio 2023.edición
- [5] UIC 777-2. Constructions situées au-dessus des voies ferrées - Dispositions constructives dans la zone des voies. 2ª ed. diciembre 2002.
- [6] AREMA. Manual for Railway Engineering. Chapter 8. 2022.
- [7] AS 5100. Bridge design. Australian Standards, 2º ed. 2017.
- [8] CIVIL-SR-012. Protección contra colisión de elementos de soporte adyacentes a los ferrocarriles. Queensland Rail, 2010.
- [9] Concrete structures subjected to impact and blast loadings. Chunwei Zhang, Gholamreza Gholipour, 2022.
- [10] Shock, Impact and Explosion Structural Analysis and Design. M. Y. H. Bangash, 1993.
- [11] Containment capacity and estimation of crashworthiness of derailment containment walls against high-speed trains. Hyun-Ung Bae, Kyung-Min Yun and Nam-Hyoung Lim, 2018.
- [12] Impact Force Evaluation of the Derailment Containment Wall for High-Speed Train through a Collision Simulation. Hyun-Ung Bae et al. 2018.
- [13] Safety of High Speed Ground Guided Transportation Systems - Intrusion Barrier

Design Study. Federal Railroad Administration, USA. 1995.

[14] Devices to Guide Derailed Trains: Infrastructure Mounted Equipment. T1143. Rail safety and standards board Ltd. 2021.

[15] Ampliaciones de luces de pasos superiores de autopistas existentes. Solución aplicada en la autopista A-7 (by-pass) Valencia. Julio Martínez Calzón, Dr. Ingeniero de Caminos. Ginés Ladrón de Guevara Méndez, Ingeniero de Caminos. MC-2 Estudio de Ingeniería. S.L.