



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio de alternativas de cimentación y optimización
constructiva de pantallas acústicas ferroviarias ante
interferencias en la vía: El caso de Carcaixent

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Aparicio Ferrero, Silvana

Tutor/a: Martí Albiñana, José Vicente

Cotutor/a externo: Arribas Pérez, Gabriel

CURSO ACADÉMICO: 2025/2026

AGRADECIMIENTOS

Hace dos años llegué a Valencia empezando una vida nueva. Con la finalización de este trabajo de fin de máster, no solo termino mi etapa universitaria, también cumpla un sueño que no hubiese sido posible sin todas las personas que me acompañan cada día.

A Celia y Jorge porque llegamos de la mano, a una ciudad nueva y siempre han sido mi casa. A todos los amigos que el máster y Valencia me han dado, por cada tarde de biblioteca y por toda la ayuda que me habéis dado, por hacer de Valencia una segunda casa. Y a mis amigos de toda la vida, a 600 kilómetros de distancia siguen estando ahí, cuando no me quedan fuerzas ellos son los que creen en mí.

A mi familia, que, aunque de lejísimos siempre los siento cerca, se encargan de cuidarme y nunca dudan de mí ni un solo segundo. Gracias por impulsarme, no ponerme límites y dejarme ser yo misma. A mi hermana, ejemplo y referente en mi vida, por enseñarme que el trabajo lo es todo sin perder la felicidad.

Y, a mí misma, por la resiliencia, por tener la valentía de perseguir mis sueños y dejar muchas cosas atrás para poder avanzar en mi camino. Por el esfuerzo dedicado, por nunca rendirme y superarme cada día.

Por último, agradecer a la universidad, porque sin darse cuenta han hecho de este lugar mi casa, un sitio seguro donde he crecido rodeada de amigos increíbles y grandes profesionales. También agradecer a la empresa de prácticas, que me recibió con los brazos abiertos, me ha dado una gran oportunidad y a cada compañero que ha hecho que cada día aprenda algo nuevo sin sentirme de menos.

RESUMEN

Durante la obra del Proyecto de Construcción de Protección Acústica del nuevo acceso ferroviario de alta velocidad de Levante, se detectó una incompatibilidad constructiva en la pantalla acústica R358-R376, situada en el municipio de Carcaixent (Valencia): la cimentación mediante micropilotes con encepado desde vía, prevista en el proyecto, resultaba inviable a lo largo de 137 metros debido a la interferencia directa de los micropilotes con un muro de contención de mampostería preexistente, cuyo estado de conservación deficiente elevaba además el riesgo asociado a cualquier operación de perforación en su entorno.

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo analizar esta incompatibilidad y desarrollar un estudio de alternativas de cimentación que permita seleccionar y justificar técnicamente una solución viable, aplicando los principios de Lean Construction tanto en la fase de detección del problema como en el diseño del proceso constructivo de la solución adoptada.

A partir de un reconocimiento de campo conforme al principio Genchi Genbutsu, se plantean y desarrollan tres alternativas: pilotes convencionales desde la plataforma ferroviaria, instalación de minibarreras acústicas de baja altura junto a la línea convencional, y ejecución de una zapata corrida en el callejón colindante con reposicionamiento de la pantalla. Cada alternativa se estudia desde el punto de vista técnico-estructural, constructivo, acústico y económico, calculando para cada caso los esfuerzos transmitidos a la cimentación (axil, cortante y momento flector) conforme al Eurocódigo EC1-4 y a la norma UNE-EN 16727-2-2, y verificando su viabilidad geotécnica mediante el cálculo de la capacidad portante del terreno a partir de los parámetros del estudio geotécnico del proyecto y de las calcatas disponibles en el tramo.

La selección final se realiza mediante una evaluación multicriterio, combinando la valoración de un panel de siete expertos profesionales del sector con la de tres sistemas de inteligencia artificial, resultando seleccionada la Alternativa 3 (zapata corrida) por ser la única que elimina el riesgo sobre el muro existente, garantiza el cumplimiento acústico normativo en todos los receptores del tramo y no depende del programa de ventanas de mantenimiento nocturnas de ADIF. Se desarrolla su justificación técnica y estructural, la solución conceptual para la singularidad del paso inferior de 10 metros mediante un pórtico de dos apoyos, y el análisis del proceso constructivo desde los modelos TFM y Last Planner System de Lean Construction.

Palabras clave: pantallas acústicas ferroviarias, incompatibilidad constructiva, cimentaciones, zapata corrida, capacidad portante, Lean Construction, Last Planner System.

ABSTRACT

During the execution of the Acoustic Protection Construction Project for the new high-speed rail access in Levante, a construction incompatibility was detected in the R358-R376 acoustic screen, located in the municipality of Carcaixent (Valencia): the foundation solution defined in the project, micropiles with a pile cap from the track, proved unfeasible along 137 metres due to direct interference between the micropiles and a pre-existing masonry retaining wall, whose poor conservation condition further increased the risk associated with any drilling operation in its vicinity.

This Master's Thesis aims to analyse this incompatibility and develop a study of foundation alternatives that allows a viable solution to be selected and technically justified, applying Lean Construction principles both in the problem detection phase and in the design of the construction process for the adopted solution.

Based on a field survey following the Genchi Genbutsu principle, three alternatives are proposed and developed: conventional piles from the railway platform, installation of low-height acoustic mini-barriers next to the conventional line, and execution of a continuous strip footing in the adjacent service lane with relocation of the screen. Each alternative is studied from a technical-structural, constructive, acoustic and economic point of view, calculating for each case the forces transmitted to the foundation (axial, shear and bending moment) according to Eurocode EC1-4 and standard UNE-EN 16727-2-2, and verifying its geotechnical feasibility by calculating the bearing capacity of the soil from the parameters of the project's geotechnical study and the available boreholes along the section.

The final selection is made through a multi-criteria evaluation, combining the assessment of a panel of seven industry professional experts with that of three artificial intelligence systems, resulting in the selection of Alternative 3 (continuous strip footing) as the only one that eliminates the risk to the existing wall, guarantees compliance with acoustic regulations at all receptors along the section, and does not depend on ADIF's night maintenance window schedule. Its technical and structural justification is developed, along with the conceptual solution for the singularity of the 10-metre underpass through a two-support portal frame, and the analysis of the construction process from the TFV and Last Planner System Lean Construction models.

Keywords: railway acoustic screens, construction incompatibility, foundations, strip footing, bearing capacity, Lean Construction, Last Planner System.

RESUMEN EJECUTIVO

Título: Estudio de alternativas de cimentación y optimización constructiva de pantallas acústicas ferroviarias ante interferencias en la vía: El caso de Carcaixent.		
Autora: Silvana Aparicio Ferrero		
1. Planteamiento del problema		El presente Trabajo Fin de Máster analiza una incompatibilidad constructiva real detectada durante la fase de ejecución del proyecto de protección acústica del nuevo acceso ferroviario de alta velocidad de Levante, tramo La Encina-Xàtiva-Valencia, en el municipio de Carcaixent (Valencia). La pantalla acústica afectada es la R358-R376, con una longitud total de 156 metros, localizada entre los PK 477+423 y PK 477+592 de la línea, en el entorno del paso inferior conocido como el túnel del alcalde. La incompatibilidad consiste en la inviabilidad sistemática de la solución de cimentación proyectada: ejecución de micropilotes con encepado desde la plataforma ferroviaria en horario nocturno. A lo largo de 137 metros del tramo, los micropilotes interfieren directamente con un muro de contención de mampostería de piedra caliza existente en estado de conservación deficiente, con riesgo de colapso, cuya estabilidad no puede garantizarse ante operaciones de perforación en su entorno. Se suman a ello la anchura libre del callejón, de apenas 2,50 m de media, la proximidad de la línea convencional en servicio y las restricciones operativas impuestas por ADIF para el acceso nocturno a la plataforma ferroviaria. La incompatibilidad fue detectada en la fase de acondicionamiento de la zona de trabajo, antes de ejecutar ningún elemento de cimentación, lo que limitó su impacto al mínimo posible.
2. Objetivos		El objetivo general del estudio consiste en analizar y resolver la incompatibilidad constructiva detectada mediante la identificación, análisis y evaluación de

	alternativas de cimentación técnicamente viables en las condiciones reales de emplazamiento, integrando criterios acústicos, estructurales y económico, mediante principios de Lean Construction. Los objetivos específicos son: identificar y caracterizar la incompatibilidad constructiva; proponer alternativas de cimentación ejecutables en el entorno real; analizar la viabilidad técnica, constructiva y acústica de cada una, compararlas económicamente; aplicar herramientas de Lean Construction para la optimización del proceso constructivo de la solución adoptada; y seleccionar la alternativa óptima mediante una evaluación multicriterio estructurada y objetiva.
3. Metodología	El estudio se estructura en tres fases. La primera es el análisis de la incompatibilidad, basado en el reconocimiento de campo del tramo afectado, la confrontación entre la solución proyectada y las condiciones reales del emplazamiento y la justificación técnica de la inviabilidad constructiva. La segunda es el análisis técnico, constructivo, acústico y económico de las tres alternativas propuestas. La tercera es la selección de la solución óptima mediante una evaluación multicriterio con cinco criterios ponderados. Dicha ponderación combina las valoraciones de un panel de expertos formado por siete profesionales del sector, con un peso del 60% y de tres sistemas de inteligencia artificial, con un peso del 40%. Los cinco criterios y sus pesos finales son: seguridad y prevención (27%), criterio económico (22%), criterio acústico (21%), plazo de ejecución (18%) y sostenibilidad e impacto ambiental (12%). La viabilidad técnica no se incluye como criterio de ponderación sino como filtro de admisibilidad previo
4. Resultados principales	Se proponen y analizan tres alternativas. La primera consiste en una cimentación profunda mediante pilotes convencionales de 650mm de diámetro y 6 m de profundidad, ejecutados desde la plataforma ferroviaria en horario nocturno, con un PEM de 528.792,58€. Obtiene la puntuación multicriterio de 2,18 sobre 5 penalizada principalmente por el alto riesgo sobre el muro existente y la necesidad de trabajar en horario nocturno desde vía. La alternativa 2 consiste en la

		colocación de una minibarrera acústica de baja altura junto a la línea convencional, con un PEM de 233.559,71€. Obtiene una puntuación de 3,83, siendo la más económica pero penalizada por la falta de evidencias de su eficiencia en la alta velocidad. La alternativa 3 consiste en una zapata de hormigón armado HA-30 de 2,00x0,80m ejecutada desde el exterior del dominio ferroviario en jornada diurna, con recolocación de la pantalla y compensación de altura mediante zócalo y postes HEB-340 de mayor altura, 6,2m. Su PEM es de 366.571,05€ y es la alternativa seleccionada como solución adoptada por ser la única que elimina simultáneamente el riesgo sobre el muro existente, garantiza el cumplimiento normativo en todos los receptores del tramo y no genera dependencia del programa de ventanas de ADIF.
5. Cumplimiento objetivos	de	Todos los objetivos específicos planteados han sido alcanzados. La incompatibilidad ha sido identificada, caracterizada y justificada técnicamente. Se han propuesto tres alternativas ejecutables en las condiciones reales del emplazamiento y se han analizado desde el punto de vista estructural, constructivo, acústico y económico. La evaluación multicriterio ha permitido seleccionar la solución óptima de forma objetiva y trazable. La solución adoptada ha sido justificada técnica y estructuralmente mediante los cálculos desarrollados en los anejos, con verificación de tensiones transmitidas al terreno, dimensionamiento de la cimentación y comprobación de los esfuerzos sobre los postes. La aplicación de Lean Construction al proceso constructivo de la Alternativa 3 ha dado respuesta al objetivo de optimización de procesos.
6. Limitaciones		La principal limitación del estudio es la ausencia de solución completamente desarrollada para los 10 metros del paso inferior, donde la zapata corrida no puede ejecutarse por continuidad geométrica. El estudio plantea conceptualmente una solución mediante un pórtico en la pared central del túnel, pero su cálculo y justificación detallados quedan fuera del alcance definido y constituyen la línea de trabajo prioritaria.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
RESUMEN EJECUTIVO.....	iv
1 INTRODUCCIÓN	1
2 JUSTIFICACIÓN	3
3 OBJETIVOS.....	4
3.1 Objetivo general.....	4
3.2 Objetivos específicos.....	4
4 RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	5
5 MARCO TEÓRICO	7
5.1 El ruido.....	7
5.1.1 Indicadores de evaluación del ruido en infraestructuras ferroviarias	7
5.2 Contaminación acústica.....	7
5.2.1 La contaminación acústica ferroviaria.....	8
5.2.2 Fuentes y características del ruido ferroviario	8
5.2.3 Efectos del ruido ferroviario.....	10
5.3 Percepción humana del sonido	11
5.3.1 Percepción humana auditiva y escala dB(A).....	11
5.4 Pantallas acústicas.....	12
5.4.1 Interacción entre la onda sonora y la pantalla acústica	13
5.4.2 Zona de sombra acústica y pérdida por inserción (IL)	14
5.4.3 Parámetros acústicos y no acústicos de diseño	15
5.5 Normativa (Marco normativo aplicable).....	16
5.5.1 Normativa ambiental y de protección frente al ruido	17
5.5.2 Normativa de producto marcado CE.....	18
5.5.3 Normativa técnica ferroviaria.....	18
5.5.4 Normativa estructural y geotécnica	19
5.5.5 Integración normativa en el caso de estudio	19
5.6 Tipología de pantallas	19
5.6.1 Pantallas de hormigón.....	20

5.6.2	Pantalla metálica	21
5.6.3	Pantalla transparente.....	22
5.6.4	Pantalla mixta.....	23
5.6.5	Pantalla de madera	23
5.6.6	Minibarreras de baja altura.....	24
5.6.7	Pantallas vegetales.....	25
5.6.8	Absorbedores de carril.....	25
5.7	Tipología de cimentación.....	26
5.7.1	Cimentación superficial. Zapata corrida.....	27
5.7.2	Cimentación profunda. Pilotes.....	28
5.7.3	Cimentación profunda. Micropilotes	28
5.7.4	Pantallas acústicas sobre estructuras existentes	29
5.7.5	Comparativa de cimentación.	30
5.8	Lean Construction	30
5.8.1	Fundamentos de Lean Construction	30
5.8.2	Last Planner System (LPS)	33
5.8.3	Aplicación al presente estudio de alternativas.....	35
6	DESCRIPCIÓN DEL CASO REAL.....	36
6.1	Entorno de actuación.....	36
6.2	Localización	36
6.3	Solución proyectada.....	39
6.3.1	Descripción de la pantalla	39
6.3.2	Sistema de cimentación proyectado	39
6.3.3	Estudio acústico de referencia	40
6.4	Condicionantes.....	41
6.4.1	Condicionantes geométricos.....	41
6.4.2	Condicionantes constructivos	43
6.4.3	Condicionantes acústicos	44
6.4.4	Condicionantes acústicos	47
6.4.5	Resumen de los condicionantes.....	48
6.5	Caracterización geológica y geotécnica	50
6.5.1	Caracterización geológica.....	50
6.5.2	Caracterización geotécnica	53

7	ANÁLISIS DE LA INCOMPATIBILIDAD CONSTRUCTIVA	56
7.1	Identificación de la incompatibilidad	56
7.2	Confrontación entre la solución proyectada y las condiciones reales	58
7.3	Justificación técnica de la inviabilidad de la solución adoptada	59
7.3.1	Interferencia directa con el muro de contención y su estado de conservación	59
7.3.2	Complejidad de la ejecución desde la plataforma ferroviaria	60
7.3.3	Inviabilidad del encepado de hormigón armado	61
7.3.4	Inviabilidad sistemática y descarte definitivo de la solución proyectada	61
7.4	Análisis desde la perspectiva de Lean Construction	61
8	PROPUESTA DE ALTERNATIVAS	63
8.1	Introducción y criterios de selección de alternativas	63
8.2	Justificación de la tipología de pantalla: mixta (metálica + metacrilato)	63
8.3	Alternativa 1. Cimentación mediante pilotes convencionales	64
8.3.1	Descripción de la alternativa	64
8.3.2	Condicionante específico. Interferencia de una viga con el muro existente	65
8.3.3	Condicionantes y restricciones de ejecución	65
8.4	Alternativas 2. Minibarreras de baja altura próxima al carril	66
8.4.1	Descripción de la alternativa	66
8.4.2	Condicionantes y restricciones de ejecución	68
8.5	Alternativa 3. Zapata corrida en el callejón con reposicionamiento de la pantalla	70
8.5.1	Descripción de la alternativa	70
8.5.2	Compensación acústica. Zócalo de hormigón y postes de mayor altura	71
8.5.3	Proceso constructivo conceptual	71
9	ANÁLISIS TÉCNICO, CONSTRUCTIVO Y ECONÓMICO DE LAS ALTERNATIVAS	73
9.1	Análisis de la alternativa 1. Cimentación mediante pilotes convencionales	73
9.1.1	Viabilidad técnica y estructural	73
9.1.2	Análisis constructivo	75
9.1.3	Análisis económico	76
9.1.4	Conclusión de la alternativa	76
9.2	Análisis de la alternativa 2. Colocación de minibarreras acústicas	78
9.2.1	Viabilidad técnica y estructural	78
9.2.2	Análisis constructivo	81
9.2.3	Análisis económico	83
9.2.4	Conclusión de la alternativa	84

9.3	Análisis de la alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata corrida	86
9.3.1	Viabilidad técnica y estructural	86
9.3.2	Análisis constructivo.....	87
9.3.3	Análisis económico.....	91
9.3.4	Conclusión de la alternativa	91
9.4	Tabla resumen alternativas	Error! Marcador no definido.
10	EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	1
10.1	Metodología	1
10.2	Definición de criterios.....	1
10.3	Ponderación de criterios.....	3
10.3.1	Panel de expertos	3
10.3.2	Criterio de inteligencias artificiales	7
10.3.3	Pesos finales ponderados	9
10.4	Matriz de evaluación multicriterio	10
10.5	Resultado y alternativa seleccionada.....	12
11	JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA	14
11.1	Justificación técnica y estructural	14
11.2	Solución para el paso superior	15
11.3	Justificación constructiva.....	15
11.4	Aplicación de Lean Construction a la solución	16
11.4.1	Intersección de la incompatibilidad desde el modelo TFM	16
11.4.2	Principio Genchi Genbutsu	16
11.4.3	Aplicación del modelo TFM al proceso constructivo de la solución adoptada.....	17
11.4.4	Aplicación de Last Planner System en la ejecución de la solución adoptada	17
12	CONCLUSIONES.....	20
12.1	Conclusiones sobre la incompatibilidad detectada.....	20
12.2	Conclusiones sobre el análisis de alternativas.....	20
12.3	Conclusiones sobre los principios de Lean Construction	21
12.4	Conclusiones sobre la solución adoptada.....	21
12.5	Futuras líneas de trabajo	22
	BIBLIOGRAFÍA	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. ODS 3. Salud y bienestar. Fuente: (Naciones Unidas, n.d.)	5
Figura 2. ODS 9. Industria, innovación e infraestructura. Fuente: (Naciones Unidas, n.d.)	6
Figura 3. ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles. Fuente: (Naciones Unidas, n.d.)	6
Figura 4. Diagrama del ruido de rodadura generado por la rueda del transporte ferroviario. Fuente:(Mundo ferroviario, n.d.)	9
Figura 5. Niveles y fuentes de ruido en función de la velocidad. Fuente:(la Prida Caballero et al., n.d.)	10
Figura 6. Curvas de Fletcher y Munson (1933). Fuente:(Fletcher_munson, n.d.)	11
Figura 7. Curvas de ponderación espectral. Fuente:(Patrocinante & Arenas, 2004)	12
Figura 8. Comportamiento acústico del sonido cuando se coloca una pantalla acústica. Fuente: (Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-b):	13
Figura 9. Pantalla acústica de hormigón. Fuente: elaboración propia.	21
Figura 10. Pantalla metálica. Fuente: elaboración propia.	22
Figura 11. Pantalla transparente. Fuente:(PANTALLAS ACÚSTICAS, n.d.)	23
Figura 12. Pantallas acústicas mixtas (metálicas + metacrilato). Fuente: elaboración propia.	23
Figura 13. Pantallas acústicas de madera. Fuente: (PANTALLAS ACÚSTICAS, n.d.)	24
Figura 14. Mini-barreras acústicas. Fuente: Acustrain.	25
Figura 15. Pantallas acústicas con cubierta vegetal. Fuente: pantallas acústicas vegetalizable Panacor.	25
Figura 16. Absorbedores de carril. Fuente:(Obras Urbanas, n.d.)	26
Figura 17. Cimentación directa mediante zapata corrida. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.	27
Figura 18. Plano de referencia de cimentación con pilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	28
Figura 19. Cimentación mediante micropilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.	29
Figura 20. Colocación de pantallas sobre muros existentes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	29
Figura 21. Diagrama de mejora de la producción. Modelo TFV. Fuente: (Segura, n.d.-b)	31
Figura 22. Los siete desperdicios de Lean Construction. Fuente:(Segura, n.d.-b).....	32
Figura 23. Beneficios del sistema LPS. Fuente: (LAST PLANNER SYSTEM ITEC, n.d.)	33
Figura 24. Plano de situación (Carcaixent). Fuente: UTE Pantallas la Encina, proyecto.	37
Figura 25. Localización de la pantalla acústica R358-376. Fuente: Google Maps	37
Figura 26. Tramo de pantalla R358-376 con interferencia de muro preexistente. Fuente: Google Earth.	38
Figura 27. Longitud del tramo 1 de la pantalla R358-376 con interferencia con muro preexistente.....	38

Figura 28. Longitud del tramo 2 de la pantalla R358-376 con interferencia con muro preexistente.....	38
Figura 29. Estructura de proyecto, cimentación mediante micropilotes. Fuente: UTE Pantallas la Encina, proyecto.....	39
Figura 30. Solución de proyecto. Cimentación por micropilotes. Fuente: UTE Pantallas la Encina, proyecto.	40
Figura 31. Límites sonoros del Anexo II Ley 7/2002. Fuente: proyecto.....	40
Figura 32. Vista del acceso al callejón desde la vía pública. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 33. Esquema de la sección actual de la plataforma. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 34. Estado deficiente del muro en la pantalla de estudio. Fuente: elaboración propia	43
Figura 35. Muro de mampostería de piedra caliza. Fuente: elaboración propia.	44
Figura 36. Esquemas de la zonificación de seguridad para trabajos próximos a una vía en servicio. Fuente:(ugtcatalunya, n.d.).....	45
Figura 37. Zona de peligro eléctrico. Fuente:(ugtcatalunya, n.d.).....	45
Figura 38. Esquema de zonificación para trabajos de ADIF, adaptada a la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.....	46
Figura 39. Esfuerzos generados por el viento de sobre presión dinámica. Fuente: proyecto.....	48
Figura 40. Caracterización geológica del proyecto. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.	51
Figura 41. Leyenda de materiales del Cuaternario de proyecto. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	51
Figura 42. Localización de acuíferos en proyecto. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.	52
Figura 43. Croquis del entorno de la pantalla de estudio R358-376. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.	54
Figura 44. Localización de la cata PN2-35. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	55
Figura 45. Esquema de cimentación por micropilotes. Solución de proyecto. Fuente: elaboración propia.	56
Figura 46. Interferencia de los micropilotes con el muro existente. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	57
Figura 47. Distancia del eje de la vía a la pantalla (línea convencional). Fuente: Google Maps.....	57
Figura 48. Distancia del eje de la vía a la pantalla (línea de alta velocidad). Fuente: Google Maps.....	58
Figura 49. Alternativa 1. Cimentación mediante pilotes. Fuente: elaboración propia.....	65
Figura 50. Minibarrera acústica. Fuente: Acustrain.	66
Figura 51. Esquema de implantación de minibarrera próxima a la línea convencional. Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.....	67

Figura 52. Esquema de implantación de minibarrera próximas a la línea AV. Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.....	67
Figura 53. Esquema de implantación de minibarreras simultáneas. Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.	67
Figura 54. Instalaciones ferroviarias, equipos y señales próximas a una estación de tren. Fuente: (Mikel Iturralde, n.d.)	69
Figura 55. Balizas ASFA. Fuente:(Mikel Iturralde, n.d.)	69
Figura 56. Pórtico rígido de catenaria. Fuente:(Carnicero López Co-Tutor et al., n.d.).	70
Figura 57. Esquema de implantación de zapata corrida. Alternativa 3. Fuente: elaboración propia.....	71
Figura 58. Croquis encepado de 2 pilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	74
Figura 59. Croquis encepado de 3 pilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.....	74
Figura 60. Niveles acústicos previsibñes con la línea AV de los receptores significativos de la pantalla R358-370. Fuente: Anejo de estudio acústico de proyecto.....	79
Figura 61. Realización de ensayos de minibarrera lateral. Fuente: Acustrain.	80
Figura 62. Resultados de ensayo de minibarrera lateral. Fuente: Acustrain.	80
Figura 63. Instalación de minibarrera lateral junto vía convencional. Fuente: Acustrain	82
Figura 64. Zapata de referencia a ejecutar en la pantalla R358-R376. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.	87

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo y ampliación de las infraestructuras ferroviarias de alta velocidad constituye una de las principales actuaciones estratégicas en materia de transporte y movilidad sostenible en España. Este tipo de infraestructuras requieren la implantación de medidas correctoras que permitan minimizar las afecciones generadas sobre el entorno, especialmente aquellas relacionadas con la contaminación acústica producida por el tránsito ferroviario. Entre dichas medidas, las pantallas acústicas representan una de las soluciones más empleadas para garantizar el cumplimiento de los niveles sonoros establecidos por la normativa vigente y reducir el impacto sobre las zonas urbanas y residenciales próximas a la infraestructura.

En el marco del “Proyecto Constructivo de Protección Acústica del Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Madrid–Castilla La Mancha–Comunidad Valenciana–Región de Murcia”, se proyecta la ejecución de diversas pantallas acústicas a lo largo de 100 kilómetros destinadas a la protección del entorno frente al ruido derivado de la explotación ferroviaria.

Entre las pantallas contempladas en proyecto, se incluye la R358-376, de material mixto (metálica + metacrilato) de 7 metros de altura, configurada mediante un tramo inferior metálico de 5 metros y un tramo superior transparente de 2 metros, con una longitud de 156 metros. Durante el análisis constructivo previo a la ejecución de uno de los tramos de dicha pantalla, se detectó una incompatibilidad relevante entre la solución de cimentación proyectada, micropilotes, y las condiciones reales existentes en obra.

Estas mostraban la existencia de un muro enterrado, asociado al sostenimiento de un callejón colindante, que genera una interferencia directa con la disposición prevista de los micropilotes, comprometiendo la viabilidad de su ejecución y pudiendo afectar a la estabilidad de la estructura existente.

Adicionalmente, las limitaciones geométricas del entorno, la reducida disponibilidad de espacio y las condiciones de accesibilidad para maquinaria especializada dificultan significativamente la ejecución de soluciones convencionales de cimentación profunda, obligando a reconsiderar la solución inicialmente proyectada.

A partir de esta problemática, el presente Trabajo Fin de Máster desarrolla un análisis técnico y constructivo de las posibles alternativas de cimentación aplicables al tramo afectado, evaluando tanto su viabilidad de ejecución como sus implicaciones estructurales, constructivas, económicas y funcionales. Entre las alternativas consideradas se incluyen soluciones basadas en cimentaciones profundas mediante pilotes, sistemas de reducción de altura de pantalla acústica y una propuesta de reubicación de la pantalla hacia el callejón mediante una cimentación superficial continua tipo zapata corrida.

Tras el análisis, se plantea una evaluación multicriterio que permita justificar la solución más adecuada para resolver la incompatibilidad detectada, garantizando tanto la funcionalidad acústica de la infraestructura como la viabilidad real de su construcción. Asimismo, el trabajo incorpora un análisis de la alternativa a ejecutar desde el punto de vista técnico, económico y constructivo, incluyendo la aplicación de principios de Lean Construction

orientados a la identificación de ineficiencias y a la optimización de los procesos de ejecución.

2 JUSTIFICACIÓN

La ejecución de infraestructuras ferroviarias de alta velocidad implica la coordinación de numerosos condicionantes técnicos, constructivos y ambientales que deben integrarse adecuadamente desde la fase de proyecto hasta la ejecución final de las obras. No obstante, durante el desarrollo de los trabajos es frecuente la aparición de situaciones no previstas inicialmente, derivadas de limitaciones geométricas, interferencias con elementos existentes o diferencias entre la información disponible en proyecto y las condiciones reales encontradas en obra.

En este contexto, la resolución de incompatibilidades constructivas adquiere una especial relevancia dentro del ámbito de la ingeniería civil, ya que dichas incidencias pueden comprometer tanto la viabilidad técnica de una solución como los plazos, costes y procedimientos de ejecución asociados a la obra. La necesidad de adaptar soluciones inicialmente proyectadas a las condiciones reales del entorno constituye una problemática habitual en infraestructuras lineales, especialmente en actuaciones ferroviarias donde existen importantes restricciones operativas y espaciales.

El presente Trabajo Fin de Máster se justifica por el interés técnico y práctico asociado a una problemática real detectada durante la implantación de pantallas acústicas ferroviarias en el Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. La solución de cimentación prevista en proyecto, basada en micropilotes y encepado, resulta inviable debido a la presencia de un muro enterrado existente que interfiere directamente con la disposición de los elementos de cimentación proyectados. Esta situación obliga a estudiar soluciones alternativas que permitan garantizar la estabilidad y funcionalidad de la pantalla acústica sin comprometer las estructuras existentes ni las condiciones de ejecución de la obra.

El interés del trabajo no reside únicamente en el análisis estructural de las posibles alternativas, sino también en la evaluación integral de su viabilidad constructiva. Para ello, se consideran aspectos relacionados con la accesibilidad de maquinaria, la disponibilidad de espacio, los procedimientos de ejecución, la afección al entorno y las limitaciones propias de una infraestructura ferroviaria de alta velocidad. Del mismo modo, el estudio incorpora criterios funcionales asociados al comportamiento acústico de cada solución, especialmente en aquellas alternativas que implican modificaciones en la geometría o ubicación de la pantalla.

En consecuencia, el desarrollo de este trabajo pretende aportar una solución técnicamente justificada y constructivamente viable a una problemática real de ingeniería, integrando criterios estructurales, constructivos, funcionales y de optimización de procesos dentro de un caso práctico aplicado a una infraestructura ferroviaria de alta velocidad.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

El objetivo general del presente Trabajo Fin de Máster consiste en analizar y resolver la incompatibilidad constructiva detectada en la implantación de una pantalla acústica ferroviaria proyectada en el Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante, mediante el estudio y evaluación de alternativas de cimentación técnicamente viables, considerando criterios estructurales, constructivos, acústicos y económicos.

3.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general definido, se plantean los siguientes objetivos específicos, de manera estructurada según las distintas fases del estudio:

- Analizar las características de la solución de cimentación inicialmente proyectada para la pantalla acústica, identificando los condicionantes geométricos y constructivos asociados a su ejecución.
- Identificar y evaluar diferentes alternativas de cimentación aplicables al tramo afectado, considerando soluciones de cimentación profunda, el uso de minibarreras y cimentaciones superficiales mediante zapata corrida.
- Analizar la viabilidad técnica y constructiva de cada alternativa teniendo en cuenta los medios auxiliares necesarios, accesibilidad de maquinaria, espacio disponible y condicionantes del entorno ferroviario.
- Comparar las distintas soluciones desde el punto de vista técnico, funcional y económico, valorando aspectos relacionados con el comportamiento acústico, la facilidad de ejecución, los plazos de obra y los costes asociados.
- Aplicar principios y herramientas de Lean Construction para la optimización de la planificación y ejecución de las alternativas, identificar ineficiencias en los procesos constructivos y proponer mejoras orientadas a la optimización de la ejecución.
- Realizar una evaluación multicriterio que permita determinar la solución más adecuada para resolver la incompatibilidad detectada.
- Justificar técnicamente la alternativa finalmente adoptada, garantizando su viabilidad estructural, constructiva y funcional dentro del entorno de actuación.

4 RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015, representan un ambicioso conjunto de 17 objetivos destinados a abordar los desafíos globales. Estos, forman parte de la Agenda 2030, una hoja de ruta para el desarrollo sostenible que busca equilibrar las dimensiones económica, social y ambiental del progreso. El presente Trabajo Fin de Máster se encuentra alineado con varios de dichos objetivos, especialmente con aquellos relacionados con la mejora de las infraestructuras, la sostenibilidad urbana y la protección de la salud y el bienestar de la población.

En primer lugar, el trabajo guarda una relación directa con el ODS 3 (*Figura 1*)(*Naciones Unidas, n.d.*): Salud y bienestar, ya que las pantallas acústicas ferroviarias constituyen una medida de protección frente a la contaminación acústica generada por el tráfico ferroviario. La exposición continuada a elevados niveles de ruido puede producir efectos negativos sobre la salud y la calidad de vida de la población, incluyendo alteraciones del sueño, estrés o afecciones cardiovasculares. La implantación de soluciones acústicas adecuadas contribuye a minimizar estas afecciones y a mejorar las condiciones ambientales de las zonas próximas a la infraestructura ferroviaria.



Figura 1. ODS 3. Salud y bienestar. Fuente: (Naciones Unidas, n.d.)

El trabajo también se alinea de manera significativa con el ODS 9 (*Figura 2*)(*Naciones Unidas, n.d.*): Industria, innovación e infraestructura, al centrarse en el análisis y optimización de soluciones constructivas aplicadas a infraestructuras ferroviarias de alta velocidad. El estudio de alternativas de cimentación, la adaptación del diseño a condicionantes reales de obra y la incorporación de metodologías Lean Construction representan actuaciones orientadas a mejorar la eficiencia, innovación y resiliencia de las infraestructuras.



Figura 2. ODS 9. Industria, innovación e infraestructura. Fuente: (Naciones Unidas, n.d.)

De forma complementaria, el contenido del trabajo presenta relación con el ODS 11 (*Figura 3*) (Naciones Unidas, n.d.): Ciudades y comunidades sostenibles, la reducción del impacto acústico derivado del transporte ferroviario favorece una mejor integración de las infraestructuras en entornos urbanos y contribuye a la creación de espacios más sostenibles y compatibles con el bienestar de la población.



Figura 3. ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles. Fuente: (Naciones Unidas, n.d.)

5 MARCO TEÓRICO

5.1 El ruido

El ruido puede definirse, en su sentido más amplio, como todo sonido no deseado que resulta molesto, perturbador o perjudicial para quien lo recibe. Desde el punto de vista físico, no existe diferencia objetiva entre el sonido y el ruido, ambos son variaciones de presión en un medio elástico que se propagan en forma de ondas mecánicas, siendo la componente subjetiva y contextual la que determina si una determinada emisión acústica es percibida como sonido o como ruido por el receptor (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2023). Aunque en el ámbito de las infraestructuras de transporte ferroviario, esta distinción carece de relevancia práctica ya que la normativa ambiental opera sobre niveles de presión sonora medibles con independencia de la valoración subjetiva de cada individuo.

El análisis de este fenómeno requiere abordar tres dimensiones complementarias: los indicadores acústicos empleados para su medición y evaluación, las características específicas del ruido ferroviario como fuente de emisión, y los efectos documentados sobre la salud de las poblaciones expuestas que constituyen la justificación última de la obligación de actuar con medidas correctoras, como pantallas acústicas.

5.1.1 Indicadores de evaluación del ruido en infraestructuras ferroviarias

La medición y evaluación del ruido ambiental en el entorno de infraestructuras de transporte se realiza mediante indicadores estadísticos que integran los niveles de exposición a lo largo de períodos de tiempo representativos, reflejando tanto la intensidad de la emisión como su distribución temporal. El indicador de referencia en la normativa europea y española es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A — L_{Aeq} — que representa el nivel constante de ruido que contendría la misma energía acústica total que la señal real durante el período de medición, expresado en dB(A).

La medición de las emisiones sonoras de los vehículos ferroviarios se rige por la norma ISO 3095, que establece los procedimientos condiciones específicas para medir y evaluar el ruido emitido: condiciones de medición en campo libre, posiciones de micrófono normalizadas a 7,5 m del eje de vía y a 1,2 m de altura, registro simultáneo de velocidad y condiciones meteorológicas (humedad, temperatura y presión barométrica), y verificación de que el ruido de fondo sea al menos 10 dB inferior al nivel del tren en todas las posiciones de medición (Acoustics-Railway Applications-Measurement of Noise Emitted by Railbound Vehicles INTERNATIONAL STANDARD ISO 3095(E) li COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT, 2013)

5.2 Contaminación acústica

La contaminación acústica puede definirse como la presencia en el entorno de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente (De España, n.d.). A diferencia de otras formas de contaminación ambiental, la contaminación acústica no deja residuos permanentes ni se acumula en el entorno una vez que la fuente

cesa su emisión, pero sus efectos sobre la salud se producen de forma acumulativa e imperceptible.

La magnitud del problema a escala europea y española es significativa. Según el informe *“Environmental Noise in Europe 2020”* de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), al menos 113 millones de ciudadanos europeos están expuestos a niveles de ruido de tráfico rodado superiores a 54 dB(A) de L_d , umbral a partir del cual la OMS considera probable la aparición de efectos adversos para la salud. El tráfico ferroviario constituye la segunda fuente de contaminación acústica en Europa, con aproximadamente 22 millones de personas expuestas a niveles elevados, seguida del tráfico aéreo con cuatro millones (Peris, 2017). Se estima que el ruido ferroviario por encima de los umbrales de contaminación acústica afecta al 4 % de la población durante el día y la noche, y al 3 % durante la noche (Peris, 2017).

En España, la OMS identificó en 2022 al país como el segundo más ruidoso del mundo, y el Instituto de Salud Carlos III cifra en el 28% la proporción de población española expuesta a niveles superiores a los 65 dB(A) de referencia (Lefebvre, 2023).

5.2.1 La contaminación acústica ferroviaria

En el contexto de las infraestructuras de transporte, el ferrocarril presenta una característica que lo distingue de otras fuentes de contaminación acústica, su carácter lineal y continuo. A diferencia de una industria o un aeropuerto que son fuentes acústicas localizadas cuya área de afección está espacialmente acotada, una línea ferroviaria genera una franja de afección acústica que puede extenderse durante decenas de kilómetros, afectando a un número elevado de receptores a lo largo de todo su recorrido.

Esta condición hace que las medidas correctoras deban planificarse también de forma lineal y continua, adaptándose a las condiciones específicas de cada tramo y a las distintas tipologías de receptores sensibles presentes en el corredor.

La expansión de la red de alta velocidad española ha incrementado de forma notable la relevancia de esta problemática. Las circulaciones a velocidades superiores a 250 km/h generan niveles de emisión significativamente más elevados que los de las líneas convencionales, lo que amplía el radio de afección y eleva el número de receptores expuestos a niveles por encima de los umbrales normativos. Es precisamente en este contexto donde la pantalla acústica se erige como la medida correctora técnicamente más eficaz y de mayor implantación en la red ferroviaria española, constituyendo el objeto central del presente trabajo.

La identificación de los tramos donde los niveles de inmisión superan los valores límite del RD 1367/2007 a través de los MER (Mapas Estratégicos de Ruido) es el punto de partida que desencadena la obligación de actuación por parte de ADIF.

5.2.2 Fuentes y características del ruido ferroviario

El ruido generado por el tráfico ferroviario es el resultado de la superposición de varias fuentes, cuya contribución relativa varía significativamente con la velocidad de circulación.

A velocidades bajas e intermedias, el ruido de rodadura, originado por la interacción vibratoria entre la rueda y el carril, constituye la fuente dominante.

A medida que la velocidad aumenta, el ruido aerodinámico, generado por la turbulencia del flujo de aire alrededor del material rodante, los pantógrafos y los espacios interbogies, gana peso progresivamente, llegando a ser la fuente predominante en circulaciones por encima de 300 km/h (RUIDO DE TRÁFICO:FERROCARRILES AUTOR: FERNANDO SEGUÉS ECHAZARRETA, 2007; D. Thompson, 2009b) Para poder calcular el ruido que se genera es necesario tener en cuenta estas tres principales fuentes (D. Thompson, 2009a), (D. Thompson, 2009b):

- Ruido de rodadura: originado por la interacción vibratoria entre la rueda y el carril. Es la fuente dominante en el rango de velocidades entre 50 y 200 km/h. Su intensidad aumenta con la rugosidad superficial de ruedas y carriles, con las irregularidades de la vía (juntas, variaciones de rigidez, defectos de alineación) y con la velocidad. En curvas con radios pequeños puede generarse adicionalmente ruido de chirrido de alta frecuencia por deslizamiento lateral de la pestaña sobre el carril.

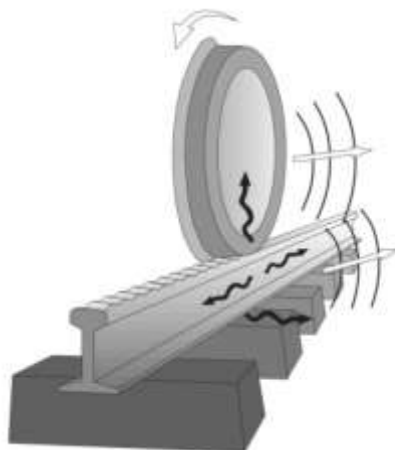


Figura 4. Diagrama del ruido de rodadura generado por la rueda del transporte ferroviario. Fuente:(Mundo ferroviario, n.d.)

- Ruido de tracción y elementos auxiliares: comprende las emisiones del sistema de propulsión (motor, transmisión, ventiladores de refrigeración) y de los equipos auxiliares de climatización y ventilación. Es predominante a velocidades muy bajas (por debajo de 50 km/h aproximadamente) y queda enmascarado por el ruido de rodadura a medida que la velocidad aumenta. En estaciones y maniobras puede constituir la fuente principal de molestia para los receptores próximos (RUIDO DE TRÁFICO:FERROCARRILES AUTOR: FERNANDO SEGUÉS ECHAZARRETA, 2007).
- Ruido aerodinámico: generado por la turbulencia del flujo de aire alrededor del material rodante, con contribuciones especialmente relevantes de los pantógrafos, los espacios interbogies, los pasos de rueda y las discontinuidades geométricas del contorno del tren (D. Thompson, 2009b).

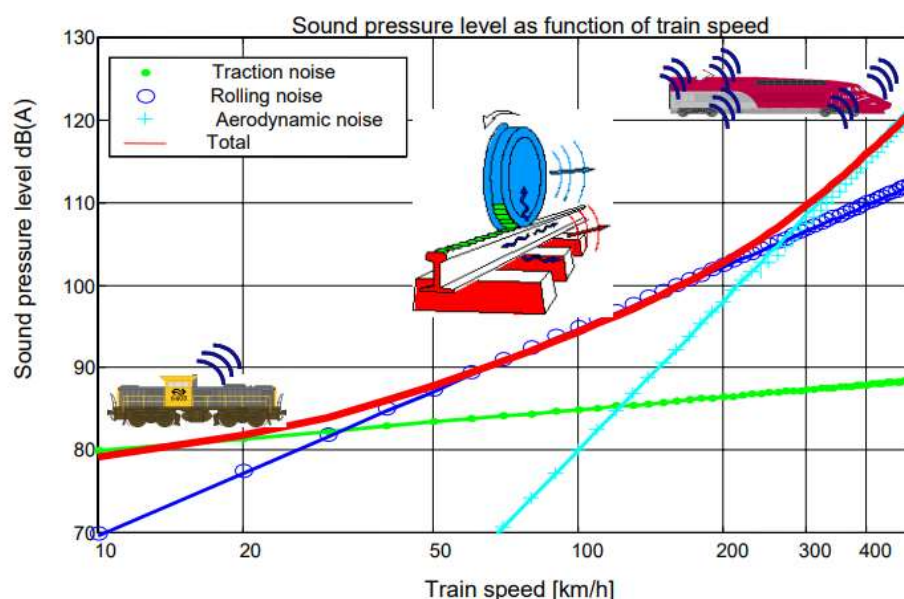


Figura 5. Niveles y fuentes de ruido en función de la velocidad. Fuente: (la Prida Caballero et al., n.d.)

Esta dependencia con la velocidad es de carácter exponencial: el nivel de ruido de rodadura crece con la velocidad (V) del tren a una tasa aproximada de $30 \log_{10} V$, mientras que el ruido aerodinámico crece con potencias mayores de entre $60 \log_{10} V$ y $80 \log_{10} V$. En términos prácticos, esto significa que pasar de 200 km/h a 300 km/h puede suponer un incremento de entre 6 y 10 dB(A) en el nivel de emisión total del tren, lo que equivale a percibir el ruido como significativamente más intenso a pesar de que la diferencia de velocidad sea solo del 50% (D. Thompson, 2009b).

5.2.3 Efectos del ruido ferroviario

La Organización Mundial de la Salud reconoce la contaminación acústica como el segundo factor de riesgo ambiental más importante para la salud en Europa, únicamente por detrás de la contaminación atmosférica por partículas (WHO, 2018). En sus Guías de Ruido Ambiental para la Región Europea, la OMS establece una relación dosis-respuesta entre la exposición al ruido ferroviario y un conjunto de efectos sobre la salud documentados.

El mecanismo fisiopatológico subyacente a estos efectos ha sido ampliamente estudiado: la exposición al ruido, incluso durante el sueño, activa de forma involuntaria el sistema nervioso autónomo y el eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal que producen incrementos transitorios de la presión arterial, la frecuencia cardíaca y la vasoconstricción periférica. Cuando esta activación se produce de forma crónica y mantenida, puede conducir a cambios fisiopatológicos permanentes en el sistema cardiovascular, con incrementos documentados del riesgo de hipertensión arterial y cardiopatía isquémica en poblaciones expuestas a niveles superiores a 60 dB(A) de L_{den} (INVASSAT, n.d.; Organización Mundial de la Salud (WHO), n.d.).

De particular relevancia en el entorno ferroviario es el efecto sobre el sueño, cuyo umbral de afectación se sitúa a partir de valores de L_{night} de tan solo 45 dB(A) en zonas residenciales, por debajo del límite normativo vigente en España de 50 dB(A) de L_{night} para uso residencial. Lo que genera que, incluso sin que el individuo alcance el despertar

consciente, aparezcan acumulativos sobre la salud que se manifiestan en fatiga crónica, deterioro cognitivo y mayor vulnerabilidad a otras patologías (Organización Mundial de la Salud (WHO), n.d.).

El conjunto de evidencias anteriores fundamenta la obligación normativa, establecida en la Directiva 2002/49/CE y desarrollada en España por el Real Decreto 1367/2007, de adoptar medidas correctoras cuando los indicadores L_{den} y L_{night} superan los valores límite en los receptores expuestos. La pantalla acústica es, en este contexto, la medida correctora de mayor eficacia técnica y de más amplia aplicación en el entorno de las infraestructuras ferroviarias españolas, constituyendo el objeto central del presente trabajo.

5.3 Percepción humana del sonido

La necesidad de implantar pantallas acústicas en el entorno de las infraestructuras ferroviarias no es una decisión arbitraria sino la respuesta técnica y normativa a un problema físico concreto. Para comprender esta problemática, resulta necesario conocer los fundamentos de la percepción auditiva humana y las características acústicas del tráfico ferroviario de alta velocidad.

5.3.1 Percepción humana auditiva y escala dB(A)

El sistema auditivo humano es capaz de percibir sonidos en un rango de frecuencias comprendido aproximadamente entre 20 Hz y 20.000 Hz, con una sensibilidad máxima en la banda de 1.000 a 4.000 Hz, que corresponde a las frecuencias del habla humana. Para manejar con comodidad esta escala, la acústica emplea el decibelio (dB), una unidad logarítmica que comprime dicho rango en valores entre 0 y aproximadamente 140 dB (*Fletcher_munson*, n.d.; Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-a).

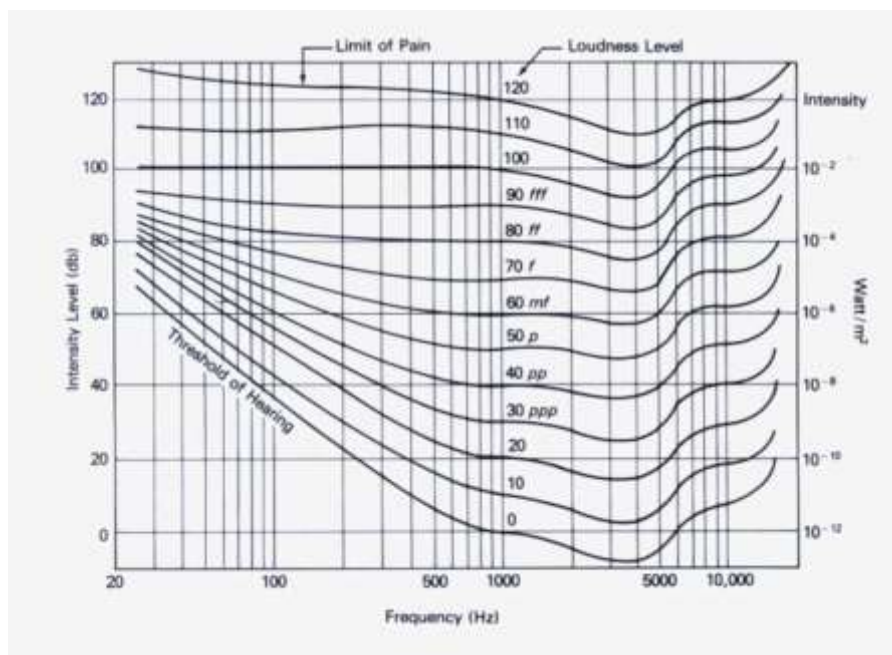


Figura 6. Curvas de Fletcher y Munson (1933). Fuente: (*Fletcher_munson*, n.d.)

Sin embargo, la sensibilidad del oído no es uniforme en todo el espectro de frecuencias, los sonidos graves y muy agudos se perciben subjetivamente como menos intensos que los de

frecuencia media, incluso con la misma presión sonora objetiva. Para reflejar esta característica fisiológica en las mediciones acústicas se emplea la ponderación frecuencial A, que ajusta el nivel medido instrumentalmente a la respuesta real del oído humano. El resultado se expresa en dB(A) y es el indicador de referencia universal en acústica ambiental, en la normativa de ruido y en los estudios de impacto acústico de infraestructuras de transporte (BOE-A-2007-18397-Consolidado, n.d.-a; UNEISO199612020, n.d.).

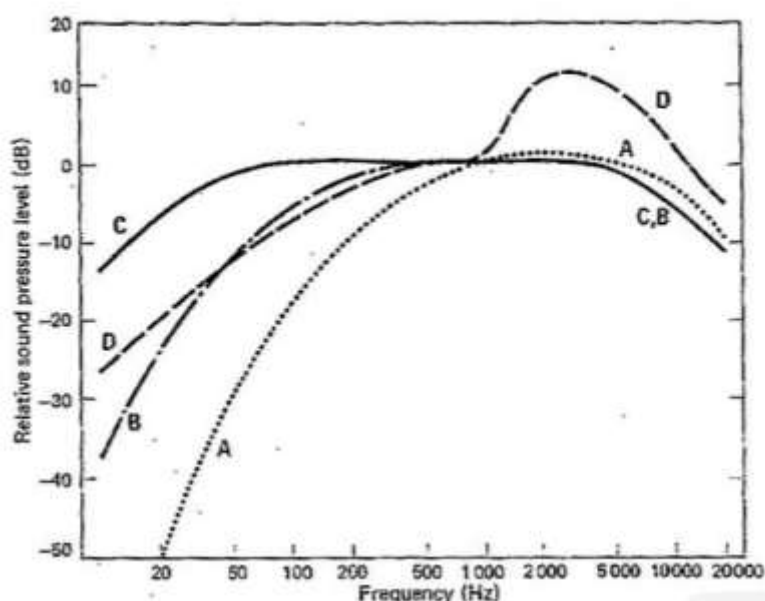


Figura 7. Curvas de ponderación espectral. Fuente: (Patrocinante & Arenas, 2004)

Desde el punto de vista perceptivo, conviene tener presentes algunas propiedades fundamentales de la escala logarítmica con implicaciones directas en la evaluación del ruido ferroviario. Un incremento de 3 dB(A) equivale aproximadamente a duplicar la energía sonora, mientras que un incremento de 10 dB(A) se percibe subjetivamente como el doble de ruidoso. Por otro lado, la distancia al foco sonoro reduce el nivel en aproximadamente 6 dB(A) cada vez que se duplica, en campo libre y para fuentes puntuales, o en torno a 3 dB(A) por duplicación de distancia para fuentes lineales como una línea ferroviaria. Esta última propiedad es especialmente relevante para dimensionar la posición y altura de las pantallas acústicas (Harris, 1991; Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-a).

5.4 Pantallas acústicas

Las pantallas acústicas, denominadas también barreras antiruido o barreras acústicas, constituyen la medida correctora de mayor implantación y eficacia técnica documentada para la reducción del ruido ambiental generado por infraestructuras de transporte. Su principio de actuación se encuadra en la fase de transmisión del ruido: actúan sobre el camino de propagación del sonido entre la fuente emisora y el receptor, sin modificar la emisión en origen ni las condiciones de recepción. En el ámbito ferroviario, constituyen la respuesta técnica habitual frente a las superaciones de los valores límite de inmisión establecidos en el RD 1367/2007, detectadas a través de los Mapas Estratégicos de Ruido elaborados por ADIF conforme a lo exigido por la Directiva 2002/49/CE.

5.4.1 Interacción entre la onda sonora y la pantalla acústica

Cuando una fuente sonora emite energía acústica en campo libre, las ondas se propagan en todas las direcciones alcanzando el receptor sin más atenuación que la debida a la distancia y a la absorción del aire. Al interponerse una pantalla acústica entre la fuente y el receptor, la trayectoria directa del sonido queda interrumpida y la energía incidente experimenta simultáneamente cuatro mecanismos de interacción (Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-b):

- Reflexión: una fracción de la energía incidente es devuelta por la superficie de la pantalla hacia el lado de la fuente. Su magnitud depende de la impedancia acústica del material y de su densidad superficial. Conforme a la Ley de Masas, al duplicarse la masa superficial o la frecuencia de la onda incidente, el aislamiento por reflexión aumenta en 6 dB. Por esta razón, la normativa establece una densidad superficial mínima de 20 kg/m² para los paneles de pantallas acústicas convencionales.
- Transmisión: la fracción de energía que consigue atravesar el panel de la pantalla y alcanzar el receptor en el lado protegido. Su cuantificación se realiza mediante el índice de reducción sonora (Rw) del material, determinado en laboratorio según la norma UNE-EN 1793-2. La minimización de la energía transmitida es el objetivo principal del parámetro de aislamiento acústico DLR.
- Absorción: la fracción de energía que el material de la pantalla disipa en forma de calor por fricción interna, sin reflexión ni transmisión. Los materiales absorbentes (lana mineral, fibra de vidrio, hormigón poroso) son especialmente relevantes en configuraciones de pantalla a doble cara, donde la reflexión cruzada entre dos pantallas enfrentadas podría incrementar los niveles sonoros en la zona de vía.
- Difracción: el mecanismo más determinante para la eficacia real de la pantalla. Cuando la onda sonora alcanza el borde superior de la barrera, cada punto de dicho borde actúa como una nueva fuente sonora puntual que irradia energía hacia la zona de sombra, de acuerdo con el principio de Huygens. Esta energía difractada reduce la capacidad de atenuación de la pantalla en la zona protegida, constituyendo el principal límite físico de su rendimiento.

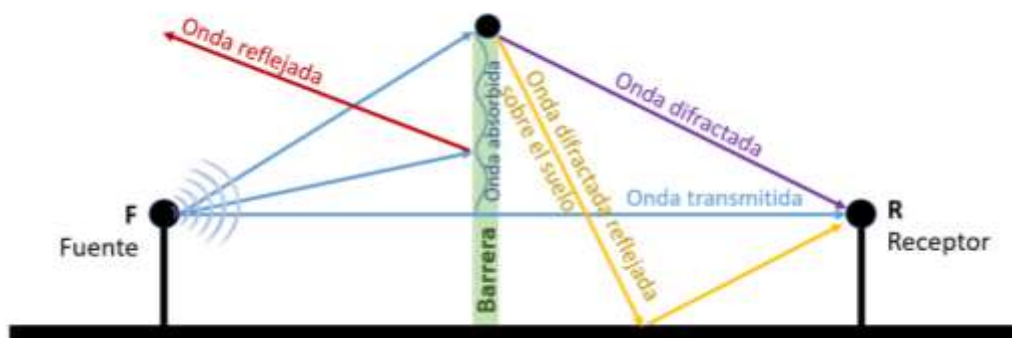


Figura 8. Comportamiento acústico del sonido cuando se coloca una pantalla acústica. Fuente: (Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-b):

La difracción tiene una dependencia inversa con la frecuencia: a bajas frecuencias, donde la longitud de onda es comparable o superior a las dimensiones de la pantalla, la onda tiende a rodearla con facilidad, reduciendo drásticamente la eficacia del sistema. A altas frecuencias, en cambio, la longitud de onda es pequeña respecto a la altura de la pantalla y la zona de sombra acústica resulta bien definida y efectiva. Esta limitación a bajas frecuencias es especialmente relevante en el contexto ferroviario, donde el ruido de rodadura genera componentes espectrales significativas en el rango de 100 a 400 Hz que son difícilmente atenuadas por pantallas de altura moderada (D. J. Thompson, 2009).

Para el diseño adecuado de pantallas acústicas es fundamental tomar en cuenta dos factores: el aislamiento acústico (cantidad de energía que se transmite al receptor) y el coeficiente de absorción (cantidad de energía reflejada en dirección a la fuente) por lo que es imprescindible tener en cuenta dos factores: los parámetros acústicos para el diseño (tipo de material, localización, dimensiones, geometría de la barrera, entre otros) y los no acústicos referidos a las características estéticas, configuración estructural, mantenimiento, peso, etc. (Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-b).

5.4.2 Zona de sombra acústica y pérdida por inserción (IL)

Se denomina zona de sombra acústica al espacio situado detrás de la pantalla en el que el sonido no llega de forma directa desde la fuente, quedando protegido de la componente de transmisión directa. La extensión y la profundidad de esta zona dependen de la geometría del sistema (altura de la pantalla, distancia a la fuente y al receptor, altura de la fuente y del punto de recepción) y de la frecuencia de la onda sonora. A mayor aumento de frecuencia se produce un aumento de la zona de sombra, con lo cual se concluye que a altas frecuencias se produce una mayor atenuación.

El parámetro que cuantifica la eficacia global de una pantalla acústica instalada en condiciones reales es el Insertion Loss (IL) o pérdida por inserción, definido como la diferencia en decibelios de la presión sonora registrado en un punto receptor antes y después de la instalación de la barrera, en igualdad de condiciones de emisión:

$$IL(dB) = LP_{después} - LP_{antes} \rightarrow IL = 20 * \log \frac{|P_i|}{|P_d|} (dB)$$

Donde:

P_i : presión sonora en el receptor con pantalla acústica

P_d : presión sonora en el receptor sin pantalla acústica

El IL integra en un único valor los efectos combinados de reflexión, transmisión, absorción y difracción, incluyendo las condiciones reales de la geometría del emplazamiento, la naturaleza del terreno y el espectro de la fuente. Su determinación en campo se realiza conforme a la norma ISO 10847, que establece los procedimientos de medición in situ para la evaluación del rendimiento de barreras acústicas en condiciones de uso real.

El límite teórico máximo de atenuación alcanzable por una pantalla acústica clásica fue establecido por Maekawa en 1965, quien a partir de datos experimentales de difracción

sonora en campo libre determinó que, considerando únicamente la difracción por el borde superior como mecanismo dominante de pérdida de rendimiento, el valor máximo de IL obtenible se sitúa en torno a 25 dB.

5.4.3 Parámetros acústicos y no acústicos de diseño

El diseño de una pantalla acústica exige considerar simultáneamente un conjunto de parámetros de naturaleza acústica y no acústica, cuya correcta ponderación determina la eficacia del sistema en servicio y su viabilidad constructiva en el emplazamiento concreto. La *Tabla 1* recoge los principales parámetros de diseño, su naturaleza, la norma de referencia aplicable y su relevancia específica.

Tabla 1. Parámetros acústicos y no acústicos de diseño de pantallas acústicas. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Acústico/No acústico	Relevancia en el diseño
Aislamiento acústico (DLR)	Acústico	Capacidad del panel para impedir que la energía sonora lo atravesase en dirección al receptor. Se expresa en dB. A mayor DLR, menor energía transmitida.
Absorción acústica (DL _a)	Acústico	Parte de la energía incidente que el material de la pantalla disipa en forma de calor, evitando su reflexión hacia la fuente o hacia otros receptores.
Insertion Loss (IL)	Acústico	Indicador de eficacia global de la pantalla instalada. Diferencia en dB(A) entre el nivel de presión sonora en un punto receptor con y sin pantalla.
Comportamiento mecánico	No acústico	Resistencia estructural frente a cargas estáticas y dinámicas: viento, sobrepresiones por paso de trenes, impactos accidentales.
Durabilidad	No acústico	Comportamiento del material ante el envejecimiento y resistencia a los agentes atmosféricos, a la contaminación química.
Integración paisajística	No acústico	Condicionante estético y compatibilidad visual con el entorno.

Entre los parámetros geométricos de diseño, la altura de la pantalla es el factor de mayor influencia sobre el IL resultante: a mayor altura, mayor ángulo de difracción en el borde superior y mayor atenuación en la zona protegida. Sin embargo, el incremento de altura tiene rendimientos decrecientes, cada metro adicional aporta menos mejora acústica que el anterior y conlleva un incremento proporcional de las cargas sobre la cimentación, en particular del momento flector en el base generado por la acción del viento. En entorno ferroviario de alta velocidad, a este momento se suman las sobrepresiones dinámicas inducidas por el paso de los trenes, que pueden ser determinantes en el dimensionamiento estructural de la pantalla y, por extensión, de su sistema de cimentación (UNE-EN 16272-5:2024, n.d.).

La posición de la pantalla respecto a la fuente y al receptor es igualmente determinante: la pantalla es más eficaz cuanto más próxima se sitúa a la fuente de ruido. Esta condición orienta naturalmente el emplazamiento de las pantallas ferroviarias lo más cerca posible de la plataforma, lo que a su vez introduce los condicionantes de proximidad a la vía regulados por las instrucciones de seguridad de ADIF y que, como se analiza en el presente TFM, pueden entrar en conflicto con las soluciones de cimentación previstas en proyecto cuando existen elementos preexistentes en el subsuelo o en la geometría del entorno inmediato.

5.5 Normativa (Marco normativo aplicable)

La implantación de pantallas acústicas en infraestructuras ferroviarias de alta velocidad no se rige por un único cuerpo normativo cerrado y específico, sino por un conjunto heterogéneo de normativa de naturaleza ferroviaria, técnica, ambiental y estructural que deben ser aplicadas. Las pantallas acústicas esta sujetas, de manera transversal, a dos ámbitos normativos, son simultáneamente un producto de construcción sujeto a evaluación de prestaciones mediante marcado CE, una estructura que debe ser dimensionada y verificada conforme a la normativa estructural y geotécnica vigente, y un elemento de infraestructura ferroviaria cuya implantación está condicionada por las especificaciones técnicas del administrador de la red. *La Tabla 2* muestra los cuatro bloques normativos de aplicación, los instrumentos principales que los integran y la función específica que cada uno cumple en el proceso de diseño, fabricación e implantación(Metalesa, n.d.).

Tabla 2. Normativa de aplicación en la implantación de pantalla acústicas ferroviarias. Fuente: elaboración propia.

Bloque normativo	Normativa principal	Función en el proceso de implantación
Normativa de protección frente al ruido (rango legal)	Ley 7/2002 RD 104/2006 Ley 37/2003 del Ruido RD 1367/2007 RD 1513/2005 Directiva 2002/49/CE	Establece la necesidad de actuación: indica los valores límite de inmisión, los objetivos de calidad acústica y la obligación de adoptar medidas correctoras cuando se superan los umbrales.
Normativa de marcado CE	UNE-EN 1793 (parte 1, 2, 3) UNE-EN 1794 (parte 1, 2) UNE-EN 14388 UNE-EN 14389	Define las prestaciones técnicas del sistema: métodos de ensayo acústico (absorción, aislamiento), requisitos mecánicos y de seguridad, sistema de evaluación de conformidad CE y criterios de durabilidad a largo plazo.
Normativa técnica ferroviaria	ET 03.305.010.5 (ADIF) UNE-EN 16272 (parte 1, 7) UNE-EN 16727 NAG 4001 IGP-2011	Establece las condiciones de implantación, accesibilidad para su posterior mantenimiento e integración en las estructuras existentes.
Normativa estructural y geotécnica	Eurocódigo 2 Eurocódigo 3 Eurocódigo 7 Código Estructural	Garantiza la viabilidad constructiva y su resistencia.

5.5.1 Normativa ambiental y de protección frente al ruido

El primer bloque normativo determina la necesidad de actuación, no la forma. Establece el fundamento jurídico que justifica la necesidad de adoptar medidas correctoras frente al ruido ferroviario.

La Comunitat Valenciana cuenta con uno de los primeros marcos autonómicos específicos en materia de contaminación acústica anticipándose a la Ley estatal del Ruido 37/2003. La Ley 7/2002, de 3 de diciembre, de la Generalitat Valenciana, de Protección Contra la Contaminación Acústica, cuyo desarrollo reglamentario se articuló a través de varios decretos, siendo el más relevante en el contexto del presente trabajo el Decreto 104/2006, de 14 de julio, del Consell, de planificación y gestión en materia de contaminación acústica, cuyo objeto es la regulación de los distintos instrumentos de planificación y gestión acústica y el establecimiento de procedimientos de evaluación de emisores acústicos en todo el territorio de la Comunitat Valenciana. Esta Ley, complementa así el marco estatal del RD 1367/2007, la Directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental y el Real Decreto 1513/2005 con las especificidades propias del territorio autonómico (*BOE-A-2003-613-Consolidado*, n.d.).

A su vez, cuando los Mapas Estratégicos de Ruido elaborados por ADIF detectan superaciones de los valores límite de inmisión, L_d de 60 dB(A) y L_n de 50 dB(A) en sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial según el RD 1367/2007, se deben contemplar medidas correctoras cuya implantación es de obligado cumplimiento (*BOE-A-2007-18397-Consolidado*, n.d.-b).

Tabla 3. Valores límite de inmisión de ruido aplicables a nuevas infraestructuras viarias, ferroviarias y aeroportuarias. Anexo III.
Fuente: RD 1367/2007.[16]

Tipo de área acústica		Índices de ruido		
		L _d	L _e	L _n
e	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera una especial protección contra la contaminación acústica.	55	55	45
a	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.	60	60	50
d	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en c.	65	65	55
c	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.	68	68	58
b	Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.	70	70	60

5.5.2 Normativa de producto marcado CE

Las pantallas acústicas se clasifican como productos de construcción dentro del ámbito del Reglamento (UE) de Productos de Construcción, por lo que su comercialización requiere la evaluación mediante el sistema de marcado CE. Este segundo bloque normativo define qué debe cumplir técnicamente la pantalla como producto, con independencia de dónde y cómo se implante. La serie UNE-EN 1793 regula los métodos de ensayo para la determinación del comportamiento acústico de los dispositivos reductores de ruido: absorción sonora (parte 1), aislamiento al ruido aéreo (parte 2) y el espectro de ruido de referencia para la clasificación (parte 3). La serie UNE-EN 1794 establece los requisitos no acústicos para los dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras: comportamiento mecánico y estabilidad frente a acciones exteriores (parte 1), seguridad y reacción al fuego (parte 2). La UNE-EN 14388 regula el sistema de evaluación de la conformidad para el marcado CE, mientras que la UNE-EN 14389 establece los métodos de evaluación del comportamiento a largo plazo y la durabilidad del sistema en condiciones de servicio. Todas ellas fueron desarrolladas para el ámbito viario, no obstante, sirven de base en el ámbito ferroviario en ausencia de un sistema de marcado CE específico.

5.5.3 Normativa técnica ferroviaria

El tercer bloque normativo es el que introduce los condicionantes más restrictivos desde el punto de vista constructivo, al definir las condiciones en que la pantalla puede ser físicamente implantada en el dominio ferroviario. La Especificación Técnica ET 03.305.010.5 de ADIF(*CatalogoNormativaTecnica*, n.d.), relativa a pantallas acústicas en infraestructura ferroviaria, establece los requisitos geométricos de implantación, distancias mínimas al eje de vía, alturas máximas según el tipo de pantalla y la posición respecto a la plataforma, las condiciones de seguridad durante la explotación y los criterios de accesibilidad para labores de mantenimiento. Las Instrucciones Generales de Proyectos de Plataforma (IGP-2011) y la Norma Adif General NAG 4001 sobre gestión de la contaminación acústica complementan este marco con las exigencias propias de cada fase del proceso, estudios acústicos previos, definición de soluciones, modelización de la eficacia, junto con los condicionantes de implantación en líneas en servicio (Disposición Adicional Única, n.d.; General Carreteras Secretaría General De Transporte Terrestre Gobierno De España Ministerio De Transportes Y Movilidad Sostenible, n.d.).

Para el comportamiento acústico y no acústico específico en entorno ferroviario, la UNE-EN 16272 establece los métodos de ensayo y los criterios de evaluación de barreras

acústicas adaptados a las condiciones propias de la vía, espectro de ruido ferroviario normalizado, cargas de viento y dinámicas en entorno de alta velocidad, y la UNE-EN 16727 en todo lo referente al rendimiento no acústico (General Carreteras Secretaría General De Transporte Terrestre Gobierno De España Ministerio De Transportes Y Movilidad Sostenible, n.d.).

5.5.4 Normativa estructural y geotécnica

El cuarto bloque normativo regula el comportamiento resistente del sistema en su conjunto, incluyendo tanto la estructura portante de la pantalla como su sistema de cimentación. El Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992-1-1) (Nacional, n.d.) es de aplicación al dimensionamiento de todos los elementos de hormigón armado, mientras que el Eurocódigo 3 (UNE-EN 1993-1-1) (AN_UNE-EN 1993-1-1, n.d.) rige el cálculo de los perfiles metálicos portantes de la pantalla y de las placas de anclaje a la cimentación. El Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997-1) (AN_UNE-EN 1997-1, n.d.) establece los procedimientos de verificación geotécnica aplicables a cualquier tipología de cimentación: estados límite últimos de hundimiento, deslizamiento y vuelco, y estados límite de servicio relativos a asentamientos y deformaciones. En el ámbito estatal, el Código Estructural aprobado por Real Decreto 470/2021 constituye el marco reglamentario de referencia para el diseño, ejecución y control de estructuras de hormigón y acero, incluyendo todos los elementos de cimentación (Núm, 2021).

5.5.5 Integración normativa en el caso de estudio

La particularidad de este marco normativo no reside en la complejidad individual de cada uno de sus bloques, sino en la necesidad de su aplicación simultánea y coordinada. La normativa ambiental determina la necesidad de actuación; la normativa de producto define las prestaciones que debe cumplir la pantalla; la normativa ferroviaria condiciona dónde y cómo puede ejecutarse físicamente; y la normativa estructural garantiza la viabilidad resistente de la solución adoptada.

Esta interacción entre bloques normativos es precisamente la que origina la problemática analizada en el presente TFM. La solución de micropilotes con encepado prevista en el proyecto de referencia es estructuralmente correcta conforme al Eurocódigo 7 y al Código Estructural y el producto pantalla cumple con los requisitos de la normativa CE. Sin embargo, la interferencia geométrica con el muro de contención colindante y las restricciones de espacio en el callejón generan incompatibilidades de ejecución en ese tramo concreto. Esta situación pone de manifiesto que, en infraestructuras lineales como las ferroviarias, la viabilidad constructiva requiere un análisis integrado de todos los niveles normativos desde la fase de proyecto, antes de que las incompatibilidades se manifiesten en obra.

5.6 Tipología de pantallas

Las pantallas acústicas han experimentado un notable desarrollo tecnológico en las últimas décadas, dando lugar a una amplia variedad de soluciones que difieren en sus materiales constitutivos, comportamiento acústico predominante, sistema constructivo y condiciones de aplicación. En el ámbito ferroviario, la selección de la tipología más adecuada para cada tramo no responde únicamente a criterios acústicos, sino a la combinación de

condicionantes técnicos, constructivos, paisajísticos y de explotación que caracterizan el entorno específico de la infraestructura. ADIF, como administrador de la red ferroviaria de interés general, establece en sus especificaciones técnicas la obligación de variar el diseño de las pantallas entre tramos con el fin de evitar la percepción de barrera continua y uniforme a lo largo del corredor ferroviario.

Desde el punto de vista acústico, las pantallas pueden clasificarse en función de su comportamiento predominante frente a la energía sonora incidente: las pantallas reflectantes devuelven la mayor parte de la energía hacia el lado de la fuente, mientras que las absorbentes disipan una fracción significativa de dicha energía en el propio material, reduciendo las reflexiones hacia la vía o hacia otros receptores. Las pantallas mixtas combinan ambos comportamientos, generalmente disponiendo una capa absorbente en la cara expuesta al ruido ferroviario y una cara reflectante o neutra en el lado opuesto. El material que compone la pantalla repercute en el aislamiento acústico de ésta, al mismo tiempo que la estructura de la superficie de la pantalla influye en la atenuación sonora, ya que el material limita la reflexión del sonido.

5.6.1 Pantallas de hormigón

Las pantallas de hormigón constituyen la solución más extendida en infraestructuras ferroviarias de alta velocidad, siendo la tipología de referencia en la red ADIF por su elevada durabilidad, resistencia mecánica y bajo mantenimiento a lo largo de una vida útil superior a 25 años. Se ejecutan habitualmente mediante paneles prefabricados modulares que se ensamblan entre perfiles verticales de acero anclados a la cimentación, lo que permite una instalación relativamente rápida. Los paneles pueden ser de hormigón simple con tratamientos superficiales absorbentes o incorporar una doble capa, una estructura portante de hormigón armado y una capa exterior de hormigón poroso fonoabsorbente, cuya textura superficial, áridos de machaqueo de distintas granulometrías, relieve en forma de difusor, mejora el coeficiente de absorción y evita el efecto reflectante de una superficie lisa (Alegre, n.d.). Además, en sus extremos, cuenta con una banda maciza de hormigón que permite el anclaje en cualquier viga de perfil estándar.



Figura 9. Pantalla acústica de hormigón. Fuente: elaboración propia.

Su principal limitación es el peso elevado de los paneles, que puede condicionar los medios de elevación necesarios en obra y las cargas transmitidas a la cimentación.

5.6.2 Pantalla metálica

Las pantallas metálicas son la segunda tipología más frecuente en el entorno ferroviario y, junto con las de hormigón, constituyen la solución estándar en líneas de alta velocidad. Estas pueden ser de carácter reflectante, compuesta con láminas de acero o aluminio o de carácter absorbente, formadas por paneles de tipo sándwich: dos láminas de acero galvanizado o aluminio, la cara expuesta al ruido generalmente perforada, con un núcleo de lana mineral o fibra de vidrio que aporta las propiedades absorbentes. La chapa perforada permite que la onda sonora penetre en el núcleo absorbente, donde se disipa por fricción interna, mientras que la lámina posterior ciega actúa como barrera de aislamiento frente a la energía transmitida. Su principal ventaja respecto al hormigón es la ligereza, con la reducción de cargas sobre la cimentación y un aumento de ligereza en montaje, que permite reducir los tiempos de instalación en obra. Para garantizar su durabilidad en ambientes agresivos como el entorno ferroviario se aplican tratamientos superficiales de pintura poliéster o PVDF, añadiendo en algunos casos un acabado anticorrosión y tratamientos antigrafiti (Insametal, n.d.).



Figura 10. Pantalla metálica. Fuente: elaboración propia.

5.6.3 Pantalla transparente

Las pantallas transparentes están fabricadas con láminas de polimetilmetacrilato (PMMA), policarbonato o vidrio de seguridad, de espesores habituales entre 15 y 20 mm fabricadas mediante extrusión, que les confieren la masa superficial necesaria para alcanzar los niveles de aislamiento acústico requeridos. Su comportamiento acústico es esencialmente reflectante y su capacidad de absorción muy reducida hacen que su aplicación en entornos con pantallas enfrentadas a ambos lados de la vía requiere un análisis cuidadoso del efecto de las reflexiones cruzadas. Su principal ventaja es la mínima interferencia visual con el entorno: permiten mantener la entrada de luz natural en las zonas colindantes y reducir el efecto de barrera en entornos urbanos densos, viaductos y zonas residenciales. Como contrapartida, presentan mayor susceptibilidad al rayado y la suciedad, lo que incrementa las necesidades de mantenimiento. Además, pueden suponer un riesgo para la fauna ya que no perciben las superficies transparentes como barrera física.

En aplicaciones ferroviarias suelen incorporar tratamiento antigrafiti y, en ocasiones, señalización para la visibilidad de las aves (Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, n.d.-b).



Figura 11. Pantalla transparente. Fuente:(PANTALLAS ACÚSTICAS, n.d.)

5.6.4 Pantalla mixta

Las pantallas mixtas combinan en un mismo módulo de altura dos materiales o tipologías distintas. De manera habitual una parte inferior opaca y absorbente, de hormigón o metálica y una parte superior transparente de PMMA o policarbonato.



Figura 12. Pantallas acústicas mixtas (metálicas + metacrilato). Fuente: elaboración propia.

Esta configuración responde a la necesidad de compatibilizar una eficacia acústica elevada, aportada por la parte inferior, que intercepta las componentes para una base sólida y resistencia del ruido ferroviario a baja altura, con la integración paisajística y la reducción del impacto visual, garantizada por la parte transparente superior. Son especialmente frecuentes en entornos urbanos consolidados, en tramos sobre viaductos y en zonas residenciales donde los vecinos han condicionado la aprobación del proyecto a la preservación de la luminosidad y las vistas.

5.6.5 Pantalla de madera

Las pantallas de madera están constituidas por paneles modulares opacos de madera laminada o madera nórdica tratada, con un marco en forma de caja en cuyo interior se aloja una capa fonoabsorbente de material fibroso protegida por una malla antipolvo de polietileno. Su comportamiento acústico es óptimo gracias al cerramiento hermético de las juntas y puede ser tanto absorbente como reflectante en función del acabado de la cara

expuesta al ruido. La principal virtud de esta tipología es su integración natural en el paisaje, especialmente en entornos rurales o forestales donde una pantalla de hormigón o metálica resultaría visualmente disonante. Sin embargo, su uso en infraestructuras ferroviarias de alta velocidad es limitado, ya que la madera requiere tratamientos específicos de protección frente a la intemperie, la humedad y los agentes biológicos para garantizar una durabilidad comparable a la de las soluciones de hormigón o metálicas, y su resistencia mecánica ante las sobrepresiones dinámicas del tráfico de alta velocidad debe verificarse con especial atención (PANTALLAS ACÚSTICAS, n.d.).



Figura 13. Pantallas acústicas de madera. Fuente: (PANTALLAS ACÚSTICAS, n.d.).

5.6.6 Minibarreras de baja altura

Las minibarreras de baja altura constituyen una tipología específica del entorno ferroviario que no tiene equivalente directo en el ámbito viario. Se trata de sistemas modulares de entre 0,5 y 2,0 m de altura instalados muy próximos al carril generalmente a menos de 2 m del eje de vía. Se sitúan sobre la banqueta de balasto o anclados directamente a la plataforma, sin necesidad de cimentación específica. Su principio de funcionamiento difiere del de las pantallas convencionales, en lugar de crear una zona de sombra acústica interceptando la propagación del sonido a distancia, actúan directamente sobre el ruido de rodadura en origen, atenuando la emisión antes de que se propague al campo libre. Fabricadas habitualmente en aluminio o acero galvanizado con núcleo absorbente de lana mineral, pueden alcanzar atenuaciones de entre 5 y 10 dB(A) en el rango de frecuencias dominante del ruido de rodadura. Su eficacia es, sin embargo, significativamente menor frente al ruido aerodinámico predominante en circulaciones por encima de 300 km/h, lo que limita su aplicación en líneas de alta velocidad a su uso como complemento de otras medidas o en tramos donde las restricciones de espacio o de cimentación impiden la instalación de pantallas convencionales (D. J. Thompson, 2009).



Figura 14. Mini-barreras acústicas. Fuente: Acustrain.

5.6.7 Pantallas vegetales

Las pantallas vegetales son sistemas que integran una estructura portante, habitualmente metálica u hormigón, con un manto vegetal natural, plantas trepadoras, arbustos, o artificial.



Figura 15. Pantallas acústicas con cubierta vegetal. Fuente: pantallas acústicas vegetalizable Panacor.

Desde el punto de vista acústico, la vegetación aporta una absorción sonora modesta, siendo la estructura portante subyacente la que proporciona el aislamiento principal. Su valor diferencial reside en las prestaciones ambientales que añaden respecto a las pantallas convencionales como el aumento del aislamiento térmico, retención de partículas en suspensión (polvo), absorción de CO₂ y mejora estética del entorno. Como contrapartida, presentan el mayor requerimiento de mantenimiento de todas las tipologías, riego, poda, reposición de marras y su eficacia acústica es inferior a la de las pantallas opacas convencionales. Constituyen una alternativa sostenible y ecológica perfecta para autopistas, residenciales y áreas verdes cercanas al tráfico, aunque en un contexto ferroviario su uso queda generalmente circunscrito a tramos urbanos donde el componente paisajístico y ambiental es prioritario.

5.6.8 Absorbedores de carril

Los absorbentes de carril no son pantallas acústicas en sentido estricto, sino dispositivos de control del ruido en la fuente. Se fijan al alma del carril *Figura 16*, la parte vertical del perfil, a intervalos regulares de una o dos traviesas, añadiendo masa y amortiguamiento al carril mediante elementos elastoméricos de caucho o poliuretano.



Figura 16. Absorbedores de carril. Fuente:(Obras Urbanas, n.d.)

El contacto rueda-carril genera vibraciones en el raíl que se propagan longitudinalmente y radian energía sonora; los absorbentes reducen la amplitud de estas vibraciones y, con ello, la emisión acústica en el rango de frecuencias medias-altas, entre 500 y 2.000 Hz, donde se concentra el espectro del ruido de rodadura. La reducción alcanzable es de entre 2 y 6 dB(A), significativamente menor que la de las pantallas convencionales, pero su instalación no requiere cimentación, no genera impacto visual y es plenamente compatible con el gálibo ferroviario y con las operaciones habituales de mantenimiento de vía. Se emplean con mayor frecuencia como medida complementaria a las pantallas en tramos con circulación convencional o donde la atenuación requerida no puede alcanzarse exclusivamente con barreras, o como alternativa en zonas con restricciones severas de espacio (Acoustics-Railway Applications-Measurement of Noise Emitted by Railbound Vehicles INTERNATIONAL STANDARD ISO 3095(E) li COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT, 2013), (D. Thompson, 2009b).

5.7 Tipología de cimentación

Las pantallas acústicas ferroviarias son estructuras esbeltas de carácter lineal cuya selección de la tipología más adecuada resulta determinante para garantizar la estabilidad estructural frente a acciones horizontales, tales como el viento, la presión acústica o las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario a lo largo de la vida útil, así como para asegurar la viabilidad constructiva en el entorno específico de la infraestructura ferroviaria, donde las restricciones operativas pueden ser más condicionantes que los propios criterios geotécnicos o estructurales.

Criterios de selección

La elección de la tipología de cimentación en entorno ferroviario debe responder a la evaluación simultánea de condicionantes geotécnicos, estructurales y constructivos. Entre los factores principales que determinan esta selección cabe destacar:

- Naturaleza y capacidad portante del terreno: determina si la solución debe ser superficial o profunda y la profundidad de empotramiento necesaria.
- Altura de la pantalla y acciones horizontales: a mayor altura, mayores momentos de vuelco en la base y mayores exigencias resistentes a la cimentación conforme

al Eurocódigo 1 parte 1-4 y a la IAPF-07.

- Espacio disponible y estructuras colindantes: la presencia de muros, cimentaciones existentes o servicios enterrados puede hacer inviable la ejecución de excavaciones o perforaciones en determinadas posiciones.
- Accesibilidad de maquinaria: las restricciones de gálibo en entorno ferroviario en servicio pueden impedir el uso de equipos de perforación convencionales de gran tamaño, así como los accesos al terreno colindante desde el que se pueda trabajar.
- Afección a la explotación: en el caso de que se ejecute en zona de influencia de la vía deben ejecutarse en ventanas de mantenimiento autorizadas, lo que condiciona los rendimientos y la programación de los trabajos.

De lo anterior se desprende que, tal como señalan las IGP-2011 de ADIF, la selección de la cimentación no puede basarse exclusivamente en criterios resistentes: una solución técnicamente válida puede resultar inviable en la práctica por incompatibilidades geométricas o constructivas no detectadas en fase de proyecto, como ocurre en el caso analizado en el presente TFM.

5.7.1 Cimentación superficial. Zapata corrida

La zapata corrida es la solución superficial más habitual en pantallas de altura moderada sobre terrenos competentes, además de ser una de las más sencillas de ejecutar ya que no requiere maquinaria especializada ni procesos constructivos complejos. Consiste en un elemento continuo de hormigón armado, que permite una distribución de cargas óptima, dispuesto bajo la alineación de la pantalla que recibe los perfiles metálicos mediante placas de anclaje y distribuye las cargas al terreno de apoyo. Su dimensionamiento verifica los estados límite de hundimiento, deslizamiento y asentos conforme al Eurocódigo 7.

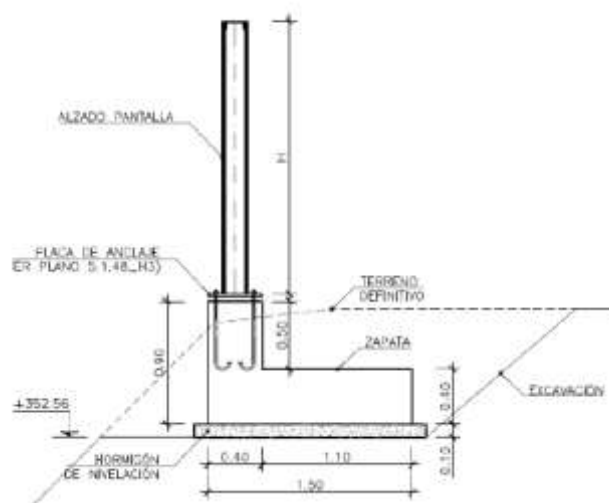


Figura 17. Cimentación directa mediante zapata corrida. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Queda condicionada por la necesidad de espacio para la excavación y por la ausencia de estructuras o servicios que interfieran con ella.

5.7.2 Cimentación profunda. Pilotes

Los pilotes son la solución de cimentación profunda de mayor capacidad portante y mejor comportamiento frente a esfuerzos horizontales y momentos de vuelco, transfiriendo las cargas a estratos resistentes a mayor profundidad por punta o por fuste. Son especialmente frecuentes en tramos con rellenos ferroviarios profundos o terrenos blandos en las capas superficiales donde no existe la resistencia suficiente para soportar las cargas transmitidas por la pantalla. Además, minimiza la afección a la plataforma existente y permite adaptarse a limitaciones de espacio. No obstante, su ejecución requiere maquinaria de gran tamaño que suele requerir mayores niveles de seguridad o ser incompatible con las restricciones de gálibo del entorno ferroviario en servicio, y los procesos de perforación o hincas pueden generar vibraciones que afecten a infraestructuras colindantes.

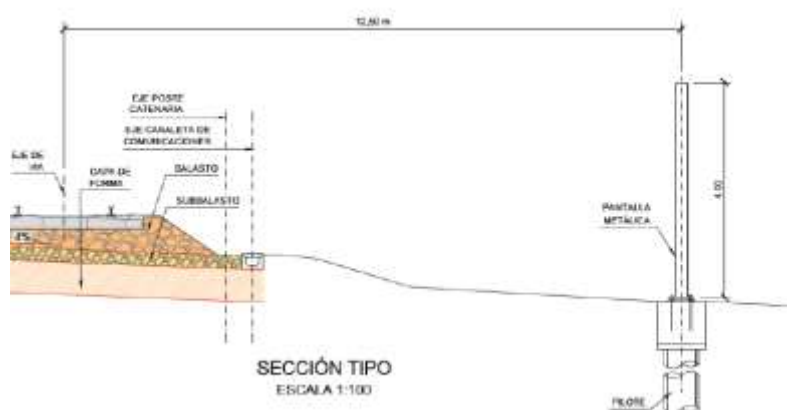


Figura 18. Plano de referencia de cimentación con pilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Su ejecución puede realizarse tanto desde el exterior de la vía como desde la propia plataforma ferroviaria, empleando maquinaria específica en función de las condiciones de acceso.

5.7.3 Cimentación profunda. Micropilotes

Los micropilotes son elementos de cimentación profunda de pequeño diámetro, habitualmente entre 100 y 300 mm, ejecutados mediante perforación e inyección de lechada de cemento a presión, con armadura interior de barra o tubo de acero. Su principal ventaja frente a los pilotes convencionales es la posibilidad de ejecutarlos con maquinaria de dimensiones reducidas y bajo perfil, lo que los convierte en la solución profunda más adaptable a entornos con limitaciones de espacio y accesibilidad. Presentan buen comportamiento frente a cargas combinadas de compresión, tracción y esfuerzos horizontales, siendo adecuados para pantallas de altura significativa. Sin embargo, la presencia de cimentaciones existentes o estructuras colindantes en el subsuelo puede hacer inviable la perforación en determinadas posiciones, y la necesidad de encepado puede incrementar las dimensiones totales de la solución.

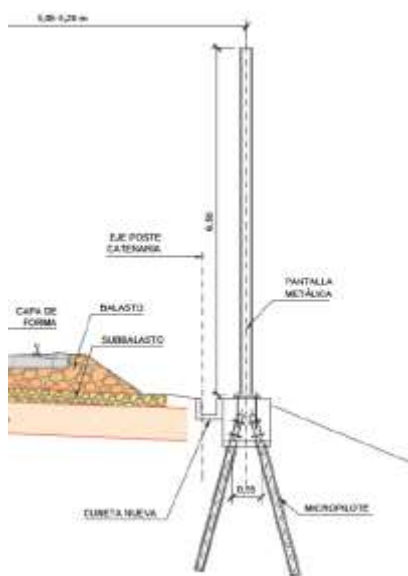


Figura 19. Cimentación mediante micropilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

5.7.4 Pantallas acústicas sobre estructuras existentes

En determinadas actuaciones, las pantallas se implantan directamente sobre estructuras previamente construidas, muros de contención, pasos superiores, plataformas ferroviarias, aprovechando su capacidad portante.

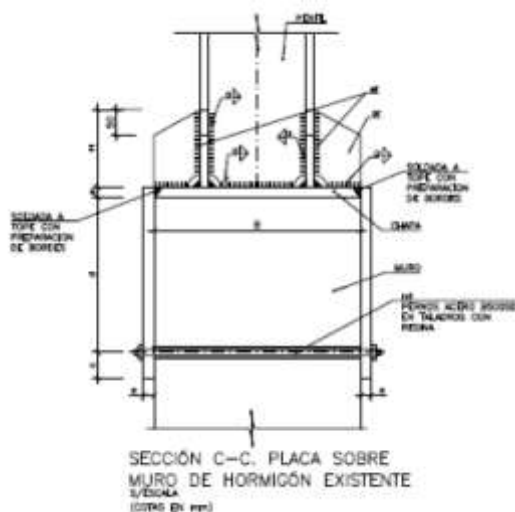


Figura 20. Colocación de pantallas sobre muros existentes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Esta solución elimina la necesidad de excavaciones y resulta especialmente ventajosa con restricciones severas de espacio. Su viabilidad depende de que la estructura existente disponga de capacidad resistente suficiente para absorber las nuevas acciones, incluyendo los momentos de vuelco por viento y de que los sistemas de anclaje puedan diseñarse compatiblemente con la sección del elemento receptor.

5.7.5 Comparativa de cimentación.

La **Tabla 4**, recoge las principales características y condicionantes de las tipologías descritas.

Tabla 4. Comparativa de tipología de cimentación en pantallas acústicas ferroviarias. Fuente: elaboración propia.

Tipología	Clasificación	Condición del terreno	Altura de pantalla	Entorno ferroviario adecuado	Complejidad constructiva
Zapata corrida	Cimentación superficial	Se usa cuando existe una capacidad portante adecuada	Media (<5m aprox.)	Requiere de espacio para la excavación	Baja
Pilotes perforados o hincados	Cimentación profunda	En terrenos con estratos superficiales blandos o débiles	Elevada (5-7m aprox.)	Maquinaria pesada y necesidad de mucho espacio	Alta
Micropilotes	Cimentación profunda	Cuando existe un terreno heterogéneo, rellenos, roca	Media/Elevada	Maquinaria ligera	Media - Alta
Pantalla sobre muro existente	Cimentación profunda/superficial	Tiene la obligación de que la estructura existente cuenta con la capacidad suficiente	Depende del elemento existente	Sin excavación, pero con una verificación resistente obligatoria	Media

De la lectura conjunta de la tabla se desprende que no existe una tipología universalmente óptima: la solución más adecuada resulta de ponderar los condicionantes específicos del emplazamiento. En entornos ferroviarios en servicio, la constructibilidad y el acceso adquieren con frecuencia un peso determinante, pudiendo hacer preferibles soluciones de menor robustez teórica pero mayor viabilidad práctica, tal como se analiza en detalle en el capítulo siguiente.

5.8 Lean Construction

La industria de la construcción se ha caracterizado históricamente por bajos niveles de productividad, incumplimiento sistemático de plazos y presupuestos, y una variabilidad estructural en los procesos de ejecución difícilmente abordable con las herramientas de gestión convencionales. Lean Construction surge como respuesta a esta problemática, trasladando al sector de la construcción los principios de eficiencia y eliminación de desperdicio desarrollados originalmente en la industria manufacturera japonesa.

5.8.1 Fundamentos de Lean Construction

- Definición y modelo TFV

Lean Construction puede definirse como un sistema de gestión orientado a maximizar el valor para el cliente y minimizar los desperdicios en todas las fases de un proyecto de construcción, incrementando la productividad y la fiabilidad de la producción mediante la

colaboración entre todos los agentes, la gestión del flujo y la demanda, y la mejora continua de los procesos (Segura, n.d.-a).

La contribución teórica central de Koskela (1992) es el modelo TFC (Transformación-Flujo-Valor), que propone entender la producción en construcción desde tres perspectivas simultáneas e inseparables. La transformación optimiza la eficiencia y agrega valor a cada actividad o tarea del proceso de construcción para crear un producto. El flujo persigue la continuidad y velocidad del proceso completo, reduciendo esperas, transportes y variabilidad. Esto minimiza los cuellos de botella y permite una mejor coordinación entre las distintas etapas del proyecto. Por último, el valor, asegura que los requisitos del cliente sean correctamente capturados y satisfechos en todas las fases del proyecto. La gestión convencional se centra casi exclusivamente en la dimensión de Transformación, ignorando las perspectivas de Flujo y Valor, lo que explica gran parte de las ineficiencias estructurales del sector.

Uno de los conceptos más importantes para cumplir el modelo TFC es la identificación y eliminación del desperdicio en los proyectos de construcción con el objetivo de aumentar el porcentaje de valor además de la reducción de las actividades de apoyo.

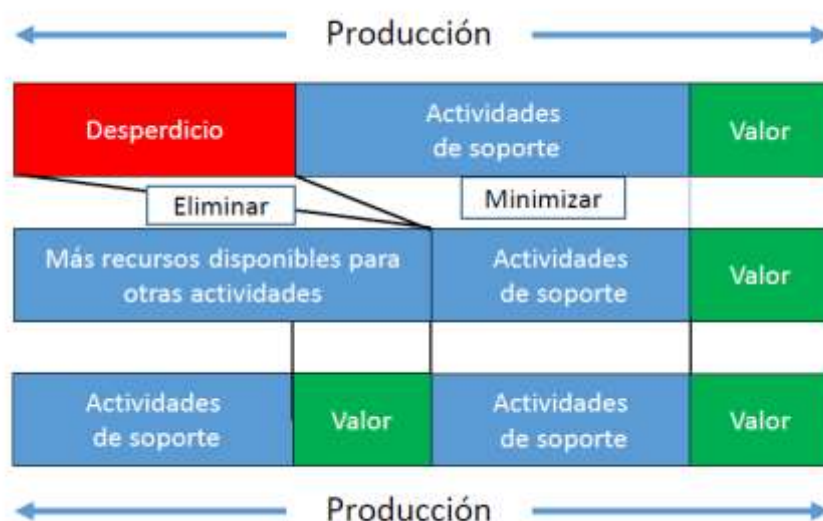


Figura 21. Diagrama de mejora de la producción. Modelo TFC. Fuente: (Segura, n.d.-b)

Un principio operativo fundamental del pensamiento Lean, trasladado al ámbito de la construcción desde el Toyota Production System, es el denominado *genchi genbutsu*, expresión japonesa que puede traducirse literalmente como "ir al lugar real y ver la cosa real". Este principio establece que ninguna decisión de diseño, planificación o resolución de problemas debe adoptarse sin una verificación directa y presencial de las condiciones reales del emplazamiento o del proceso productivo. En el contexto del Toyota Production System, el *genchi genbutsu* implica que los responsables de tomar decisiones deben desplazarse físicamente al lugar donde se genera el problema para observar, medir y comprender las condiciones reales antes de proponer soluciones. En el ámbito de la construcción, este principio se traduce en la obligación de verificar en campo las condiciones reales del emplazamiento antes de comprometer una solución de proyecto,

especialmente en entornos singulares donde la documentación disponible puede ser insuficiente o desactualizada. (Danku & Antwi, 2020).

- Los desperdicios en la construcción

La eliminación de actividades sin valor añadido, los desperdicios, constituye el eje operativo central de Lean Construction. Adaptando los principios de Ohno (1988) al entorno específico de la obra, se identifican los siete tipos de desperdicio, conocidos como muda, y su manifestación habitual en proyectos de construcción.

1. Sobreproducción: Producir más de lo necesario o antes de que se requiera, lo que genera inventarios innecesarios y descoordinación en el proceso de construcción.
2. Inventario: Mantener más inventario del necesario, lo que aumenta los costos de almacenamiento y administración, y puede resultar en materiales dañados o desperdiciados.
3. Esperas: Paradas del personal o maquinaria por falta de materiales, información o acceso al frente.
4. Transporte: Movimientos innecesarios de materiales o personas que no agregan valor al proceso y solo incrementan el riesgo de daños y costos adicionales.
5. Sobre procesamiento: Realizar tareas que no son necesarias para cumplir con los requisitos del cliente, como retrabajos o procesos excesivamente complejos.
6. Movimiento: Movimientos innecesarios del personal, herramientas o equipos dentro del lugar de trabajo, lo que genera pérdida de tiempo y esfuerzo.
7. Defectos: Productos o trabajos que no cumplen con los estándares de calidad y que requieren corrección o retrabajo, incrementando los costos y afectando los plazos.



Figura 22. Los siete desperdicios de Lean Construction. Fuente:(Segura, n.d.-b)

Estudios en obra han constatado que, en condiciones de gestión convencional, el trabajo productivo raramente supera el 30-40% del tiempo total, mientras que la aplicación de Lean Construction puede elevar significativamente este indicador mediante la reducción sistemática de estos desperdicios (Alarcón y Pellicer, 2009).

5.8.2 Last Planner System (LPS)

- Origen y estructura

El Last Planner System (LPS) es el sistema de planificación y control de la producción más representativo de Lean Construction. Desarrollado por Glenn Ballard y Gregory Howell desde mediados de los años noventa y formalizado en la tesis doctoral de Ballard (2000), el LPS tiene como propósito fundamental incrementar la fiabilidad de la planificación, entendida como la capacidad real de completar las tareas comprometidas para cada período. Los proyectos gestionados convencionalmente operan con niveles de cumplimiento semanal de entre el 55 y el 60%, lo que genera interferencias en cadena y desvíos acumulativos de plazo y coste (Pons y Rubio, 2019). El LPS aborda esta problemática estructural mediante la combinación de planificación colaborativa multinivel, gestión anticipada de restricciones y medición sistemática del desempeño.



Figura 23. Beneficios del sistema LPS. Fuente: (LAST PLANNER SYSTEM ITEC, n.d.)

El nombre del sistema hace referencia al concepto de último planificador (last planner): la persona que toma las decisiones definitivas sobre qué trabajo se realizará de forma inmediata —jefes de obra, encargados o responsables de subcontratas—, reconociendo que son ellos quienes disponen del conocimiento más preciso sobre las condiciones reales de la obra y la capacidad efectiva de sus (LAST PLANNER SYSTEM ITEC, n.d.).

El LPS estructura la planificación del proyecto en cinco niveles interconectados, cuya omisión parcial compromete la capacidad del sistema para cumplir sus objetivos (Segura, n.d.-a).

Tabla 5. Niveles de planificación del LPS. Funete: elaboración propia

Nivel	Horizonte	Objetivo principal	Agentes implicados
Programa Maestro	Proyecto completo	Establecer hitos y primeros acuerdos (Primera Pull Session)	Dirección del proyecto
Planificación de fases	1-3 meses	Planificación inversa: especificar entregables y fecha de cada equipo. Genera compromiso compartido	Todos los agentes ejecutores
Planificación intermedia	3-6 meses	Preparar el trabajo potencialmente ejecutable. Identifica y elimina restricciones antes de que afecten a la producción. Prepara el trabajo para el nivel semanal.	Jefes de obra y subcontratas
Planificación semanal de trabajo	1 semana	Compromisos concretos de ejecución. Solo entran tareas sin restricciones. Se mide con el PPC	Todos los agentes planificadores
Aprendizaje	Semanal (continuo)	Medir el porcentaje de cumplimiento de compromiso de cada periodo. Análisis de causas de incumplimiento del PPC.	Todo el equipo de obra

- El PPC como indicador clave de desempeño

El Porcentaje de Plan Completado (PPC) es el indicador central del LPS. Se calcula semanalmente como el cociente entre las tareas efectivamente completadas y las comprometidas para esa semana:

$$PPC (\%) = (Tareas\ completadas / Tareas\ comprometidas) \times 100$$

El PPC no mide el avance físico de la obra sino qué tan confiable somos cuando asumimos compromisos como equipo. Por esto se mide de manera binaria, ya que en el Sistema del

Último Planificador se entiende que las obras se completan en base a cadenas de compromisos, por lo tanto, en la medida que se rompe un eslabón (al no cumplir el compromiso), la obra pierde eficiencia y productividad. Estudios de referencia documentan incrementos del PPC desde el 50-60% inicial hasta valores superiores al 80-85% en proyectos con sistemas consolidados, con reducciones directas en plazo, coste e interferencias (Alarcón et al., 2005; Botero y Álvarez, 2004).

5.8.3 Aplicación al presente estudio de alternativas

La incompatibilidad constructiva detectada en la implantación de pantallas acústicas ferroviarias genera una situación de incertidumbre y variabilidad que demanda herramientas específicamente orientadas a gestionar restricciones, proteger el flujo de trabajo y garantizar la fiabilidad de la producción en condiciones de elevada complejidad operativa.

Desde el enfoque TFV, el análisis de alternativas de cimentación no se limita a su viabilidad técnica y estructural, sino que incorpora la dimensión de Flujo, continuidad y programabilidad de la ejecución en entorno ferroviario en servicio, y la dimensión de Valor teniendo en cuenta satisfacción de los requisitos acústicos, técnicos y de plazo del cliente. Desde la lógica del LPS, la identificación y eliminación anticipada de restricciones resulta determinante para la viabilidad constructiva de cualquiera de las soluciones evaluadas.

6 DESCRIPCIÓN DEL CASO REAL

El presente apartado describe el caso real que constituye el objeto central del estudio: la implantación de una pantalla acústica ferroviaria en un tramo concreto del nuevo acceso ferroviario de alta velocidad de Levante, en el que se ha identificado una incompatibilidad constructiva en la solución de cimentación prevista en proyecto y por lo tanto, también de la pantalla. A continuación, exponen el entorno de actuación y la localización del tramo, las características de la solución proyectada y los condicionantes específicos; geométricos, constructivos, ferroviarios y acústicos, que determinan la inviabilidad de su ejecución en las condiciones reales de obra.

6.1 Entorno de actuación

La actuación se enmarca en el proyecto constructivo de protección acústica asociado al nuevo acceso ferroviario de alta velocidad de Levante, Madrid–Castilla La Mancha–Comunidad Valenciana–Región de Murcia. Dicho acceso ferroviario de alta velocidad atraviesa múltiples poblaciones que generan la necesidad de adoptar medidas correctoras frente al impacto acústico sobre los núcleos urbanos y las edificaciones atravesadas por el corredor que así lo indique la normativa. Dichas medidas se materializan en un conjunto de pantallas acústicas distribuidas a lo largo del trazado, cuya implantación es responsabilidad de la UTE formada por las empresas constructora adjudicatarias, CHM Obras e Infraestructuras S.A. y Grupo Azvi, en el marco del contrato de obra correspondiente.

El tramo objeto del presente trabajo corresponde a la pantalla identificada como R358–R376, perteneciente al tramo 2 en la documentación de proyecto. La zona de actuación se desarrolla en un entorno ferroviario donde la línea de alta velocidad transcurre paralela a la línea convencional en servicio, caracterizado por la presencia de una plataforma ferroviaria sobre la que se proyecta colocar el sistema de protección acústica. La geometría del emplazamiento está condicionada por la existencia de un talud adyacente a la plataforma y por un espacio longitudinal en forma de callejón en su pie, actualmente sin uso ni acondicionamiento y ocupado por vegetación y residuos. La pantalla se proyecta en la coronación o proximidades del talud, en una franja con grandes limitaciones de acceso y maniobrabilidad de maquinaria, lo que condiciona significativamente las soluciones de cimentación posibles.

Durante la ejecución del proyecto se identifica la incompatibilidad constructiva que constituye el núcleo del análisis desarrollado en el presente TFM, la solución de cimentación prevista en proyecto resulta inviable por la interferencia con estructuras preexistentes no verificadas en la fase de diseño, circunstancia que obliga a replantear la solución adoptada y a buscar alternativas viables en las condiciones reales de obra.

6.2 Localización

La pantalla R358–R376 se localiza en el núcleo urbano de Carcaixent (Valencia), en las proximidades de la estación ferroviaria del municipio, *Figura 24*.



Figura 24. Plano de situación (Carcaixent). Fuente: UTE Pantallas la Encina, proyecto.

El ámbito concreto de actuación analizado en el presente trabajo se sitúa en el tramo inicial de la pantalla, entre la estación de tren de Carcaixent, pasando por las inmediaciones del paso inferior conocido como el 'túnel del alcalde', por el que discurre la vía asociada a la calle Polígono nº 50 y siguiendo hacia el Carrer Baixada de Balanguer como se puede observar en la *Figura 25*.



Figura 25. Localización de la pantalla acústica R358-376. Fuente: Google Maps

Desde el punto de vista técnico, la pantalla queda delimitada entre los puntos kilométricos de la obra PK 66+426 y PK 66+582 y entre los puntos kilométricos de la vía PK 477+423 y PK 477+592 aproximadamente, teniendo una longitud de 156 metros.

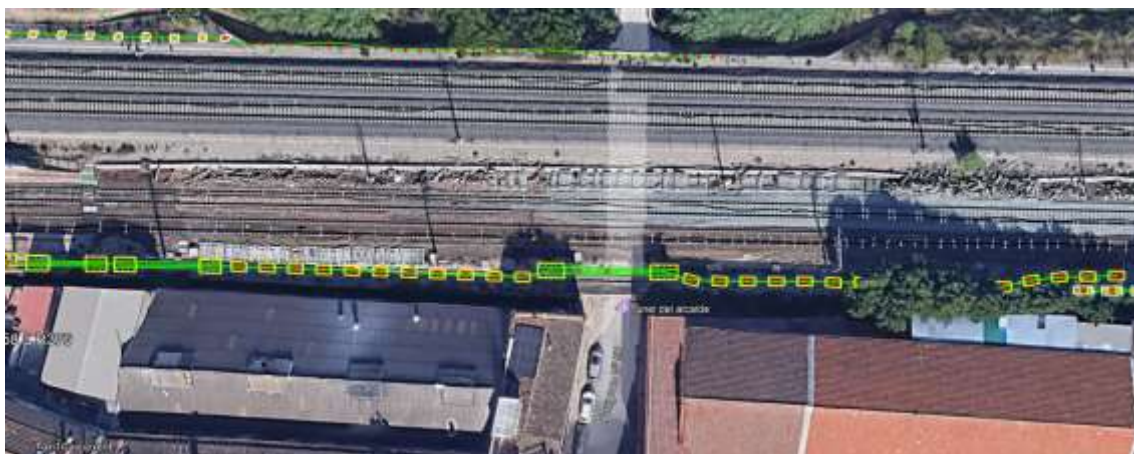


Figura 26. Tramo de pantalla R358-376 con interferencia de muro preexistente. Fuente: Google Earth.

Más concretamente, la zona de estudio, *Figura 26*, se encuentra en los 88 primeros metros de la pantalla, *Figura 27*, y pasando la viga proyectada, de 10 metros de longitud, en el paso superior del túnel del alcalde, sigue 38 metros más, *Figura 28*, en la que se ha identificado la problemática asociada a la solución de cimentación proyectada. El resto del tramo R358–R376, aproximadamente 20 metros, no presenta la incompatibilidad objeto de análisis y podría ejecutarse conforme a la solución proyectada sin modificación alguna.

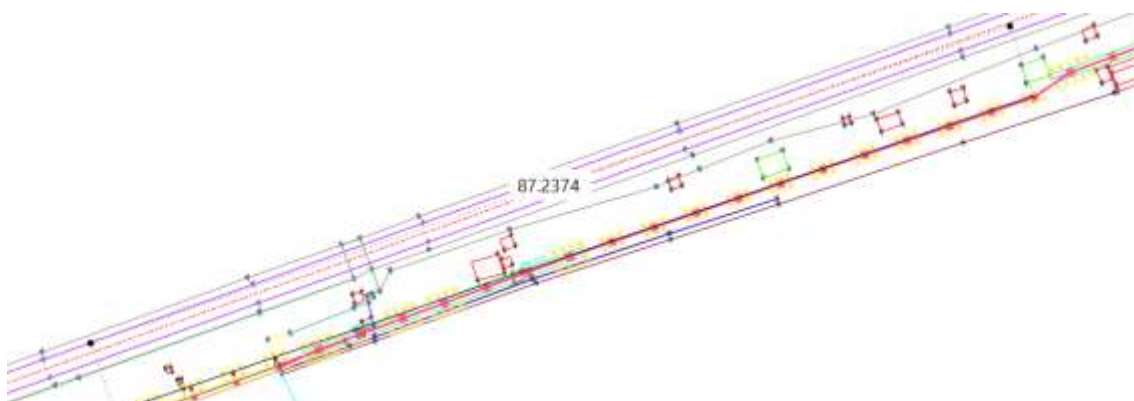


Figura 27. Longitud del tramo 1 de la pantalla R358-376 con interferencia con muro preexistente.

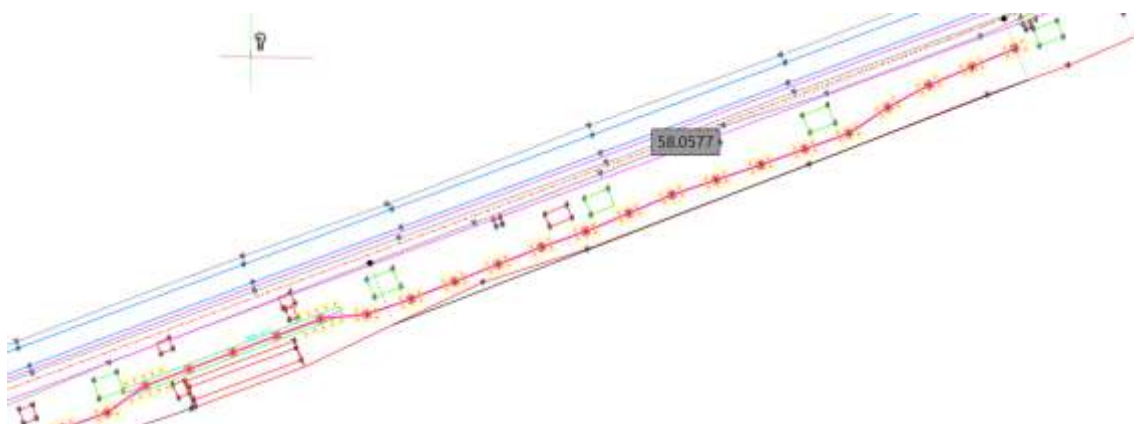


Figura 28. Longitud del tramo 2 de la pantalla R358-376 con interferencia con muro preexistente.

El emplazamiento presenta características singulares desde el punto de vista geométrico, ya que la vía se encuentra muy próxima al emplazamiento de la pantalla y esta, muy

próxima a las edificaciones del núcleo urbano y constructivo, con la existencia de un muro superpuesto a la cimentación propuesta de proyecto. Entre la plataforma ferroviaria y las edificaciones residenciales colindantes existe un espacio longitudinal en forma de callejón, paralelo a la vía, que adquiere gran relevancia en el análisis de alternativas constructivas desarrollado en los capítulos siguientes.

6.3 Solución proyectada

6.3.1 Descripción de la pantalla

El proyecto constructivo contempla la ejecución de una pantalla acústica convencional formada por postes metálicos de perfil HEB, anclados a una cimentación profunda mediante micropilotes, mediante encepados, sobre los cuales se disponen paneles prefabricados, de hormigón, metálicos o mixtos, en función de las necesidades acústicas de cada tramo. La altura total de la pantalla proyectada es de 7 m, definida a partir del estudio acústico del proyecto como la necesaria para garantizar los niveles de atenuación requeridos por el RD 1367/2007 en los receptores expuestos en el ámbito de Carcaixent.

6.3.2 Sistema de cimentación proyectado

La solución de cimentación prevista en proyecto se basa en la ejecución de micropilotes, tal y como se muestra en la *Figura 29*, dispuestos en alineación bajo cada poste de la pantalla, transmitiendo las cargas al terreno competente y garantizando la estabilidad del conjunto frente a las acciones horizontales de viento y a las sobrepresiones dinámicas generadas por el tráfico ferroviario.

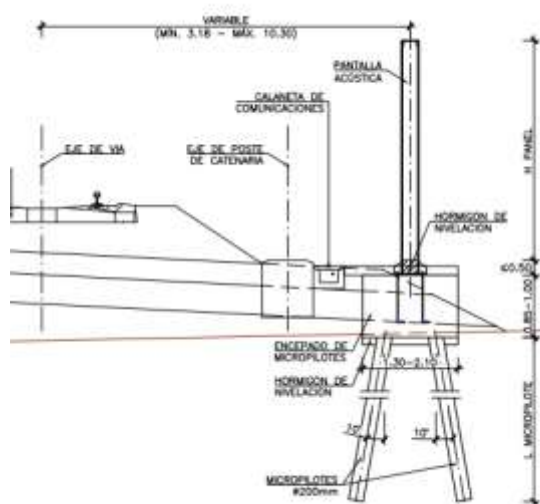


Figura 29. Estructura de proyecto, cimentación mediante micropilotes. Fuente: UTE Pantallas la Encina, proyecto.

Los micropilotes se conectan a los postes metálicos a través de un encepado de hormigón armado que distribuye las solicitaciones entre los elementos de cimentación.

Esta tipología es habitual en entornos ferroviarios con limitaciones de espacio o con condiciones geotécnicas que requieren cimentaciones profundas, siendo una solución técnicamente contrastada para la implantación de pantallas acústicas. Su viabilidad, sin embargo, queda condicionada en el tramo PK 66+426 y PK 66+582 por la presencia del

muro preexistente y por las restricciones geométricas y constructivas descritas en el siguiente apartado.

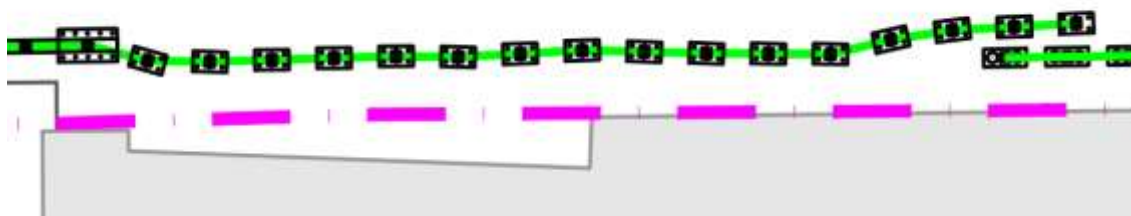


Figura 30. Solución de proyecto. Cimentación por micropilotes. Fuente: UTE Pantallas la Encina, proyecto.

6.3.3 Estudio acústico de referencia

La definición de la altura de la pantalla y de sus prestaciones acústicas se apoya en el estudio acústico incluido en la documentación del proyecto constructivo (Anejo 1). Dicho estudio analiza los niveles de inmisión sonora en los receptores expuestos antes de la implantación de la línea de alta velocidad, además de antes y después de la instalación de la pantalla con la previsión de niveles sonoros de situación futura.

En el caso de estudio, la pantalla se encuentra en un tramo en su mayoría residencial, en Carcaixent, dentro del tramo entre Xátiva y Valencia. Por lo tanto, debe verificar el cumplimiento de los valores límite establecidos en la Ley 7/2002 de la Comunidad Valenciana de Protección contra la Contaminación acústica, Figura 31, además de lo establecido en el RD 1367/2007 para uso residencial en el entorno de infraestructuras ferroviarias.

Uso dominante	Nivel sonoro LAeq,T dB(A)	
	Día(8-22h)	Noche (22-8h)
Sanitario y docente	45	35
Residencial	55	45
Terciario	65	55
Industrial	70	60

Figura 31. Límites sonoros del Anexo II Ley 7/2002. Fuente: proyecto.

Del análisis de los resultados se concluye que, en la situación futura con la línea de alta velocidad en servicio, los receptores que superan los valores límite de inmisión y requieren protección acústica son los receptores 358, 359, 365 y 376. El resto de los receptores del tramo se mantienen dentro de los límites normativos sin necesidad de medidas correctoras adicionales.

No obstante, si nos fijamos en el estudio acústico de los niveles sonoros con las medidas correctoras instaladas se observa que el receptor 360 presenta una superación de 7dB(A) respecto a los valores límite, a pesar de encontrarse dentro de los límites en ausencia de protección.

Este resultado aparentemente contradictorio responde a un fenómeno acústico conocido como *reflexión inducida por pantalla*. Cuando una barrera acústica se interpone entre la fuente y un conjunto de receptores, actúa simultáneamente como elemento de protección para los receptores situados en su zona de sombra y como superficie reflectante que puede redirigir energía sonora hacia receptores adyacentes que, en campo libre, recibían una energía dispersa y no concentrada. En el caso del receptor 360, la pantalla proyectada cortaba el campo directo de los receptores protegidos, pero, al mismo tiempo, concentraba sobre él una energía reflejada que en ausencia de pantalla se dispersaba en otras direcciones sin alcanzarle con esa intensidad. El modelo acústico original, con las hipótesis de reflexión y geometría empleadas, cuantificó este efecto en 7 dB(A) por encima del límite normativo, lo que llevó a prescribir la máxima altura de pantalla como medida de precaución.

Sin embargo, dado que este resultado resultaba confuso, un receptor que cumple sin pantalla y supera los límites con ella instalada es un indicador de posibles imprecisiones en el modelo, se procedió a repetir el estudio acústico para ese receptor con una modelización más detallada de la geometría real del emplazamiento. Los resultados del estudio revisado concluyen que el receptor 360 no supera los valores límite de inmisión con la pantalla instalada, y que el efecto de reflexión inducida había sido sobreestimado en el modelo original por una simplificación de las condiciones geométricas del entorno.

Como consecuencia de esta corrección, la altura de pantalla necesaria para garantizar el cumplimiento normativo en todos los receptores del tramo queda establecida en 5 m, prescindiendo de la restricción que imponía el receptor 360 en el estudio original. Cabe señalar que, dado que no se dispone de acceso al estudio acústico revisado en el marco del presente trabajo, esta conclusión se incorpora a partir de la información facilitada por el equipo técnico de la obra, quedando pendiente su validación documental mediante el informe acústico correspondiente.

6.4 Condicionantes

La zona de actuación en el tramo PK 477+423 y PK 477+592 presenta un conjunto de condicionantes de naturaleza geométrica, constructiva, ferroviaria y acústica que configuran un escenario especialmente complejo desde el punto de vista de la ejecución.

6.4.1 Condicionantes geométricos

La geometría del emplazamiento constituye el condicionante más restrictivo para la implantación de la pantalla acústica en este tramo. La actuación se sitúa en una zona donde la plataforma ferroviaria se desarrolla en proximidad a un talud, lo que reduce significativamente el espacio disponible para la ejecución de cimentaciones tanto en planta como en sección.

En la parte inferior del talud existe el callejón longitudinal, *Figura 32*, de ancho variable (aproximadamente 250 cm). Esta anchura condiciona directamente el tipo y tamaño de la maquinaria que puede operar en el interior del callejón, descartando equipos de perforación convencionales que requieren mayor espacio de trabajo y enfocando la solución hacía una cimentación realizada desde vía.



Figura 32. Vista del acceso al callejón desde la vía pública. Fuente: elaboración propia.

El condicionante geométrico más determinante es, no obstante, la presencia del muro de contención existente de aproximadamente 137 m de longitud bajo la alineación prevista para la pantalla. Su posición en planta coincide directamente con la alineación de los micropilotes proyectados, haciendo imposible su ejecución sin comprometer la integridad estructural del muro y, con ello, la estabilidad del talud que soporta la plataforma ferroviaria.

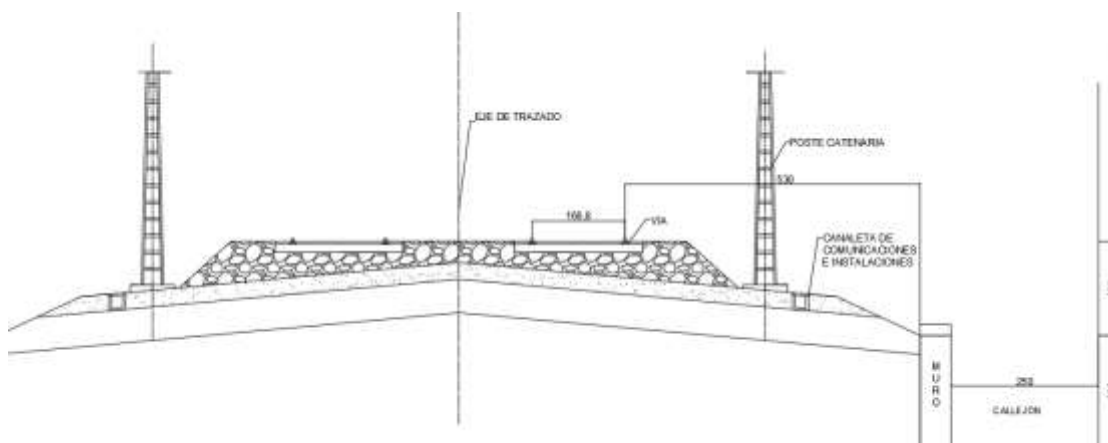


Figura 33. Esquema de la sección actual de la plataforma. Fuente: elaboración propia.

El reconocimiento de campo reveló además que el muro se encuentra en un estado de conservación muy deficiente, con desprendimientos de material en la cara expuesta, pérdida de sección en la coronación, deterioro por humedad y vegetación incrustada entre las juntas, *Figura 34*. Esta situación agrava significativamente el riesgo asociado a cualquier actuación en su entorno inmediato, ya que la ejecución de trabajos de perforación o

excavación en las proximidades de un elemento estructural en ese estado podría desencadenar su colapso parcial o total, con las consecuencias que ello tendría sobre la estabilidad del talud ferroviario y la seguridad de la línea en servicio.



Figura 34. Estado deficiente del muro en la pantalla de estudio. Fuente: elaboración propia

6.4.2 Condicionantes constructivos

Desde el punto de vista constructivo, el emplazamiento acumula varias limitaciones que afectan de forma directa a la ejecución de cualquier alternativa de cimentación. El acceso al callejón se realiza únicamente a través de una entrada de ancho reducido, 250cm, además de la existencia de un doble bordillo en el acceso, *Figura 32*, lo que impide la entrada de maquinaria de gran tamaño. Esta circunstancia descarta, como se ha comentado anteriormente, el uso de equipos pesados, como pilotadoras convencionales y obliga a considerar la utilización de equipos de perforación de pequeñas dimensiones, como los utilizados en la ejecución de micropilotes o la posibilidad de realizar los trabajos de cimentación y montaje desde vía.

El muro de contención preexistente que delimita el callejón por su lado este constituye el condicionante constructivo de mayor relevancia del emplazamiento. El reconocimiento de campo realizado permite caracterizarlo como un muro de gravedad de mampostería de piedra caliza, tipología constructiva habitual en las infraestructuras ferroviarias de la línea Valencia-Xàtiva.



Figura 35. Muro de mampostería de piedra caliza. Fuente: elaboración propia.

Al tratarse de un muro de gravedad, carece de armadura y su estabilidad depende exclusivamente de su propio peso y de la trabazón entre las piezas de piedra mediante mortero de cal, sin ningún mecanismo de redistribución de esfuerzos ante solicitaciones dinámicas o asientos diferenciales.

Esta caracterización tiene una implicación constructiva directa y determinante: al carecer de armadura y presentar una trabazón entre piezas ya deteriorada, el muro es especialmente vulnerable a la transmisión de vibraciones. Cualquier operación de perforación o hincas en su entorno puede desencadenar la disgregación del mortero de cal residual y el colapso local de la mampostería, con consecuencias directas sobre la estabilidad del talud ferroviario. La interferencia con el muro existente obliga además a extremar las precauciones durante cualquier actuación en el subsuelo y a descartar las soluciones que impliquen perforaciones en la alineación actual. Cualquier alternativa viable debe garantizar que no se compromete la capacidad de contención del muro ni se generan asientos o desplazamientos en la plataforma ferroviaria.

Adicionalmente, el estado actual del callejón, invadido por vegetación espontánea y residuos acumulados, requiere actuaciones previas de desbroce y limpieza antes de iniciar cualquier trabajo de cimentación. Dependiendo de la alternativa adoptada, podrían ser necesarias también gestiones de ocupación de la vía en bandas de trabajo nocturnas lo cual ralentiza el proceso constructivo.

6.4.3 Condicionantes acústicos

La proximidad a la infraestructura ferroviaria en servicio introduce un conjunto de condicionantes específicos, no solo desde el punto de vista de la seguridad operativa sino también en términos de rendimiento y viabilidad constructiva de cualquier proceso que requiera trabajo en las inmediaciones de la vía convencional, los cuales deben integrarse en el análisis de viabilidad de cada alternativa.

El tramo está servido por la línea convencional en explotación por lo que toda actuación queda definida por el Real Decreto 664/2015, de 17 de julio por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Ferroviaria, que establece una zonificación de seguridad

estructurada en tres franjas a partir del borde exterior de la cabeza del carril más una franja de peligro eléctrico:

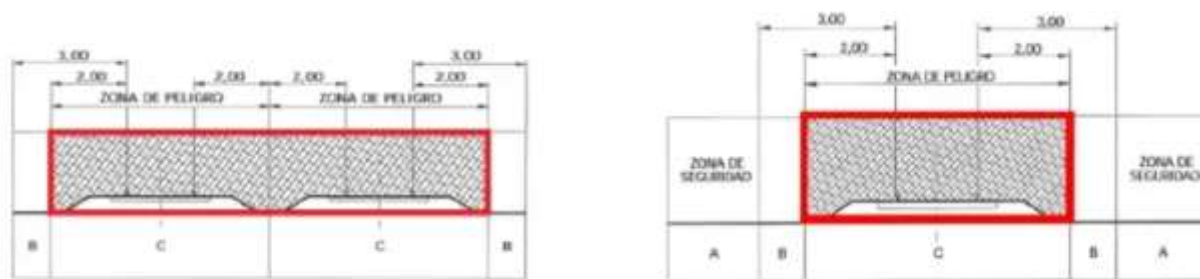


Figura 36. Esquemas de la zonificación de seguridad para trabajos próximos a una vía en servicio. Fuente:(ugtcatalunya, n.d.)

- Zona de peligro para los trabajos (zona C): espacio alrededor de la vía en el que una persona, material o equipo pueden ser arrollados por un vehículo ferroviario, o ser puestos en peligro por la corriente de aire que genera su circulación. Dicha zona comprende la vía y los espacios situados entre la cara externa de la cabeza del carril y una línea paralela situada a 2 metros de esta, a ambos lados de la vía.
- Zona de riesgo para los trabajos (zona B): es la comprendida entre la zona de peligro para los trabajos y la zona de seguridad para los trabajos. Exige la presencia de un sistema de aviso de aproximación de trenes, automático o mediante piloto de vía.
- Zona de seguridad para los trabajos (zona A): Espacios situados a más de 3 metros de distancia del borde exterior de la cabeza del carril, a ambos lados de la vía.
- Zona de peligro eléctrico: Espacio alrededor del conductor eléctrico dentro del cual un trabajador (con o sin herramienta) o una máquina de trabajos podría sufrir un arco eléctrico o un contacto directo con el elemento en tensión. La amplitud de la zona de peligro eléctrico es aproximadamente de 1 metro, aunque depende del voltaje del conductor.

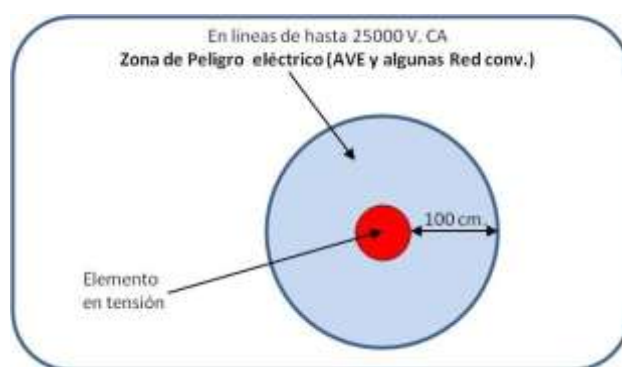


Figura 37. Zona de peligro eléctrico. Fuente:(ugtcatalunya, n.d.)

La pantalla acústica proyectada se sitúa aproximadamente a 6,8 m del eje de vía convencional, lo que equivale a unos 5,3 m del carril exterior, posicionándola en zona de seguridad, *Figura 37*, conforme al RD 664/2015. Sin embargo, esta clasificación no implica libertad de ejecución, los trabajos que impliquen el emplazamiento de maquinaria de perforación o hinka dentro del dominio ferroviario, *Figura 38*, como requeriría la ejecución de la cimentación, tanto por el método convencional como desde la vía, están sujetos a ciertas restricciones y obligadas a tener una coordinación con el responsable de circulación.

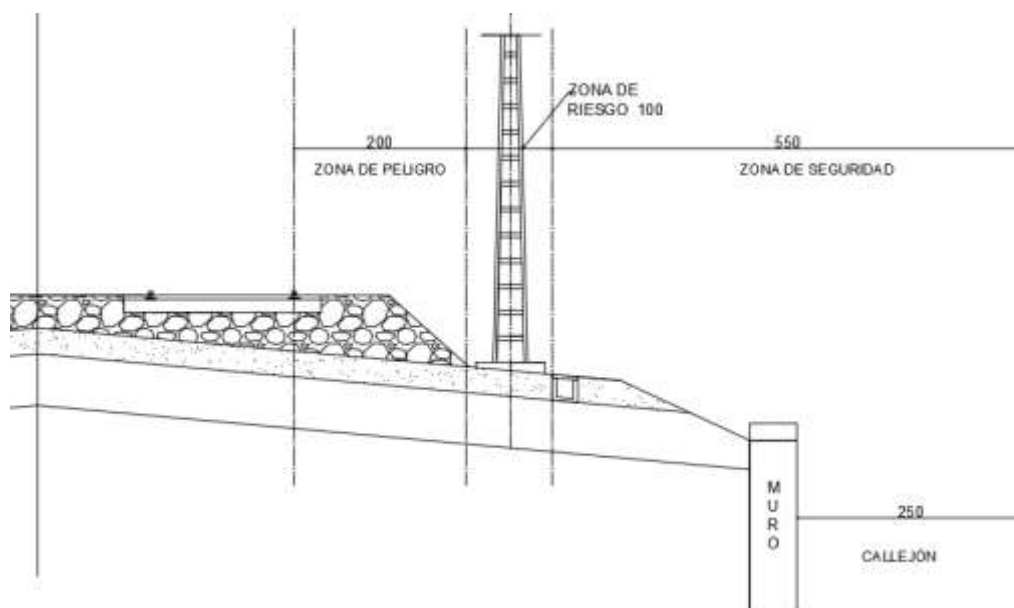


Figura 38. Esquema de zonificación para trabajos de ADIF, adaptada a la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, si los trabajos se realizan desde la vía, existe, la obligación de operar en ventanas de trabajo nocturno autorizadas por ADIF. Las ventanas de trabajo en la línea convencional Valencia-Xàtiva en el tramo de Carcaixent tienen una duración aproximada de entre 2 y 4 horas en horario nocturno, tiempo durante el cual se interrumpe el tráfico de viajeros y se descarga la corriente de tracción de la catenaria. Por otro lado, si se estudiase la alternativa de trabajar mediante métodos convencionales, fuera de las bandas de trabajo, se requiere la figura del piloto de vía, es decir, un agente de ADIF presente en obra en todo momento, con autoridad para paralizar los trabajos ante la aproximación de cualquier circulación.

En segundo lugar, las restricciones de gálibo ferroviario. La Especificación Técnica ET 03.305.010.5 de ADIF establece distancias mínimas al eje de vía para la implantación de elementos en la infraestructura ferroviaria. Los equipos de perforación convencionales, con alturas de mástil superiores a 6 m y radios de operación de 3-4 m, son incompatibles con estas distancias mínimas en la posición de trabajo requerida, obligando a recurrir a maquinaria de bajo perfil cuya capacidad de perforación y rendimiento son significativamente inferiores a los previstos en proyecto.

En tercer lugar, los condicionantes de la catenaria de alta tensión. La línea de catenaria de la vía convencional transcurre a una altura sobre el carril comprendida entre 5,00 m y 5,30 m en el tramo afectado, con una tensión de alimentación de entre 2,5 y 3 kV en corriente continua. Cualquier maquinaria o elemento metálico que se sitúe en la zona de influencia de la catenaria sin que esta haya sido previamente descargada de tensión y enfundada constituye un riesgo eléctrico de primer orden. El proceso de descargo y enfundado de la catenaria requiere coordinación específica con el departamento de electrificación de ADIF, añade tiempo a las operaciones previas al inicio de cada banda de mantenimiento y reduce el tiempo efectivo disponible para los trabajos de perforación.

6.4.4 Condicionantes acústicos

El objetivo principal de la actuación es la reducción del impacto acústico generado por la infraestructura ferroviaria sobre los receptores residenciales de Carcaixent, por lo que cualquier alternativa de cimentación adoptada debe garantizar la instalación de una pantalla con prestaciones acústicas suficientes para cumplir los valores límite del RD 1367/2007 y de la Ley 7/2002 en los puntos de recepción afectados.

El proyecto constructivo original indicaba la colocación una pantalla de 7 m de altura total como medida necesaria para garantizar el cumplimiento normativo en todos los receptores del tramo. No obstante, tal y como se ha descrito en el apartado 6.3.3, el estudio acústico revisado, con una modelización más detallada de la geometría real del emplazamiento, concluyó que dicho efecto había sido sobreestimado en el modelo original, determinando que una altura de pantalla de 5 m sería suficiente para garantizar el cumplimiento normativo en todos los receptores del tramo afectado.

La altura de la pantalla es el parámetro acústico más directamente relacionado con el sistema de cimentación, ya que determina el momento flector en la base, generado principalmente por la acción del viento y, como es el caso, en un entorno ferroviario de alta velocidad, por las sobrepresiones dinámicas inducidas por el paso de los trenes.

Estas dos acciones de naturaleza horizontal, calculadas en el *Anejo 5 del proyecto base*, actúan sobre la base del poste en la cimentación y generan un momento flector el cual crece en función de la altura. Aunque el cálculo de dicho momento flector se obtendrá en el *apartado 9* de este documento, podemos realizar una estimación observando ambos esfuerzos en la *Figura 39* y afirmar que, el momento flector crece con el cuadrado de la altura de la pantalla, conforme a la expresión simplificada:

$$M = q * \frac{H^2}{2}$$

donde q es la presión horizontal uniforme equivalente (viento y sobrepresión dinámica, en kN/m²) y H es la altura libre de la pantalla.

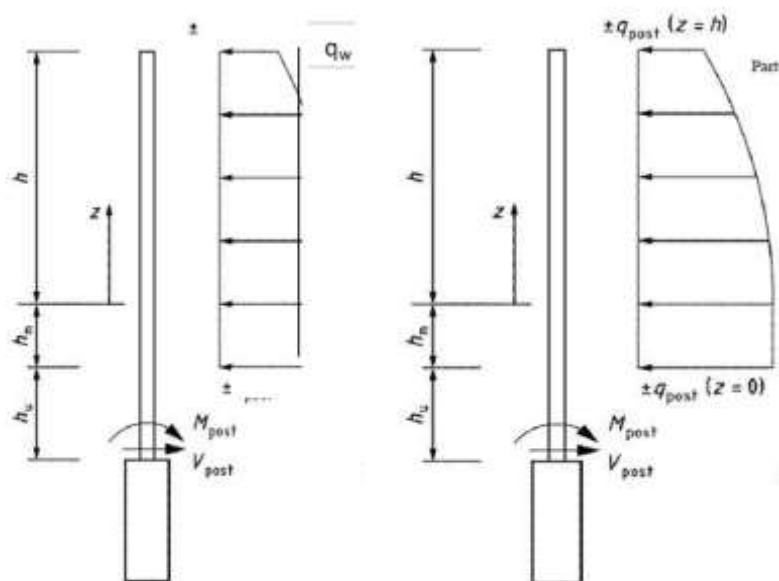


Figura 39. Esfuerzos generados por el viento de sobre presión dinámica. Fuente: proyecto.

Con todo ello, y sabiendo que la altura de carril en proyecto es de 6 metros, *Anejo 5 del proyecto base*, por lo tanto, con la reducción de altura de la pantalla sería de 4 metros. Podemos aproximar que el momento flecto disminuye en un 0,44:

$$\left(\frac{4}{6}\right)^2 = 0,44$$

Es decir, el momento flector en la base se reduce casi a la mitad al pasar de 7 a 5 m de altura, manteniendo iguales la presión de viento y la separación entre postes. Este condicionante acústico actúa, por tanto, como un factor de flexibilidad dentro del conjunto de restricciones del emplazamiento, la posibilidad de reducción de altura de pantalla manteniendo en todo caso las restricciones normativas. Esto amplía significativamente el número de alternativas de cimentación técnicamente viables.

6.4.5 Resumen de los condicionantes

Tabla 6. Condicionantes del emplazamiento en pantalla R358-376. Fuente: elaboración propia a partir de la inspección de campo y documentación del proyecto.

Tipo	Condicionante	Descripción	Implicación sobre la solución
Geométrico	Muro de contención preexistente	Muro de gravedad de mampostería de 137 m coincidente en planta con la alineación de los micropilotes proyectados	Imposibilidad de perforar en la alineación proyectada sin comprometer la integridad del muro y la estabilidad del talud ferroviario

Geométrico	Espacio para encepado	La reubicación de micropilotes hacia la vía situaría el encepado en zona de dominio ferroviario	Inviabilidad del encepado en cualquier posición que eluda el muro
Constructivo	Tipología y estado del muro	Muro de gravedad de mampostería de piedra caliza sin armadura, con pérdida de sección, penetración de raíces y episodios previos de inestabilidad	Vulnerabilidad extrema ante vibraciones; riesgo de colapso parcial ante perforación o hincas en su entorno
Geométrico / Constructivo	Anchura del callejón y acceso de maquinaria	Entrada única al callejón de 240 cm con doble bordillo	Solo accesible con equipos de muy pequeño formato; imposibilidad de maquinaria pesada
Constructivo	Estado previo del callejón	Vegetación espontánea, árbol con raíces afectando ambos paramentos y residuos acumulados en toda su longitud	Requería desbroce y limpieza previos a cualquier trabajo, esta ejecutado, pero será necesario mas adelante
Ferroviario	Proximidad a línea convencional en servicio	Eje de vía convencional a 7 m de la alineación de la pantalla	Obliga a piloto de vía y a trabajar en ventanas de mantenimiento ADIF (de 3 a 6 h nocturnas) para cualquier trabajo en zona de influencia
Ferroviario	Restricciones de gálibo	Gálibo ferroviario incompatible con maquinaria de perforación estándar	Obliga a maquinaria de bajo perfil con rendimiento y capacidad inferiores

Ferroviario	Catenaria de alta tensión	Línea de catenaria de 2,5 - 3 kV a 5,00–5,30 m sobre el carril	Requiere descargo de tensión y enfundado para cualquier operación con elementos metálicos en su radio de influencia
Acústico	Reducción de altura de pantalla	Estudio acústico revisado: 5 m suficiente en lugar de 7 m proyectados	Reduce el momento flector en base 44% respecto al proyecto original, ampliando el espacio de soluciones de cimentación viables
Acústico	Posición de la pantalla	Mayor distancia a la fuente sonora en caso de reubicación al callejón	Requiere compensación geométrica mediante zócalo y postes de mayor altura para mantener eficacia acústica

6.5 Caracterización geológica y geotécnica

6.5.1 Caracterización geológica

La caracterización geológica del tramo de estudio se obtiene del Anejo de Geotecnia del proyecto constructivo de referencia. Dicho tramo se localiza en el entorno de la estación ferroviaria de Carcaixent, dentro del Dominio Estructural nº3, correspondiente al área meridional de la llanura del Golfo de Valencia, geográficamente conocida como la “Huerta de Valencia”, pero rozando con el Dominio Estructural nº2, mostrados en la *Figura 40*.

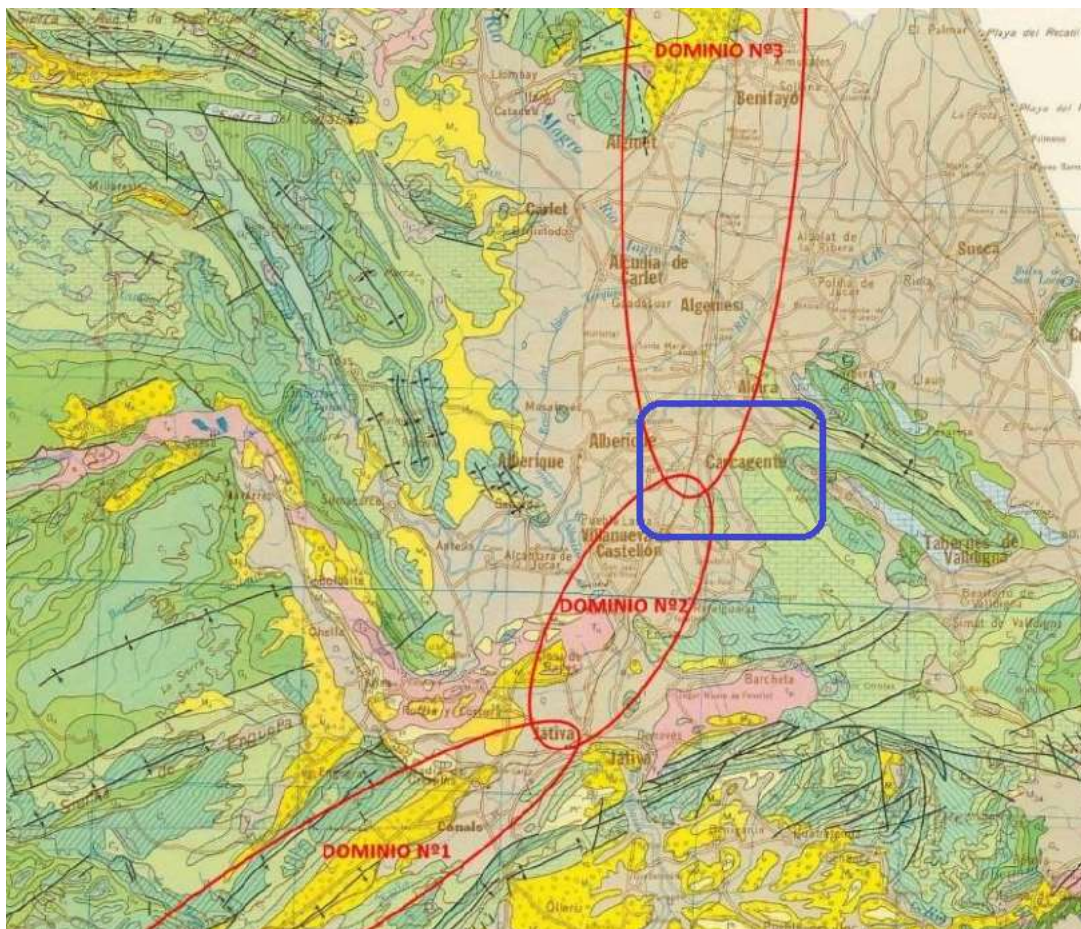


Figura 40. Caracterización geológica del proyecto. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Según el Anejo de Geología, el proyecto en el que está basado este estudio constituye una amplia depresión morfológica de origen tectónico complejo, asociada a un eje sinclinal de la Cadena Ibérica sobre el que se han depositado materiales posteriores al escenario principal de compresión que originó las estructuras ibéricas.

Desde el punto de vista litológico, el tramo de estudio, Carcaixent, cuenta con materiales del Cuaternario mezclados en algunos puntos con materiales del Cretácico, lo cual podemos observar contrastando la leyenda a continuación con la Figura 41.

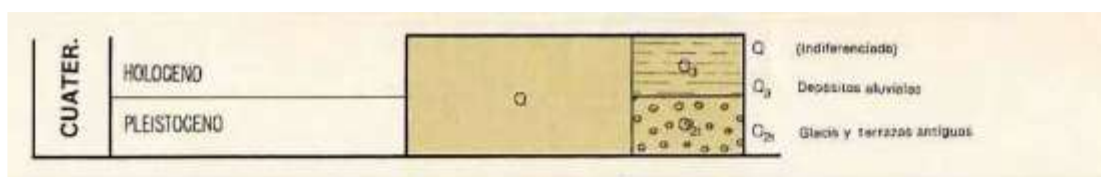


Figura 41. Leyenda de materiales del Cuaternario de proyecto. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

En el tramo que discurre desde la salida del túnel de La Énova hasta la estación de Carcaixent, el recorrido geológico atraviesa sucesivamente limos, pardos fluviales, depósitos de glacia de acumulación y mantos de arroyada, además de arcillas y cantos de discontinuas granulometrías.

El sustrato predominante en el tramo de estudio es, por tanto, de naturaleza cuaternaria. Por la propia estación existe la presencia de rellenos antrópicos, consecuencia de alta ocupación histórica de la zona, con polígonos industriales y cultivos próximos, además de la actividad ferroviaria cuya línea férrea ha sufrido sucesivos desmantelamientos y renovaciones a lo largo del tiempo.

Respecto a los condicionantes hidrogeológicos, el Anejo de geología no detecta acuíferos generales en el entorno del trazado, *Figura 42*, quedando las cotas del nivel freático del acuífero general muy alejadas de las profundidades de afección de la actuación.



Figura 42. Localización de acuíferos en proyecto. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Como se puede observar en la *Figura 42*, Carcaixent, rodeado por el cuadro negro de la figura, se encuentra en una zona de formaciones detríticas permeables en general no consolidadas, más concretamente en la zona A-2 que la leyenda muestra que se pueden encontrar acuíferos extensos, discontinuos y locales de permeabilidad y producción moderada. Esta información consolida con la confirmación de condiciones de humedad subsuperficial, de manera puntual, entre 6 y 10 metros de profundidad, asociadas a rellenos cuaternarios en zonas de regadío, detectadas en áreas agrícolas de Xàtiva, Carcaixent y Alcira. Estas bolsas de agua colgada, limitadas por horizontes impermeables, no afecta en ningún caso a la cota de apoyo de la plataforma ferroviaria actual. Además, la zona de

estudio se encuentra en una zona residencial no de regadía. En consecuencia, el Anejo descarta cualquier riesgo de afección a acuíferos, riesgo sísmico, riesgos de inestabilidad de laderas y riesgo de inundaciones o avenidas en el entorno del emplazamiento de manera general.

En conclusión, el encuadre geológico confirma que el emplazamiento se sitúa sobre formaciones cuaternarias de naturaleza predominante limo-arcillosa con cantos dispersos, sin riesgo hidrogeológicos relevantes a no ser que las actuaciones requieran actividades de más 6 metros de profundidad. A todo esto, se le suma la posibilidad de encontrar rellenos antrópicos en el entorno de estudio que deberá verificarse mediante un estudio geotécnico específico.

6.5.2 Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica por su parte se apoya en el apartado 3.5 del Anejo 6 del proyecto constructivo de referencia, correspondiente con el Anejo 3 del trabajo. En él se clasifica de manera específica la pantalla objeto de estudio la cual se sitúa donde el trazado de la nueva plataforma de la línea de AV transcurre paralela a la plataforma antigua, aunque tratándose de plataformas independientes.

La pantalla por estudiar se sitúa en la plataforma antigua de la cual se desconocen las condiciones de ejecución, aunque si se puede afirmar que se trata de una zona con una topografía muy llana y el trazado discurre en terraplén. En su mayor parte el material procede de cantera y consiste en suelos, materiales granulares, todo-unos y pedraplén.

La ficha correspondiente a la pantalla R358-376, describe que el terreno natural en la zona del muro de contención y andén es un relleno antrópico granular sobre suelo cohesivo a granular fino con costra calcárea, con un espesor de muro de contención de entre 2,00 y 3,00 metros.

Tabla 7. Caracterización del terreno de la plataforma de estudio. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Pantalla	Plataforma	Tipo de obra de tierra	Altura desmonte/Terraplén	Terreno natural	Investigación
T2.1 R358-376	Antigua	Muro contención y andén	2,00-3,00 m	TN: relleno antrópico granular sobre suelo cohesivo a granular fino con costra calcárea	PN2-34 y PN2-35

Esta descripción confirma, a nivel de proyecto, la presencia de relleno antrópico en el entorno de la pantalla como hemos definido en el apartado anterior.

Para la caracterización de este tramo, nos apoyamos en la información de investigación de campo realizada en el entorno de la pantalla R358-376, identificados como PN2-34 y PN2-35, cuyas fichas técnicas aparecen en el *Anejo 3* de este estudio.

El ensayo PN2-34, realizado en el aparcamiento de minusválidos de la estación de Carcaixent, justo antes de comenzar donde se colocará la pantalla, junto al andén de la vía 2, sobre terreno natural, muestra un croquis de campo, *Figura 43*. En él, se observa la presencia de un muro de bloques de hormigón de 0,90 m de altura, y a continuación, un muro de mampostería de 1,59 m de altura, todo ello juntos a una acequia.

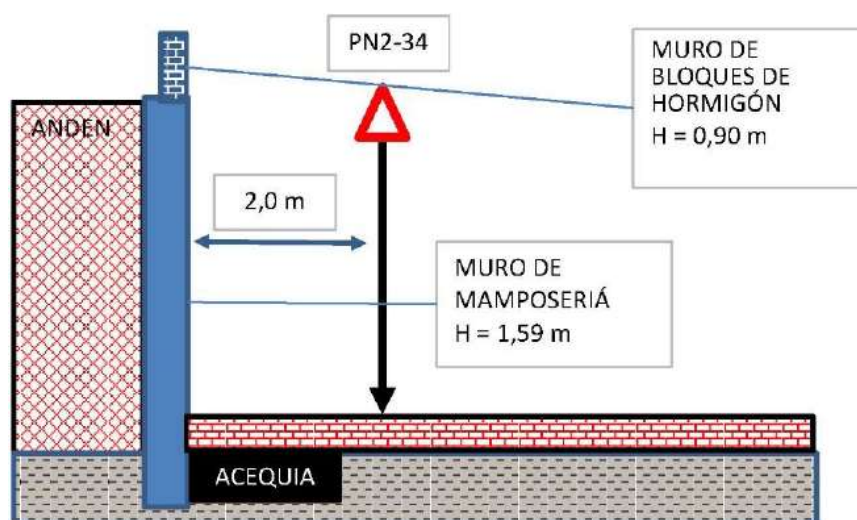


Figura 43. Croquis del entorno de la pantalla de estudio R358-376. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Antes de la realización del ensayo se ha obtenido un testigo de 0,40 metros de longitud que muestra que el pavimento es, de 0,00 a 0,12 m hormigón con árido de machaqueo calizo y silíceo; de 0,12 a 0,30 m una subbase granular compuesta de grava de machaqueo de caliza y arenisca; y de 0,30 a 0,40 m terreno natural cuaternario aluvial reciente, descrito como suelo cohesivo de arcilla algo arenosa. Por otro lado, los valores de golpeo N20 del ensayo de penetración dinámica son bajos en los primeros metros, lo que indica un terreno de consistencia floja, blando, el cual va mejorando progresivamente con la profundidad.

Además, en las observaciones de campo, se señala la presencia de varillas mojadas a partir de los 3,00 metros, arcilla fétida entre los 4,00 y 5,00 m y arcilla margosa entre los 5,00 y los 8,00 m con las dos últimas varillas empapadas. Esto respalda la humedad subsuperficial de la que se habla en la caracterización geológica, coherente con las bolsas de agua colgadas descritas.

A diferencia de la zona de ensayo del PN2-34, el ensayo PN2-35 se realiza desde arriba de la plataforma en la vía convencional de servicio, *Figura 44*.



Figura 44. Localización de la cata PN2-35. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Del testigo extraído se obtiene la siguiente estratigrafía; de 0,00 a 0,30 m balasto de gravas angulosas de pórfido, caliza y arenisca; de 0,30 a 0,50 m se encuentra subbalasto de grava gruesa de caliza de machaqueo con algo de arena e indicios de limo. Los valores N20 por su parte, son vagamente mejores y crecientes con la profundidad. Todo esto, evidencia la existencia de un terreno más duro que el registrado en PN2-34, coherente con la ubicación, bajo la plataforma ferroviaria consolidada. En las observaciones, se destaca la existencia de arena fina en las barras a partir de 8,00 m y arcilla arenosa marrón y marga gris entre los 9,00 y 12,00 m de profundidad.

7 ANÁLISIS DE LA INCOMPATIBILIDAD CONSTRUCTIVA

El capítulo anterior ha descrito el caso real en sus términos objetivos: el entorno, la localización, la solución proyectada y los condicionantes del emplazamiento. El presente capítulo da el paso siguiente y aborda el análisis de la incompatibilidad constructiva propiamente dicha, el diagnóstico técnico de por qué la confrontación entre la solución proyectada y las condiciones reales de obra genera una situación de inviabilidad constructiva, cuáles son sus causas raíz, qué implicaciones tiene sobre el proceso y qué lecciones cabe extraer desde la perspectiva de Lean Construction.

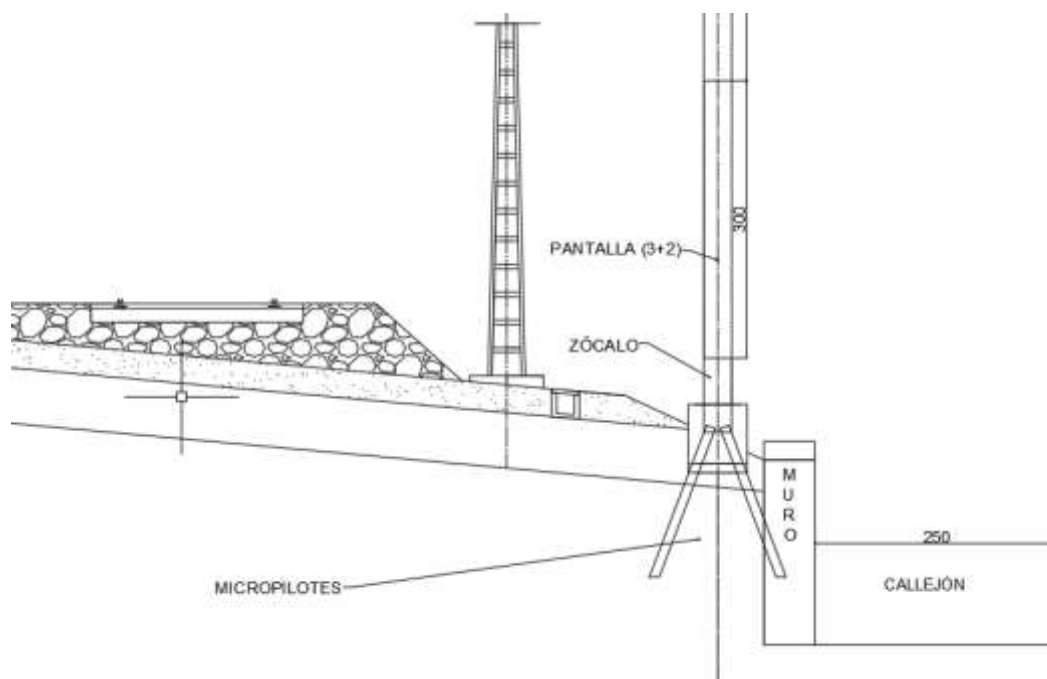


Figura 45. Esquema de cimentación por micropilotes. Solución de proyecto. Fuente: elaboración propia.

7.1 Identificación de la incompatibilidad

La incompatibilidad constructiva no fue detectada durante la fase de redacción del proyecto, sino durante la fase de preparación de los trabajos en obra. En el momento en que el equipo de ejecución procedió a replantear sobre el terreno la alineación de los micropilotes definida en el proyecto, se constató que dicha alineación coincidía directamente con el muro de contención existente que delimita el callejón por su lado este, a lo largo de aproximadamente 20 metros y aunque no directamente, los micropilotes terminarían atravesando dicho muro en los 117 metros siguientes de la pantalla R358–R376.

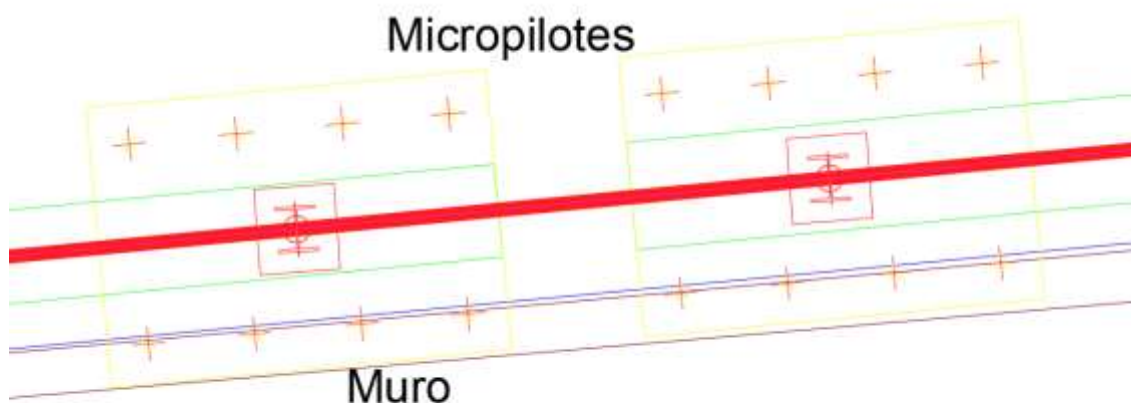


Figura 46. Interferencia de los micropilotes con el muro existente. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

La perforación prevista para la ejecución de los micropilotes atravesaría inevitablemente el cuerpo del muro a lo largo del tramo afectado, lo que resulta inviable tanto desde el punto de vista estructural, por la pérdida de capacidad de contención del talud ferroviario, como desde el punto de vista de la seguridad de la infraestructura, por el riesgo de derrumbe y de asentamientos o desplazamientos en la plataforma de la línea convencional en servicio, situada a aproximadamente 7 m del eje de vía de convencional, *Figura 47*, y a unos 26 m de la línea de alta velocidad, *Figura 48*.

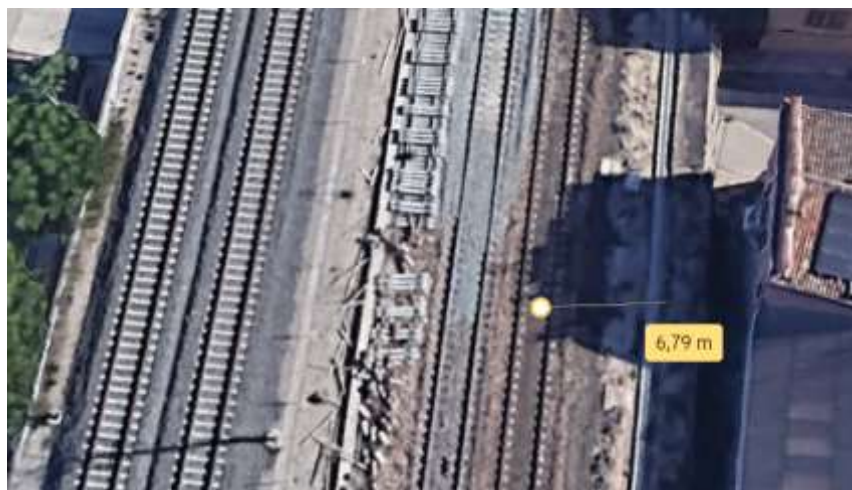


Figura 47. Distancia del eje de la vía a la pantalla (línea convencional). Fuente: Google Maps



Figura 48. Distancia del eje de la vía a la pantalla (línea de alta velocidad). Fuente: Google Maps

Las únicas actuaciones realizadas, que a su vez son las que ayudaron a detectar el problema, fueron las de desbroce y limpieza del callejón, necesarias para el acceso al emplazamiento y previas a cualquier trabajo de ejecución. Esta circunstancia, aunque negativa desde el punto de vista de la planificación, tiene una lectura positiva relevante desde la perspectiva de Lean Construction, la incompatibilidad se identificó antes de que se materializara ningún desperdicio físico en obra, lo que acota el impacto real de la incidencia y preserva la posibilidad de adoptar una solución alternativa sin necesidad de demoler o deshacer ningún trabajo ejecutado.

La incompatibilidad no afecta a la totalidad de la pantalla R358–R376, de longitud 156 metros sino a los 137 m iniciales en los que el muro preexistente coincide con la alineación proyectada. Los 19 m restantes del tramo son ejecutables conforme a lo previsto en proyecto sin modificación alguna.

7.2 Confrontación entre la solución proyectada y las condiciones reales

La incompatibilidad no deriva de una única causa sino de la confluencia simultánea de varios elementos de la solución proyectada que resultan incompatibles con las condiciones reales del emplazamiento. La *Tabla 8* desarrolla esta confrontación elemento a elemento, identificando para cada componente de la solución proyectada la condición real con la que nos encontramos en la justificación técnica y constructiva de su inviabilidad.

Tabla 8. Confrontación de la solución proyectada y las condiciones reales. Fuente: elaboración propia.

Elemento proyectado	Condición real	Justificación técnica de la confrontación
Micropilotes en la alineación proyectada	Muro de contención existente de 137 metros debajo del talud, coincidentes en planta con prácticamente la totalidad del tramo de estudio	La perforación atravesaría el cuerpo del muro en todos los puntos del tramo, comprometiendo su función de contención del talud ferroviario. La inviabilidad es directa, total e irremediable

		sin modificar la tipología de solución.
Estado del muro existente	Muro en estado de conservación muy deficiente, con riesgo de colapso parcial en algunos puntos.	El estado del muro agrava exponencialmente cualquier actuación en su entorno. Este condicionante hace inviable no solo la ejecución en la alineación proyectada sino cualquier trabajo de perforación o hinca en la proximidad del muro.
Ejecución de micropilotes desde la plataforma ferroviaria (solución de proyecto)	Línea ferroviaria convencional en servicio a unos 7 metros de la pantalla, restricciones de trabajo (horarios y gálibos).	Los trabajos en zona de influencia requieren ventanas de mantenimiento autorizadas por ADIF de duración y frecuencia insuficientes para completar los trabajos con rendimientos mínimamente viables. Las restricciones de gálibo y la presencia de la catenaria hacen inoperables los equipos de perforación convencionales desde esa posición.
Encepado de hormigón armado en el talud	Geometría proyectada de los micropilotes coincidente con el muro; cualquier recolocación para evitar el muro acercaría los micropilotes a la plataforma ferroviaria.	El encepado, tal como está proyectado, es inviable porque los micropilotes que lo sustentan no pueden ejecutarse en esa posición. En caso de intentar reposicionar los micropilotes alejándolos del muro, estos deberían acercarse tanto a la vía que el encepado quedaría en zona de dominio ferroviario, fuera de los gálibos de seguridad exigidos por ADIF.
Acceso de maquinaria convencional (método alternativo)	Entrada y callejón de ancho reducido, aproximadamente 250cm.	Si se intentara ejecutar los micropilotes desde el callejón los equipos de perforación estándar no podrían acceder ni maniobrar en ese espacio.

7.3 Justificación técnica de la inviabilidad de la solución adoptada

7.3.1 Interferencia directa con el muro de contención y su estado de conservación

La causa principal de la inviabilidad es la interferencia geométrica entre la alineación de micropilotes proyectada y el muro de contención preexistente. El muro discurre a lo largo

de los 137 m del tramo afectado coincidiendo en planta con la alineación de los micropilotes en prácticamente su totalidad, de modo que la perforación para la ejecución de cada micropilote atravesaría inevitablemente el cuerpo del muro, generando discontinuidades estructurales que comprometería irreversiblemente su capacidad de contención del talud ferroviario.

Como se ha descrito en el apartado 6.4.2, el muro es un muro de gravedad de mampostería de piedra caliza, sin armadura, cuya estabilidad depende exclusivamente de su propio peso y su conexión entre piezas mediante mortero de cal, en un estado de conservación muy deficiente con patologías de deterioro avanzado en toda su longitud. Las vibraciones inducidas por la perforación actúan directamente sobre las juntas entre piezas, acelerando la disgregación del material de unión residual y pudiendo desencadenar el colapso local de la mampostería con consecuencias directas sobre la estabilidad del talud ferroviario y la seguridad de la línea en servicio. Además, en algunos puntos del tramo el muro se encuentra próximo al colapso parcial. Este estado reduce significativamente su capacidad resistente residual y hace arriesgada cualquier actuación en su entorno inmediato.

La interferencia es además geométricamente irremediable en la alineación proyectada, no existe ningún ángulo de perforación que permita sortear el muro y alcanzar el estrato competente de apoyo sin atravesarlo, dado que el muro discurre paralelo y solapado en planta con la alineación completa de los 137 m afectados.

7.3.2 Complejidad de la ejecución desde la plataforma ferroviaria

El proyecto contempla la ejecución de los micropilotes desde la plataforma ferroviaria, posicionando los equipos de perforación en la zona adyacente a la pantalla. Esta opción enfrenta tres obstáculos simultáneos e independientes entre sí.

En primer lugar, los trabajos en zona de influencia de la línea convencional en servicio requieren trabajar en ventanas de mantenimiento autorizadas por ADIF de duración habitual de entre 2 y 4 horas en horario nocturno, tiempo insuficiente para completar los trabajos de perforación, inyección y fraguado de la lechada con rendimientos mínimamente viables. La acumulación de ventanas necesarias para completar los 33 encepados de micropilotes del tramo afectado, a una separación de aproximadamente 4 metros retrasaría el ritmo de ejecución de la obra. En segundo lugar, las restricciones de gálibo ferroviario impiden el uso de equipos de perforación de tamaño estándar en proximidad a la vía convencional en servicio, obligando a recurrir a maquinaria de bajo perfil con capacidad y rendimiento significativamente inferiores. En tercer lugar, la presencia de la catenaria de alta tensión exige el descargo de tensión y la coordinación específica con ADIF para cualquier operación en esa zona, además de la necesidad de enfundar el cable de catenaria, restringiendo aún más los horarios y las operaciones admisibles. Estos condicionantes no hacen la solución de proyecto imposible de ejecutar, pero sí desfavorable.

7.3.3 Inviabilidad del encepado de hormigón armado

El encepado de hormigón armado que en la solución proyectada conecta los micropilotes con los perfiles metálicos HEB de la pantalla es inviable en el tramo afectado por una razón encadenada con el punto anterior, al no poder ejecutarse los micropilotes en la posición proyectada, el encepado pierde su sustento y no puede construirse tal como está definido en el proyecto.

Si se intentara resolver este problema reposicionando los micropilotes para esquivar el muro, acercándolos hacia la plataforma ferroviaria, ya que no cabe la posibilidad de alejarse más por el callejón, el encepado que los une quedaría desplazado hacia la vía hasta situarse en zona de riesgo o peligro, fuera de las distancias mínimas de seguridad al eje de vía establecidas por ADIF. En esa posición, el encepado sería igualmente inviable, ahora no por interferencia con el muro sino porque no tenemos el espacio suficiente para desplazar los micropilotes.

7.3.4 Inviabilidad sistemática y descarte definitivo de la solución proyectada

El análisis de los tres frentes de inviabilidad anteriores permite concluir que la solución de micropilotes con encepado resulta técnicamente inviable en el tramo afectado por causas simultáneas, independientes entre sí. Por todo ello, se puede concluir que no existe ninguna variante de la solución proyectada que permita mantener la tipología de micropilotes con encepado en las condiciones reales del emplazamiento.

7.4 Análisis desde la perspectiva de Lean Construction

El caso analizado constituye un ejemplo de la problemática que Lean Construction busca prevenir mediante la gestión anticipada de restricciones y la planificación colaborativa. Su análisis desde este enfoque permite extraer conclusiones de alcance más amplio que la mera constatación de una incompatibilidad técnica.

Desde el punto de vista del modelo TFM, la incompatibilidad detectada habría representado, de no haberse identificado antes de ejecutar, un fallo simultáneo en las tres dimensiones de la producción. En la dimensión de transformación, la actividad de cimentación no habría podido ejecutarse conforme a lo planificado, generando retrabajo y rediseño. En la dimensión de flujo, la interrupción del proceso productivo habría generado esperas, replanificaciones y perturbación de la cadena de actividades dependientes, hormigonado y construcción de encepados, montaje de postes y colocación de paneles habría quedado parada. En la dimensión de valor, la solución proyectada no era ejecutable en las condiciones reales del emplazamiento, con lo que el resultado entregado al cliente no habría coincidido con el resultado diseñado. Que la incompatibilidad haya sido detectada antes de ejecutar ningún elemento de cimentación limita el impacto real a su dimensión mínima posible, pudiendo adoptar una solución alternativa sin necesidad de demoler o deshacer trabajo ejecutado. Desde la lógica del LPS (Last Planner System), una

problemática así debería haberse detectado y eliminada durante la fase de Planificación preliminar.

El principio Lean de genchi genbutsu, ir y ver con los propios ojos las condiciones reales antes de tomar decisiones. Un reconocimiento de campo del tramo afectado, realizado conjuntamente por el equipo redactor del proyecto y el equipo de obra antes del inicio de los trabajos, habría permitido detectar el muro existente, evaluar las dimensiones reales del callejón y verificar las condiciones de acceso para la maquinaria, de forma que la solución de cimentación pudiera diseñarse desde el inicio teniendo en cuenta las condiciones reales del emplazamiento. Este aprendizaje fundamenta la metodología de análisis de alternativas desarrollada en los capítulos siguientes, en los que la viabilidad constructiva real, y no únicamente la correctitud estructural teórica, es el criterio de evaluación principal.

8 PROPUESTA DE ALTERNATIVAS

8.1 Introducción y criterios de selección de alternativas

El análisis desarrollado en el capítulo anterior concluye con el descarte definitivo de la solución de micropilotes con encepado prevista en proyecto, al quedar demostrada su inviabilidad constructiva de carácter sistémico en el tramo PK 477+423 – PK 477+592. Este descarte obliga a identificar soluciones alternativas que sean técnicamente ejecutables en las condiciones reales del emplazamiento y que garanticen simultáneamente el cumplimiento de las exigencias acústicas, estructurales y operativas de la infraestructura.

El espacio de soluciones posibles queda acotado por los condicionantes físicos y normativos descritos en los capítulos 6 y 7. La presencia del muro de contención existente y su estado deficiente, el ancho libre del callejón de 250 cm de media, la proximidad de la línea convencional en servicio a 7 m del eje de vía y las restricciones operativas de ADIF. Cualquier alternativa viable debe responder a alguna de las dos estrategias siguientes, sustituir la tipología de cimentación por otra compatible con las condiciones del subsuelo y del espacio disponible, manteniendo la pantalla en su posición original o próxima o replantear íntegramente la posición de la pantalla, desplazándola a un emplazamiento donde los condicionantes de subsuelo y espacio sean superables.

A partir de estas dos estrategias se identifican tres alternativas técnicamente diferenciadas.

- Alternativa 1: que responde a la primera estrategia, propone sustituir los micropilotes por pilotes convencionales de mayor diámetro.
- Alternativa 2: también dentro de la primera estrategia, plantea la instalación de minibarreras de baja altura próximas al carril.
- Alternativa 3: que responde a la segunda estrategia, propone el desplazamiento de la pantalla al callejón con cimentación superficial de zapata corrida.

El presente capítulo describe conceptualmente cada alternativa, justifica su inclusión en el estudio y establece sus parámetros básicos de caracterización.

8.2 Justificación de la tipología de pantalla: mixta (metálica + metacrilato)

Con carácter previo a la descripción de las alternativas, procede justificar la tipología de pantalla adoptada en el presente estudio, que es común a las alternativas 1 y 3 y que coincide con la definida en el proyecto constructivo de referencia. Pantalla mixta de 5 m de altura total, con tramo inferior metálico absorbente de 3 m y tramo superior transparente de metacrilato PMMA de 2 m.

La altura de 5 m queda establecida a partir del estudio acústico revisado descrito en el apartado 6.4.4.

Desde el punto de vista acústico, la distribución de alturas responde a la naturaleza del ruido ferroviario, el tramo inferior metálico intercepta eficazmente las componentes de ruido de rodadura, que se emiten a baja altura en la zona de contacto rueda-carril, mientras que el tramo superior de metacrilato proporciona aislamiento suficiente frente a las componentes aerodinámicas que predominan a mayor altura sobre el material rodante. La

combinación de ambos materiales optimiza la eficacia acústica del conjunto en el rango de frecuencias relevante para los receptores del tramo.

Desde el punto de vista urbanístico, el tramo afectado discurre por el casco urbano consolidado de Carcaixent, con edificaciones residenciales colindantes al callejón. Una pantalla completamente opaca de 5 m de altura generaría un efecto de barrera visual que reduciría significativamente la luminosidad natural de las viviendas adyacentes y del espacio público. El tramo superior de metacrilato preserva la entrada de luz y las vistas, minimizando el impacto visual del conjunto y favoreciendo la aceptación social de la actuación en un entorno urbano sensible.

Desde el punto de vista constructivo, la solución metálica en el tramo inferior presenta una ventaja significativa respecto al hormigón prefabricado. Su menor peso por unidad de superficie reduce las cargas transmitidas a la cimentación y facilita el montaje con medios de elevación de pequeño formato, aspecto crítico dadas las restricciones de espacio y acceso del callejón. El análisis cuantitativo de estas ventajas se desarrolla en el apartado 9.

Por todo ello, la tipología mixta (metálica + metacrilato) constituye la solución de pantalla idónea para el tramo afectado, y su adopción en el presente estudio de alternativas es coherente tanto con las prescripciones del proyecto constructivo de referencia como con las condiciones específicas del emplazamiento.

8.3 Alternativa 1. Cimentación mediante pilotes convencionales

8.3.1 Descripción de la alternativa

La primera alternativa propone sustituir los micropilotes con encepado previstos en proyecto por pilotes de diámetro 650 mm, como solución de cimentación profunda para la pantalla acústica. La pantalla se mantiene en la alineación original proyectada, con la tipología mixta metálica y metacrilato de 5 m de altura descrita en el apartado anterior, y los perfiles HEB portantes se anclan sobre el encepado de hormigón armado en superficie mediante placa de anclaje, *Figura 49*.

La diferencia fundamental entre esta alternativa y la solución proyectada de micropilotes no reside únicamente en el diámetro, mayor en pilotes convencionales, sino en la concepción del sistema de transmisión de cargas. Esta alternativa, aunque requiera de maquinaria de mayor envergadura, permitiría anular uno de los principales inconvenientes al no atravesar el muro existente en casi ninguna parte del tramo.

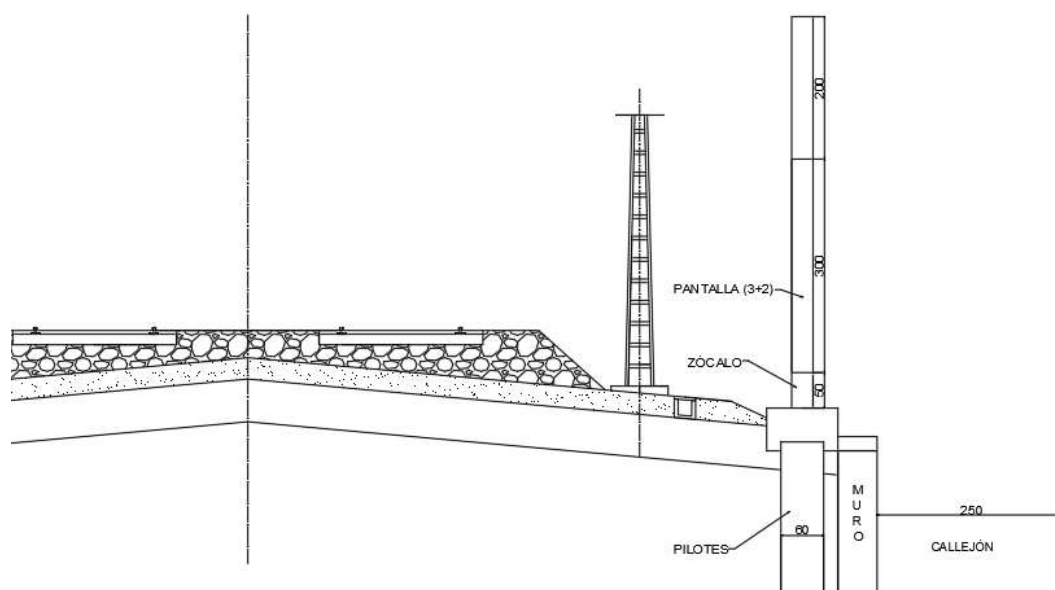


Figura 49. Alternativa 1. Cimentación mediante pilotes. Fuente: elaboración propia.

8.3.2 Condicionante específico. Interferencia de una viga con el muro existente

El análisis de la documentación de proyecto y del reconocimiento de campo permite identificar un condicionante técnico específico dentro de esta alternativa, los cuatro primeros pilotes del tramo afectado forman parte de la viga de cimentación, un elemento de atado que los conecta entre sí y cuya posición en planta coincide con la zona de mayor interferencia con el muro de contención existente. La ejecución de estos cuatro pilotes en su posición proyectada resulta inviable por la misma razón que los micropilotes, la interferencia directa con el cuerpo del muro.

Para resolver esta interferencia, estos pilotes deberían reposicionarse acercándolos a la plataforma ferroviaria, alejándolos del muro lo suficiente para poder ejecutarlos sin atravesarlo. Este reposicionamiento introduce, sin embargo, las restricciones operativas de ADIF asociadas a los trabajos en zona de influencia de la línea convencional en servicio, que se analizan en el apartado siguiente.

8.3.3 Condicionantes y restricciones de ejecución

La ejecución de los pilotes en la zona de influencia de la línea convencional en servicio, a aproximadamente 7 m del eje de vía, está sometida a las restricciones operativas de ADIF, que incluyen la obligación de obtener ventanas de mantenimiento de duración limitada, habitualmente entre 2 y 4 horas en horario nocturno, y el cumplimiento de las distancias mínimas de seguridad al eje de vía y a la catenaria de alta tensión. Además, el posicionamiento de equipos de perforación en esa zona exige el descargo de tensión de la catenaria.

A ello, se añade el riesgo de transmisión de vibraciones al terreno durante la perforación o la hinca, en un entorno donde el muro existente presenta un estado de conservación

deficiente. Las vibraciones inducidas por los equipos de perforación pueden generar asientos diferenciales o inestabilidades en el muro que comprometan la seguridad del talud ferroviario, riesgo que no puede cuantificarse sin un estudio geotécnico específico del comportamiento del terreno y del muro ante sollicitaciones dinámicas.

8.4 Alternativas 2. Minibarreras de baja altura próxima al carril

8.4.1 Descripción de la alternativa

La segunda alternativa plantea la instalación de minibarreras de baja altura en la proximidad inmediata de la línea convencional, sobre la banqueta de balasto, como solución que no requiere cimentación profunda ni encepado y resuelve así de raíz la incompatibilidad de cimentación identificada en el tramo. Las minibarreras, *Figura 50*, son sistemas modulares de entre 0,5 y 2,0 m de altura que, como se ha descrito en el apartado 5.7.7 del marco teórico, actúan directamente sobre el ruido de rodadura en la fuente, atenuando su emisión antes de que se propague al campo libre.

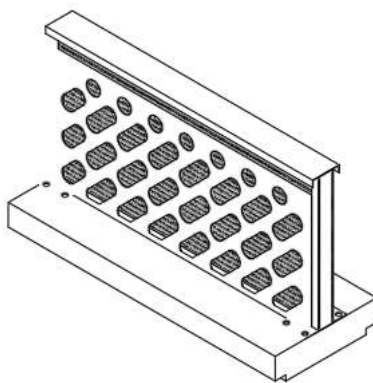


Figura 50. Minibarrera acústica. Fuente: Acustrain.

Durante el análisis de posicionamiento de esta alternativa se evaluaron tres variantes:

- Minibarrera en el lado de la línea convencional, *Figura 51*.

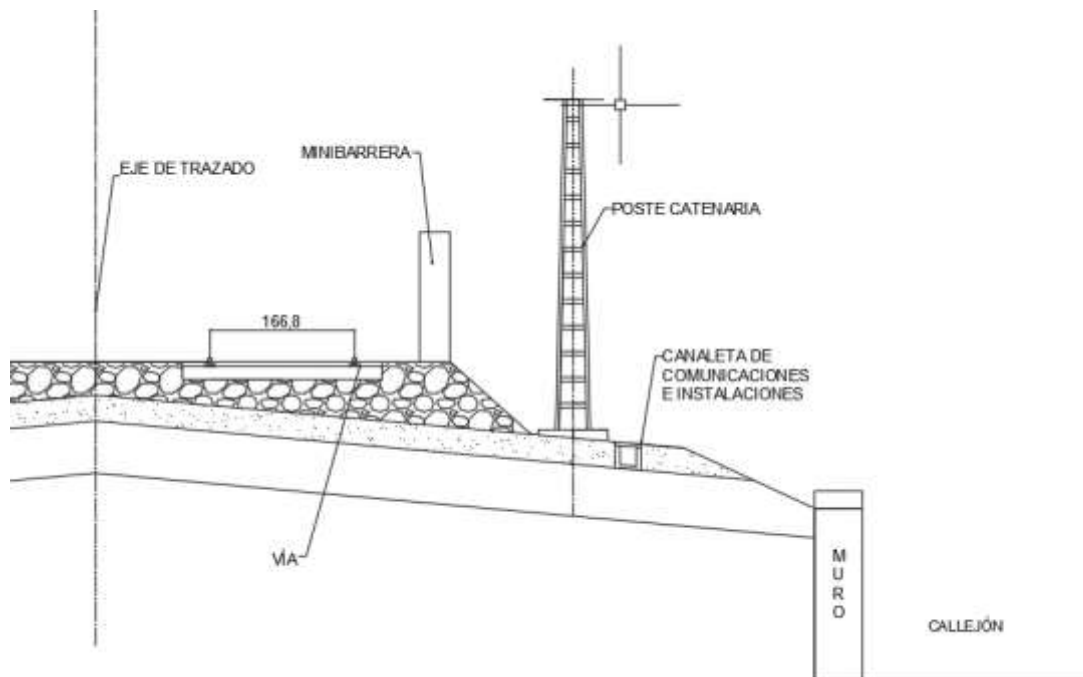


Figura 51. Esquema de implantación de minibarrera próxima a la línea convencional. Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

- Minibarrera en el lado de la línea de alta velocidad, **Figura 52.**

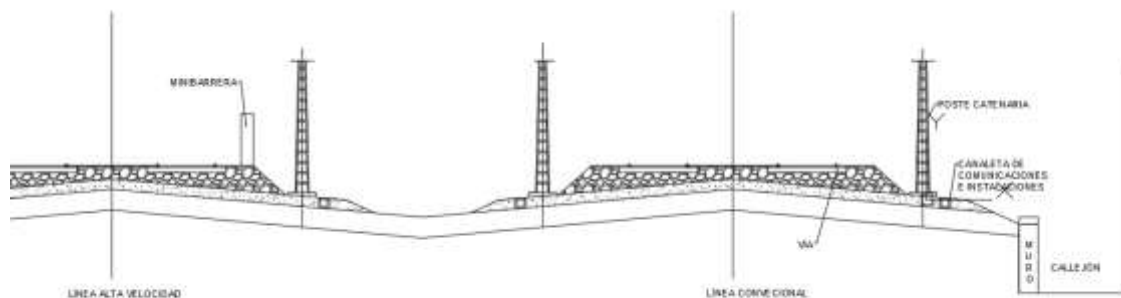


Figura 52. Esquema de implantación de minibarrera próxima a la línea AV. Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

- Minibarrera simultánea en ambas líneas, **Figura 53.**

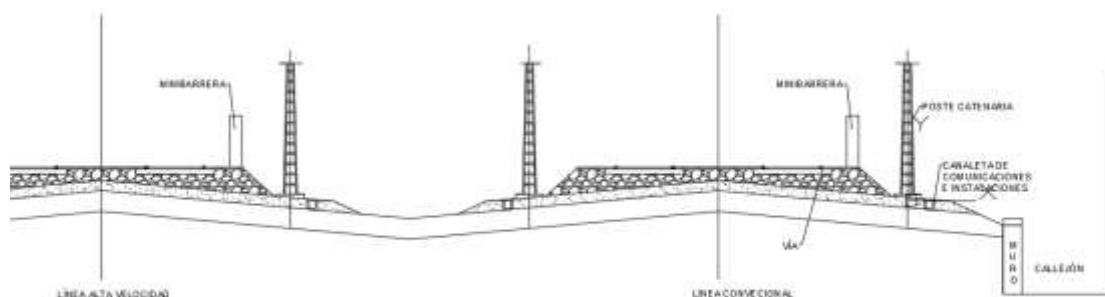


Figura 53. Esquema de implantación de minibarreras simultáneas. Alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

La variante en el lado de la línea de alta velocidad queda descartada por razones estructurales, las sobrepresiones dinámicas generadas por el paso de trenes a 250 km/h o más, generan sobre los elementos próximos al carril solicitudes de magnitud muy superior a las presentes en entornos de velocidad convencional, para los que las minibarreras están concebidas y ensayadas. La variante de doble minibarrera en ambas líneas queda igualmente descartada, al no poder garantizarse la instalación en el lado AV por las razones anteriores.

Se adopta por tanto la variante de minibarrera en el lado de la línea convencional como la única técnicamente viable desde el punto de vista estructural, y es esta la que se analiza en la presente alternativa.

8.4.2 Condicionantes y restricciones de ejecución

La limitación principal de las minibarreras en el tramo afectado no es de naturaleza constructiva sino funcional y geométrica, derivada de dos factores independientes que se refuerzan mutuamente.

El primero es la insuficiencia acústica intrínseca de las minibarreras frente a las exigencias del emplazamiento. Como se ha descrito en el apartado 5.7.7 del marco teórico, las minibarreras actúan sobre el ruido de rodadura en la fuente, con atenuaciones variables según la altura a la que se mida, pero menores que la pantalla acústica establecida por proyecto. Esta eficacia, ya de por sí limitada, resulta insuficiente para garantizar el cumplimiento de los valores límite del RD 1367/2007 en los receptores del tramo, para los que el estudio acústico revisado establece la necesidad de una pantalla de 5 m de altura. A ello se añade que las circulaciones de alta velocidad generan una componente de ruido aerodinámico predominante por encima de 300 km/h, frente a la cual las minibarreras presentan una menor eficacia al generarse esta componente en las partes altas del material rodante.

El segundo factor es la imposibilidad física de instalar las minibarreras en su posición de funcionamiento óptima en el tramo afectado. La eficacia acústica de las minibarreras depende críticamente de su proximidad al carril, para que el efecto de atenuación en la fuente sea significativo, deben situarse a una distancia máxima de 1,5-2 m del eje de vía. Sin embargo, el tramo afectado se encuentra en la zona de salida inmediata de la estación de Carcaixent, un entorno en el que el margen de vía está estructuralmente ocupado por una concentración elevada de instalaciones ferroviarias fijas que hacen inviable esa posición, *Figura 54*.



Figura 54. Instalaciones ferroviarias, equipos y señales próximas a una estación de tren. Fuente: (Mikel Iturralde, n.d.)

La normativa técnica de ADIF establece que el gálibo de colocación de postes de catenaria es de 3,35 m del eje de vía al eje del poste, conforme a la NAE-107 de electrificación, con una separación entre postes consecutivos de aproximadamente 50 m en recta. Estos postes, presentes a lo largo de todo el tramo, ocupan el margen de vía en la posición aproximada donde deberían colocarse las minibarreras y disponen de sus propios gálidos de mantenimiento que deben quedar libres de obstáculos. A esto se añaden las balizas del sistema ASFA, *Figura 55*, que conforme a la NAS-840 de ADIF se concentran en la zona de salida de estación asociadas a las señales de salida de vías con parada comercial y se encargan de anuncio de señales y frenado automático.



Figura 55. Balizas ASFA. Fuente:(Mikel Iturralde, n.d.)

En zonas de estación con insuficiencia de gálibo en entrevías, la normativa prevé además la sustitución de postes individuales por pórticos rígidos o funiculares, *Figura 56*, conforme a la NAE-107, lo que añade aún más elementos estructurales en el margen de vía.



Figura 56. Pórtico rígido de catenaria. Fuente: (Carnicero López Co-Tutor et al., n.d.).

La presencia acumulada de todas estas instalaciones obliga a desplazar las minibarreras fuera de su posición de funcionamiento óptima para respetar los gálbos de mantenimiento reglamentarios, situándolas a distancias del carril superiores a las técnicamente admisibles para garantizar una atenuación significativa. Este alejamiento forzado reduce la eficacia acústica de las minibarreras por debajo incluso de los valores teóricos ya de por sí insuficientes, haciendo que la solución resulte doblemente inviable: por insuficiencia acústica intrínseca y por imposibilidad de implantación en la posición requerida para su funcionamiento.

Por todo ello, las minibarreras quedan descartadas como solución principal para el tramo afectado, no pudiendo garantizar el cumplimiento de los niveles de inmisión establecidos normativamente ni en su configuración teórica óptima ni en las condiciones reales de implantación del emplazamiento.

8.5 Alternativa 3. Zapata corrida en el callejón con reposicionamiento de la pantalla

8.5.1 Descripción de la alternativa

La tercera alternativa constituye un replanteamiento integral tanto de la tipología de cimentación como de la posición de implantación de la pantalla. La solución propone desplazar la pantalla acústica desde su alineación original en la coronación del talud ferroviario hasta el callejón adyacente, implantando una cimentación superficial continua de tipo zapata corrida de hormigón armado a lo largo de todo el callejón como elemento de apoyo y transmisión de cargas al terreno.

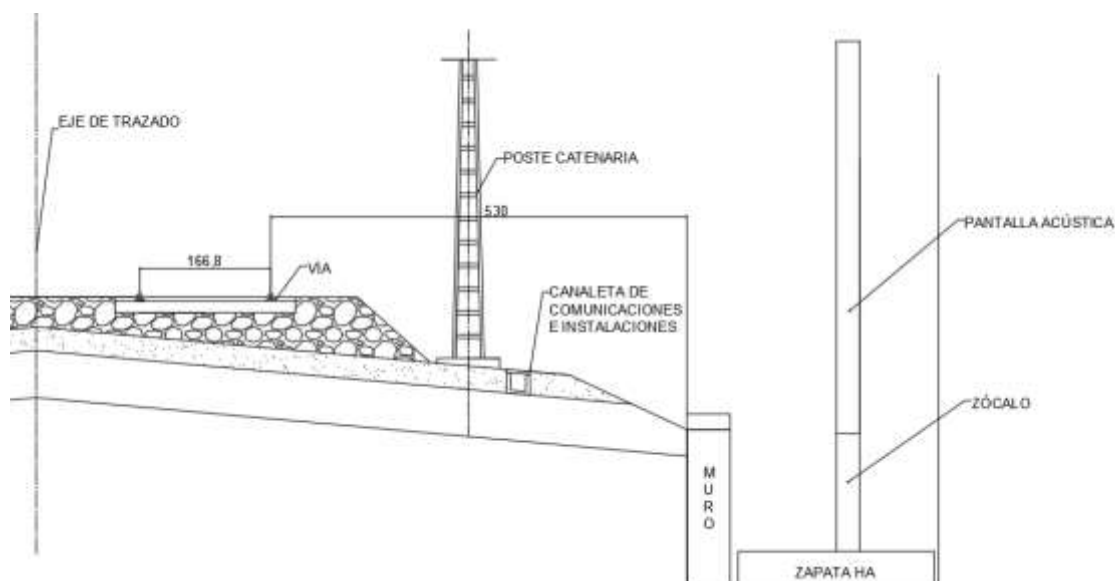


Figura 57. Esquema de implantación de zapata corrida. Alternativa 3. Fuente: elaboración propia.

Este desplazamiento elimina completamente la interferencia con el muro existente y resuelve simultáneamente los problemas de espacio para el encepado y de acceso de maquinaria desde la plataforma ferroviaria. Al tratarse de una cimentación superficial, su ejecución no requiere perforación ni hincas, simplemente de hormigonado y curado, operaciones completamente ejecutables con maquinaria de pequeño formato sin ninguna afección a la línea ferroviaria en servicio.

8.5.2 Compensación acústica. Zócalo de hormigón y postes de mayor altura

El desplazamiento de la pantalla desde la coronación del talud hasta el interior del callejón implica un incremento de la distancia entre la pantalla y la fuente sonora. Dicha separación, requiere una compensación geométrica que mantenga la atenuación necesaria en los receptores.

Esta compensación se articula mediante la incorporación de un zócalo de hormigón armado en la base de la pantalla, colocado sobre la zapata corrida, que eleva el punto de arranque de los paneles respecto al nivel de la calzada del callejón. El zócalo cumple una doble función, por un lado, incrementa la altura efectiva total del conjunto pantalla, por otro, actúa como masa pasiva que mejora el comportamiento dinámico del conjunto frente a las cargas de viento y las sobrepresiones generadas por el paso de los trenes de alta velocidad. Sobre la zapata corrida se anclan los perfiles HEB de mayor longitud que en la solución original, que soportan tanto el zócalo como los paneles de la pantalla, tramo metálico absorbente de 3 m y tramo de metacrilato PMMA de 2 m.

8.5.3 Proceso constructivo conceptual

La ejecución de esta alternativa se desarrolla íntegramente en el callejón, sin requerir actuaciones sobre la plataforma ferroviaria ni ventanas de mantenimiento de ADIF en ninguna de sus fases. El acceso de maquinaria se realiza por los extremos del tramo con equipos de pequeño formato. Las fases principales son, replanteo y hormigón de limpieza HA-15, colocación de armadura y hormigonado de la zapata corrida, montaje de los perfiles

HEB, ejecución del zócalo de hormigón armado e instalación de los paneles metálicos y las placas de metacrilato.

9 ANÁLISIS TÉCNICO, CONSTRUCTIVO Y ECONÓMICO DE LAS ALTERNATIVAS

El presente capítulo desarrolla el análisis en profundidad de cada una de las tres alternativas propuestas en el capítulo 8, evaluando su viabilidad técnica y estructural, su proceso constructivo con los condicionantes reales del emplazamiento y su coste económico a partir de los precios unitarios del Anejo de presupuesto del proyecto constructivo de referencia. Este análisis constituye la base sobre la que se fundamente la evaluación multicriterio del siguiente capítulo.

9.1 Análisis de la alternativa 1. Cimentación mediante pilotes convencionales

9.1.1 Viabilidad técnica y estructural

La Alternativa 1 plantea sustituir los micropilotes proyectados por pilotes convencionales de 650 mm de diámetro ejecutados desde la plataforma ferroviaria, manteniendo la pantalla en la alineación original proyectada. La conversión de micropilotes a pilotes se realiza a partir de las notas técnicas del proyecto de otras pantallas del mismo contrato, que recogen los cálculos del paso de micropilotes a pilotes, y tomando como referencia la pantalla inmediatamente posterior, la R380, cuya cimentación es de pilotes dobles según los planos de proyecto. En base a esta documentación, los encepados de 2×4 micropilotes se convierten en encepados de 2 pilotes, *Figura 58*, y los de 5×2 en encepados de 3 pilotes, *Figura 59*, manteniéndose los de 2×3 igualmente en 2 pilotes.

La verificación de la capacidad portante de los pilotes frente a los esfuerzos transmitidos por los postes, desarrollada en el Anejo 6, pone de manifiesto que los encepados de dos pilotes correspondiente al poste siguiente al extremo de la viga V-5 no verifica la condición de tracción. Con una separación entre pilotes de 1,60 m y un momento flector de diseño de 257,37 kNm, la carga de tracción resultante sobre el pilote más solicitado alcanza 120,58 kN, valor que supera ampliamente la capacidad admisible a tracción del pilote de 58,8 kN calculada en el Anejo 4 para un pilote de Ø650 mm y 6 m de longitud en terreno de terraplén plataforma antigua granular (RAG), con coeficiente de seguridad de 2,50 conforme al CTE. Como consecuencia, los encepados de los postes de la viga V-5 se incrementa de dos a tres pilotes, separados ±1,30 m respecto al eje de la pantalla. Con esta geometría, la carga de tracción sobre el pilote más solicitado queda reducida a 47,82 kN, por debajo de la capacidad admisible de 58,8 kN, por lo que la comprobación queda satisfecha. Este ajuste eleva el número total de pilotes de la Alternativa 1 de 68 a 70 unidades. Resulta en un total de 33 encepados, 39 postes y 70 pilotes para la totalidad del tramo, con perfiles HEB-340 iguales en todos los postes al quedar el tramo empotrado entre la pantalla anterior R351 y la posterior R380.

Desde el punto de vista estructural, la solución es válida. Los pilotes de 650 mm de diámetro transmiten las cargas de la pantalla al estrato competente y conectan con el encepado sobre el que se anclan los perfiles HEB. La profundidad de los pilotes se establece en 6 m, el estrato según el informe geotécnico del proyecto no es rocoso, no presenta nivel freático significativo y ofrece capacidad portante suficiente a esa profundidad, lo que facilita además la perforación y reduce los tiempos de ejecución por pilote. No obstante, se debe tener en cuenta la posibilidad de encontrar bolsas de agua, como ya se indicó en el apartado de geotecnia.

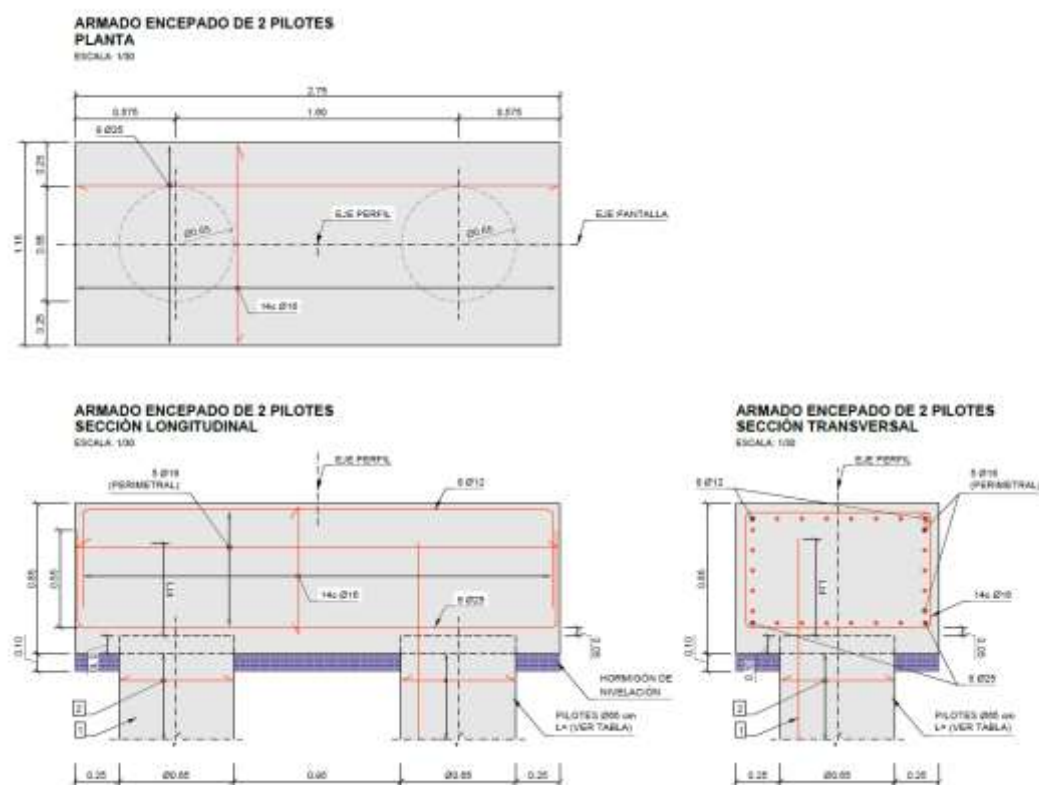


Figura 58. Croquis encepado de 2 pilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

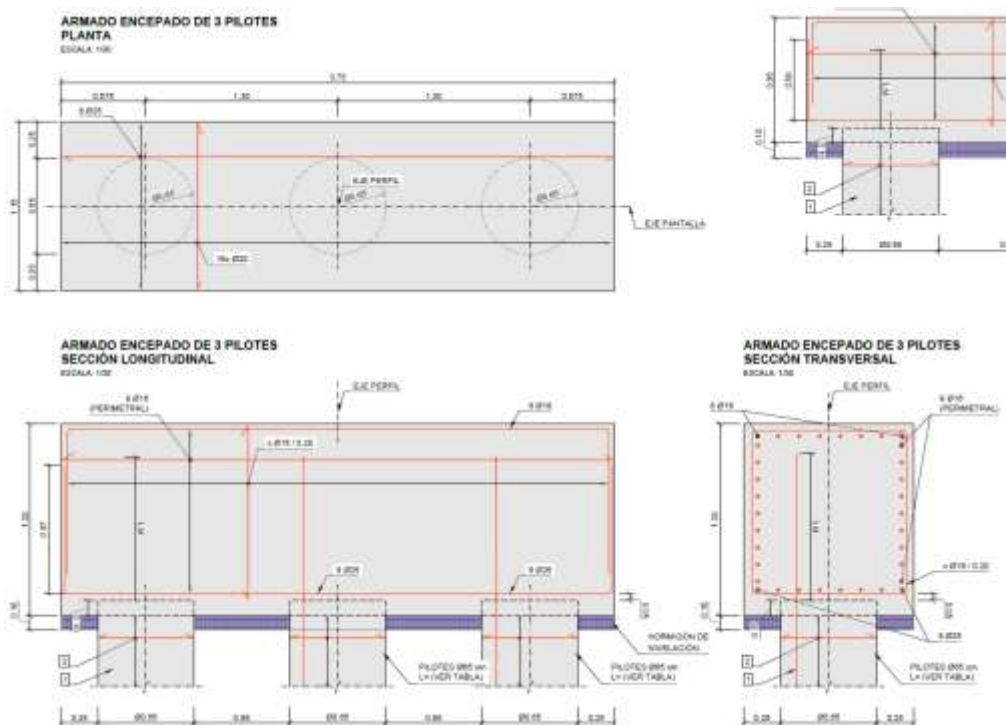


Figura 59. Croquis encepado de 3 pilotes. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

Sin embargo, el análisis técnico evidencia dos problemas de consideración en las condiciones reales del emplazamiento. El primero afecta a los seis pilotes de la viga de cimentación V-5, cuyos encepados tienen un ancho de 1,15 m y se sitúan con el eje del

encepado a 6,54 m del eje de vía según los planos de proyecto. Para que estos pilotes no incidan directamente sobre el muro preexistente, es necesario desplazarlos 0,57 m hacia la vía, lo que los introduce aún más en la zona de influencia de la línea convencional en servicio y añade condicionantes operativos específicos para su ejecución. El segundo problema es el riesgo de transmisión de vibraciones al muro durante la perforación: como se ha descrito en el apartado 7.3.1, el muro de gravedad de mampostería de piedra caliza en estado de conservación muy deficiente es especialmente vulnerable ante solicitaciones dinámicas, con riesgo de colapso parcial ante vibraciones de perforación incluso a distancias que en un muro de hormigón armado serían admisibles. A ello se suma que el muro presenta trasdós, se ensancha por su cara interior, hacia la vía, para ganar estabilidad, lo que implica que algunos pilotes del tramo podrían quedar rozando con esa parte trasera del muro incluso tras el reposicionamiento, aumentando el riesgo de afección estructural.

9.1.2 Análisis constructivo

El proceso de ejecución de los pilotes desde la plataforma ferroviaria está condicionado por las restricciones operativas de ADIF descritas en el apartado 6.4.3. Las ventanas de mantenimiento disponibles en la línea convencional Valencia-Xàtiva tienen una duración habitual de 2 a 4 horas en horario nocturno, durante las cuales debe realizarse el descargo de tensión de la catenaria, el posicionamiento del equipo de perforación, la perforación propiamente dicha, la colocación de la armadura tubular y la inyección de la lechada de hormigón.

Dado que los pilotes se ejecutan desde la vía y la distancia entre el eje de vía y los pilotes es de aproximadamente 4-5 m, resulta inviable operar directamente desde la plataforma existente con una pilotadora convencional a esa distancia. Se hace necesaria la construcción de una plataforma provisional de trabajo de 2 m de ancho a lo largo de toda la pantalla, entre la vía y la alineación de los pilotes, sobre la que se apoya y desplaza la pilotadora. Esta plataforma, ejecutada con balasto limpio y lámina de geotextil para proteger las canaletas de comunicaciones existentes, añade una fase previa de trabajo que también requiere ventana de mantenimiento de ADIF.

El proceso de ejecución se organiza en dos operaciones diferenciadas que pueden solaparse en ventanas consecutivas para optimizar el rendimiento: perforación en una ventana y colocación de la armadura y hormigonado. Considerando un rendimiento real de 2 pilotes por ventana nocturna, factible dado que el estrato no es rocoso ni presenta agua, lo que facilita la perforación, y un total de 68 pilotes, serían necesarias aproximadamente 35 ventanas de mantenimiento. A una frecuencia de 4 ventanas semanales, el plazo de ejecución de la cimentación se extendería entre 8 y 9 semanas, sin contar imprevistos ni las fases de montaje de postes, encepados y paneles ni tampoco los retrasos por condiciones meteorológicas adversas o modificaciones del programa de circulaciones.

El conjunto de la pantalla queda definido por 33 encepados, 39 postes y 38 vanos, con perfiles HEB-340 uniformes en toda la alineación. Los seis primeros pilotes, los de la viga V-5, requieren un tratamiento específico por su reposicionamiento de 0,57 m hacia la vía, debiendo coordinarse su ejecución con especial atención al estado del muro adyacente.

9.1.3 Análisis económico

La estimación económica de la Alternativa 1 se ha elaborado tomando como referencia el Documento nº4 del proyecto constructivo, adaptando las mediciones y partidas de la pantalla R358-R376 a la geometría definida en los apartados anteriores: 70 pilotes de 650 mm de diámetro y 6 m de profundidad, 33 encepados, 39 postes HEB-340 y 156 m de pantalla mixta de 5 m de altura. Para las partidas de estructura se ha tomado como referencia la pantalla R380, ya que es la más cercana con tipología de pilotes convencionales comparable. Las partidas de señalización y balizamiento nocturno se han mantenido iguales a las de la R358-R376 al tratarse de la misma tipología de trabajo desde vía en horario nocturno.

El presupuesto incluye todos los materiales y medios auxiliares propios de la ejecución nocturna, plataforma provisional de trabajo de 2 m de ancho a lo largo del tramo, geotextil de protección de canaletas y señalización específica para trabajo nocturno en zona ferroviaria, que son costes directamente asociados a la tipología constructiva de esta alternativa. No se incluyen los recargos por gastos generales ni beneficio industrial para la obtención del Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC), tampoco se han tenido en cuenta los sobrecostes derivados del rendimiento ni los costes de piloto de vía y responsable de circulación que serían necesarios.

Tabla 8. Presupuesto de ejecución material de la alternativa 1. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 1	Tierras y plataforma
	19.046,28€
Capítulo 2	Estructura
	314.883,50€
Capítulo 3	Pantalla
	192.465€
Capítulo 4	Señalización y balizamiento
	2.397,8€
Total	528.792,58€

9.1.4 Conclusión de la alternativa

El análisis técnico, constructivo y económico de la Alternativa 1 permite caracterizarla de forma completa en sus aspectos fundamentales.

Desde el punto de vista técnico, la sustitución de micropilotes por pilotes convencionales de 650 mm de diámetro es una solución estructuralmente válida que resuelve la incompatibilidad del encepado y aprovecha las condiciones favorables del terreno, estrato

no rocoso y ausencia de nivel freático significativo. Sin embargo, el condicionante técnico de mayor gravedad de esta alternativa no es de carácter estructural sino de seguridad. La ejecución de los pilotes mediante perforación rotatoria en las proximidades del muro de contención preexistente introduce un riesgo de transmisión de vibraciones al terreno que, dadas las características del muro, no puede considerarse admisible sin un estudio específico.

Como se ha descrito en el apartado 7.3.1, el muro es un muro de gravedad de mampostería de piedra caliza sin armadura, en estado de conservación muy deficiente, con pérdida de sección. Las consecuencias de un colapso parcial del muro no se limitan al propio elemento: el muro contiene el talud sobre el que se asienta la plataforma de la línea convencional en servicio, de modo que cualquier inestabilidad del muro podría comprometer directamente la seguridad de la infraestructura ferroviaria y de las circulaciones en curso.

A ello se añade el reposicionamiento necesario de los seis pilotes de la viga V-5, que requieren un desplazamiento de 0,57 m hacia la plataforma ferroviaria para evitar la interferencia directa con el muro, acercándolos aún más a la línea en servicio. Adicionalmente, el trasdós del muro, que se ensancha hacia la vía para ganar estabilidad, podría quedar rozando con alguno de los pilotes incluso tras el reposicionamiento, agravando aún más el riesgo de afección estructural al muro durante la perforación.

Desde el punto de vista constructivo, la alternativa exige la ejecución íntegra de los trabajos de cimentación desde la plataforma ferroviaria en horario nocturno, con una dependencia total del programa de ventanas de mantenimiento de ADIF. Las 35 ventanas necesarias para completar los 70 pilotes, a una frecuencia de 4 ventanas semanales, determinan un plazo de ejecución de la cimentación de entre 8 y 9 semanas, al que hay que añadir las fases de montaje de encepados, postes y paneles. La construcción previa de una plataforma provisional de 2 m de ancho a lo largo de los 156 m del tramo es una operación adicional que también requiere ventana de mantenimiento y que condiciona el inicio de los trabajos de perforación.

Desde el punto de vista económico, el Presupuesto de Ejecución Material de la Alternativa 1 asciende a 528.792,58 €, que aplicando el 9% de gastos generales y el 6% de beneficio industrial resulta en un Presupuesto de Ejecución por Contrata de 608.111,47 € sin IVA. Este importe incluye los materiales y medios auxiliares propios de la ejecución nocturna, plataforma provisional, geotextil y señalización nocturna, pero no recoge los posibles sobrecostos derivados de rendimientos inferiores a los previstos en condiciones de trabajo restringido ni los costes de coordinación continua con ADIF, que podrían incrementar el coste real de forma significativa.

Tabla 9. Resumen de ventajas y desventajas de la alternativa 1. Fuente: elaboración propia.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alternativa estructuralmente válida, integrada en el entorno ferroviario	Riesgo de vibraciones sobre el muro de mampostería en estado muy deficiente, con posible movimiento del talud ferroviario. Además, la ejecución

	de los pilotes podría rozar con el trasdós del muro.
Mantiene la pantalla en la alineación original, garantizando la eficacia acústica del proyecto.	Todo el proceso constructivo se debe realizar desde plataforma ferroviaria en horario nocturno y con descargo de catenaria.
Profundidad de pilotes de 6 metros gracias a las condiciones favorables del terreno, sin roca ni nivel freático.	Plazo de ejecución de aproximadamente 3 meses, utilizando 2 de ellos solamente para la realización de los pilotes.
Existencia de un proceso ejecutivo similar dentro del proyecto (pantalla R380)	Reposicionamiento de los 6 primeros pilotes (viga V-5) por interferencia con el muro.
	PEC 608.111,47€ más los sobrecostos operativos por nocturnidad y coordinación con ADIF no cuantificados.

9.2 Análisis de la alternativa 2. Colocación de minibarreras acústicas

9.2.1 Viabilidad técnica y estructural

A diferencia de las alternativas 1 y 3, la colocación de minibarreras implica un cambio en la tipología del elemento de protección. Por ello, antes de analizar los condicionantes constructivos y económicos de esta alternativa, es imprescindible evaluar su eficacia acústica en el contexto específico del tramo afectado.

Para evaluar correctamente la viabilidad acústica de las minibarreras, es importante recordar que el escenario de referencia no es la situación actual, con la línea convencional como única fuente, sino la situación futura con la línea de alta velocidad en servicio y sin ninguna medida correctora instalada. Es este el escenario sobre el que cualquier alternativa de protección acústica debe demostrar su eficacia, y es el que recoge la tabla de niveles acústicos calculados a 4 m de altura en fachada del Anejo 3 del proyecto constructivo.

En esa situación futura sin pantalla, los receptores del tramo afectado por la R358-R376 presentan superaciones de los valores límite establecidos en el RD 1367/2007 y la Ley 7/2002. En el Anejo 1, estudios acústicos, aparece la lista de todos los receptores afectados del proyecto, incluyendo los receptores residenciales más significativos del tramo estudiado, que a su vez se muestran en la *Figura 60* a continuación, con sus niveles obtenidos, límites aplicables y superaciones según el estudio acústico:

Figura 60. Niveles acústicos previsibles con la línea AV de los receptores significativos de la pantalla R358-370. Fuente: Anejo de estudio acústico de proyecto.

El RD 1367/2007 junto con la Ley 7/2002 establecen para el indicador LAFmax un valor límite de 85 dB en el exterior de edificios en suelo de uso residencial durante el periodo nocturno. Los receptores 358, 359, 365 y 376 del tramo afectado superan este límite en la situación futura sin pantalla con valores de hasta +8 dB, lo que significa que el nivel de pico por paso de tren supera significativamente la energía sonora admisible en esos puntos.

Una vez identificados los receptores que presentan una superación de los límites acústicos, se procede a estudiar la viabilidad de las minibarreras Acustrain, cuya eficiencia ha sido evaluada en condiciones reales mediante un ensayo realizado en colaboración con ADIF en el tramo Puçol-El Puig (PK 24.100-24.200) de la línea convencional Valencia-Barcelona, publicado en 2024-2025. El ensayo se llevó a cabo conforme a la especificación técnica europea CEN/TS 16272-7:2015 y la norma UNE-EN ISO 3095:2013, evaluando las pérdidas en seis posiciones de medición correspondientes a tres alturas (1,5 m, 4 m y 7 m) y dos distancias al eje de vía (7,5 m y 12,5 m) tal y como muestra la *Figura 61*.

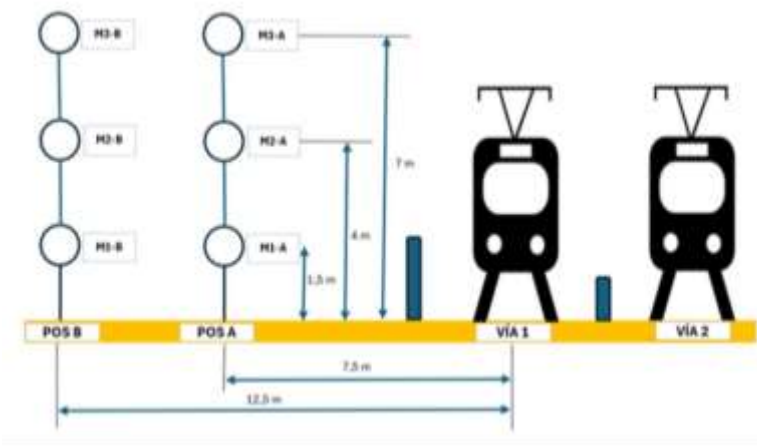


Figura 61. Realización de ensayos de minibarrera lateral. Fuente: Acustrain.

Este dato es relevante para la interpretación de los resultados, el ensayo se realizó en línea convencional, en condiciones equivalentes a las de nuestra posición de instalación, minibarrera junto a la línea convencional, por lo que sus resultados son directamente aplicables a la estimación de la eficacia de esta alternativa sobre el ruido de esa línea. No se han encontrado estudios sobre la colocación de minibarreras junto a una línea de alta velocidad, lo que constituye una de las razones por las que esta posición de instalación no ha sido considerada en el presente estudio.

Los resultados de la barrera lateral para todas las circulaciones, obtenidos del ensayo de Acustrain, *Figura 62*, son los siguientes:

Tabla 10. Niveles de reducción acústica de las minibarreras. Fuente: elaboración propia con datos de ensayo Acustrain.

Posición	Altura	Vía 1 Posición A	Vía 1 Posición B	Vía 2 Posición A	Vía 2 Posición B
M1	1,5m	11,4 dB	11dB	8,4dB	8,6dB
M2	4,0m	15 dB	17,4dB	8,8dB	12,2dB
M3	7,0m	3 dB	5,5dB	-0,5dB	0,5dB

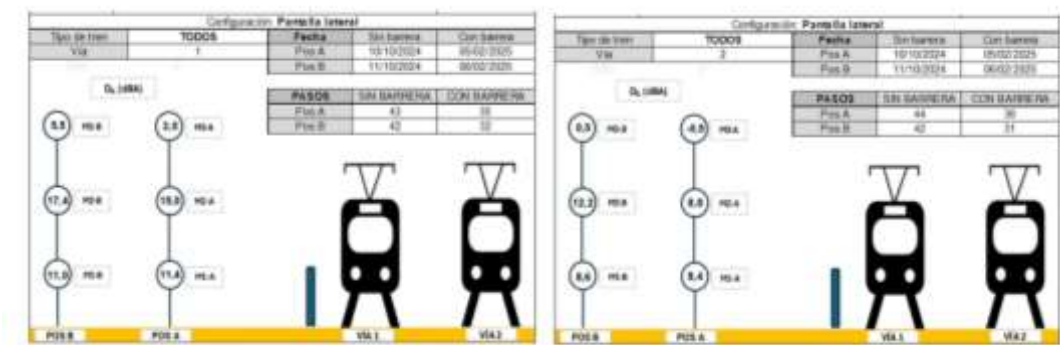


Figura 62. Resultados de ensayo de minibarrera lateral. Fuente: Acustrain.

A 7 m de altura del eje de la vía más alejada (Vía 2) en la posición A, la pérdida por inserción es de -0,5 dB, valor que dentro del margen de incertidumbre de la medición debe interpretarse como reducción nula. Este resultado confirma que la barrera lateral no tiene efecto significativo sobre el ruido procedente de la vía más alejada a grandes alturas, que es precisamente la configuración equivalente a la relación entre la minibarrera instalada junto a la línea convencional y el ruido aerodinámico procedente de la línea de AV en nuestro emplazamiento.

Estos resultados demuestran que la barrera lateral es eficaz sobre la línea junto a la que se instala, especialmente a 4 m de altura donde alcanza una pérdida de 17 dB, altura que corresponde aproximadamente a la planta baja y primera planta de los edificios residenciales colindantes. Sin embargo, la aplicación de estos resultados al tramo afectado presenta tres limitaciones fundamentales:

La primera es posicional y geométrica. La minibarrera se instala junto a la línea convencional y los resultados del ensayo son directamente aplicables a la atenuación del ruido de esa línea. Sobre la fuente dominante, la línea de alta velocidad, situada al otro lado de la plataforma a unos 25 m, la minibarrera ejercerá una reducción muy limitada, nula a grandes alturas como se observa en los resultados. Las ondas procedentes de la AV llegarán a la barrera ya muy atenuadas por la distancia, con un ángulo de incidencia desfavorable y con escasa interferencia de una minibarrera de 1,35 m de altura situada junto a la línea convencional. Esta reducción residual sobre el ruido de la AV no es cuantificable con los ensayos disponibles y en ningún caso puede garantizar el cumplimiento del LAFmax en los receptores más críticos del tramo.

La segunda es cuantitativa, incluso aplicando las pérdidas por inserción del ensayo al ruido de la línea convencional y asumiendo una reducción residual sobre la AV, los receptores 358, 359, 365 y 376 presentan superaciones del LAFmax de entre +5 y +8 dB que no pueden garantizarse resueltas con esta configuración.

La tercera y última, es específica del emplazamiento, el ensayo se realizó en un tramo alejado de estaciones con condiciones de implantación óptimas, mientras que en la zona de salida de la estación de Carcaixent la concentración de instalaciones ferroviarias impide mantener la posición óptima de funcionamiento de forma continua, reduciendo la eficacia real respecto a los resultados del ensayo.

9.2.2 Análisis constructivo

La instalación de minibarreras junto a la línea convencional es la alternativa constructivamente más sencilla de las tres propuestas. No requiere cimentación profunda ni encepado y permite opcionalmente su arriostramiento horizontal y vertical. Las minibarreras se anclan directamente sobre una losa de apoyo que, a su vez, se sitúa sobre la banqueta de balasto o sobre la plataforma ferroviaria mediante pernos de expansión.

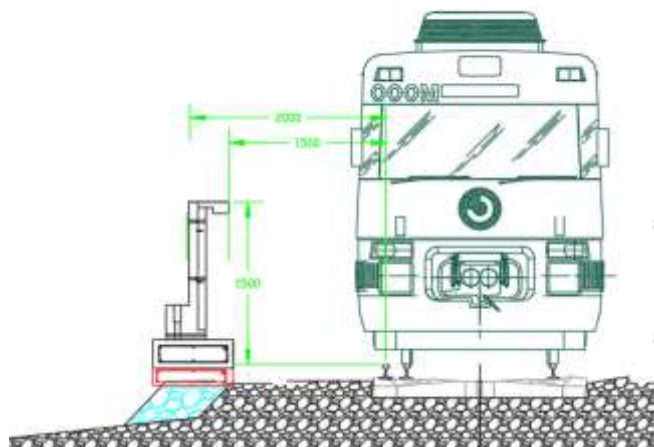


Figura 63. Instalación de minibarrera lateral junto vía convencional. Fuente: Acustrain

Todos los trabajos se realizan en jornada nocturna con corte de tensión de la catenaria, lo que requiere la coordinación con ADIF y la presencia de piloto de vía durante toda la operación. La complejidad de esta coordinación es significativamente menor a la de la Alternativa 1 al no requerir plataforma provisional ni perforación.

Los datos de rendimiento de instalación proceden del ensayo realizado por *Acustrain* en colaboración con ADIF en el tramo Puçol-El Puig. El equipo de instalación está formado por un camión grúa, cuatro operarios y un jefe de obra, alcanzando los siguientes rendimientos en ventanas de trabajo nocturno de 5 horas con corte de tensión de cinco horas efectivas:

- Preparación de la superficie de apoyo con aporte de material y losa de apoyo: 17ml/ventana.
- Montaje de barrera lateral: 34ml/ventana.

Estos datos ajustados a las ventanas de trabajo de 4 horas que se dan en la línea de estudio son, quedándonos del lado de la seguridad:

- Preparación de la superficie de apoyo con aporte de material y losa de apoyo: 13ml/ventana.
- Montaje de barrera lateral: 27ml/ventana.

El proceso de instalación se desarrolla en dos fases diferenciadas. La primera es la preparación de la superficie de apoyo, imprescindible para garantizar la correcta nivelación y estabilidad de las minibarreras, que con 156 m de tramo y un rendimiento de 13 ml/ventana requiere aproximadamente 12 ventanas de trabajo. La segunda es el montaje propiamente dicho de las barreras laterales, que con un rendimiento de 27 ml/ventana se necesitan aproximadamente 6 ventanas más de trabajo. Por lo tanto, el proceso completo precisa de unas 5 semanas de trabajo con una frecuencia de 4 ventanas semanales para su instalación.

El mantenimiento posterior de las minibarreras en entorno ferroviario requiere revisiones periódicas de los anclajes y de la integridad de los módulos, especialmente en un entorno con presencia de vibraciones inducidas por el paso continuado de trenes de AV.

El sistema incluye además piezas intermedias diseñadas para salvar obstáculos en vía tales como postes o arquetas, lo que en teoría permitiría sortear algunos de los elementos de infraestructura presentes en la zona de salida de estación, aunque como se ha analizado en el apartado 8.4.2, existe una elevada cantidad de instalaciones en este tramo. Estas piezas están diseñadas para salvar obstáculos puntuales en condiciones normales de línea, postes de catenaria cada 50 m y no para la densidad excepcional de instalaciones que existe en la zona de salida de la estación de Carcaixent, donde la concentración de elementos hace imposible mantener la posición óptima de funcionamiento de forma continua a lo largo del tramo y requiere alejar la minibarrera de su punto óptimo.

Además, es importante tener en cuenta, tanto en el proceso constructivo como el análisis económico, la posibilidad de localizar infraestructura enterrada en la zona de anclaje o zonas de trabajo como la puesta a tierra o las arquetas de comunicaciones.

9.2.3 Análisis económico

El presupuesto del proyecto constructivo no incluye partidas específicas para minibarreras acústicas en el tramo R358-R376. Para la estimación del coste de esta alternativa se combinan precios de mercado para las minibarreras con las partidas de demolición, reposición de arquetas y señalización y balizamiento nocturno extraídas directamente del Documento nº4 del proyecto constructivo.

El precio unitario de las minibarreras adoptado, 1474 €/m lineal, incluye el suministro y las piezas intermedias necesarias para salvar los obstáculos presentes en la zona de vía, postes de catenaria, cajas de relés, balizas y demás instalaciones ferroviarias, cuyo número exacto no puede verificarse sin un reconocimiento específico previo de la totalidad del tramo. Las dos arquetas de comunicaciones afectadas requieren demolición y reposición, operaciones cuyo coste se encuentra en el Documento nº4 del proyecto constructivo para la solución de proyecto de la pantalla.

Tabla 11. Presupuesto de ejecución material de la alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 1	Demolición y reposición de servicios
	1.217,91€
Capítulo 2	Pantalla
	229.944€
Capítulo 3	Señalización y balizamiento
	2.397,8€
Total (PEM)	233.559,71€

9.2.4 Conclusión de la alternativa

El análisis técnico, constructivo y económico de la Alternativa 2 permite identificar con claridad tanto sus aportaciones reales como sus limitaciones fundamentales en el contexto específico del tramo afectado.

Desde el punto de vista de lo que la alternativa sí aporta, los ensayos realizados por Acustrain en colaboración con ADIF Alta Velocidad en el tramo Puçol-El Puig demuestran que la barrera lateral es un elemento de eficacia acústica real y contrastada sobre la vía junto a la que se instala. Los resultados más significativos son los obtenidos a 4 m de altura y 7,5 m del eje de la vía más próxima, donde se alcanzan pérdidas por inserción de 17,4 dB, altura que corresponde aproximadamente a la planta baja y primera planta de los edificios residenciales colindantes, que son los receptores más críticos del tramo. Estos resultados son directamente aplicables a la atenuación del ruido de la línea convencional junto a la que se instala la minibarrera, produciendo una reducción real y cuantificable de los indicadores L_d y L_n en los receptores más próximos a esa línea.

Sin embargo, en el contexto específico del tramo R358-R376, estas prestaciones no son suficientes para garantizar el cumplimiento normativo completo por la combinación de tres factores. El primero es una combinación entre posicional y geométrica. Los resultados del ensayo para la vía más alejada, equivalente en nuestro emplazamiento a la línea de AV, muestran una reducción que cae drásticamente con la distancia y la altura. A 7 m de altura y 12,5 m del eje de la vía más alejada, la pérdida por inserción es de -0,5 dB, valor que dentro del margen de incertidumbre de la medición debe interpretarse como reducción prácticamente nula. Este resultado confirma que la barrera lateral no tiene efecto significativo sobre el ruido procedente de la vía más alejada a grandes alturas. Además, no existe ningún ensayo contrastado de minibarreras instaladas junto a una línea de alta velocidad que permita cuantificar su eficacia en esa posición, lo que impide evaluar con rigor la reducción sobre la fuente dominante desde la posición óptima y constituye una razón adicional por la que esa posición de instalación no ha sido considerada en el presente estudio.

El segundo es cuantitativo, incluso aplicando las pérdidas por inserción del ensayo al ruido de la línea convencional, los receptores 358, 359, 365 y 376 presentan superaciones del LAF_{max} de entre +5 y +8 dB procedentes fundamentalmente de la AV, sobre las que la minibarrera tiene una eficacia demostrada prácticamente nula según los resultados de la vía más alejada del ensayo.

El tercero es específico del emplazamiento, la concentración de instalaciones ferroviarias en zona de salida de la estación de Carcaixent impide mantener la posición óptima de funcionamiento de forma continua a lo largo del tramo, reduciendo adicionalmente la eficacia real respecto a los resultados del ensayo, que se obtuvieron en condiciones óptimas de instalación en un tramo alejado de estaciones.

Desde el punto de vista constructivo, la Alternativa 2 requiere aproximadamente 15 ventanas de mantenimiento nocturno con corte de tensión para la preparación de superficie y el montaje de las barreras laterales, con un plazo estimado de 4-5 semanas. Aunque más

sencilla constructivamente que la Alternativa 1, requiere igualmente coordinación con ADIF y presencia de piloto de vía en todas las ventanas.

Por último, la Alternativa 2 presenta el PEM más reducido de las tres alternativas analizadas, con 233.559,71€ el cual asciende a 268.593,67€ de presupuesto de ejecución por contrata sin IVA.

Tabla 12. Resumen de ventajas y desventajas de la alternativa 2. Fuente: elaboración propia.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No requiere de cimentación ni encepado por lo que elimina el problema de interferencia con el muro existente.	Falta de garantía frente al cumplimiento del LAFmax precedente del ruido aerodinámico de la AV.
Ejecución simple, sistema modular, ligero y sin necesidad de demolición.	La instalación en el lado de la AV se descarta por falta de ensayos y riesgo estructural no cuantificable de los anclajes frente a las sobrepresiones dinámicas que genera el paso del tren AV.
El plazo de ejecución es óptimo, unas 4-5 semanas si se consiguen 15 ventanas de trabajo nocturno.	Posicionamiento a unos 25 metros de la línea AV (fuente dominante) lo cual limita su eficacia. Según ensayos, la reducción es nula a 7 metros de altura en las vías alejadas.
El PEC más bajo de las tres alternativas, 268.593,67€.	Gran cantidad de instalaciones ferroviarias en la salida de la estación (postes, balizas, semáforos, cajas de relés) que interfieren en la colocación de la minibarrera.
Solución innovadora, con eficiencia acústica demostrada sobre la vía adyacente. Hasta 17dB de pérdida por inserción a 4 metros de altura (ensayo Acustrain).	Ejecución del proceso constructivo en jornadas nocturnas en coordinación de ADIF.
Bajo impacto ambiental durante la ejecución al requerir de menor volumen de materiales, además de menor impacto visual tras su colocación.	

9.3 Análisis de la alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata corrida

9.3.1 Viabilidad técnica y estructural

La Alternativa 3 plantea el desplazamiento de la pantalla acústica desde su alineación original en la coronación del talud ferroviario hasta el callejón adyacente, implantando una cimentación superficial continua de tipo zapata de hormigón armado como elemento de apoyo y transmisión de cargas al terreno. Esta solución elimina la interferencia con el muro de contención preexistente y resuelve a su vez las dificultades de ejecución desde la plataforma ferroviaria en horario nocturno, al desarrollarse la totalidad de los trabajos en el callejón sin afección a la línea en servicio.

La tipología de zapata corrida como solución de cimentación ante la imposibilidad de ejecutar micropilotes no es una solución nueva en el proyecto constructivo de referencia. Por ello, tanto los datos constructivos como los económicos están referenciados en las notas técnicas de otras pantallas del proyecto con características similares.

La zapata corrida se dimensiona con las siguientes características:

- Anchura: 2,00 metros de media, ya que debe ser variable según varíe la anchura del callejón. La anchura no ocupa la totalidad del callejón, sino que deja un hueco a cada lado para garantizar la continuidad de los drenajes existentes en las edificaciones traseras colindantes, cuya interrupción podría generar problemas de humedad en las medianeras. Esta dimensión es coherente con las solicitudes que debe aguantar de una pantalla de 5 metros, más el zócalo teniendo en cuenta otros escenarios similares.
- Canto: 0,80 m, igual al adoptado en el resto de las zapatas del proyecto.
- Longitud total de zapata: 146 m, distribuidos en dos tramos separados por el paso inferior de 10 m que divide el callejón. El tramo derecho de 60 m y tramo izquierdo de 86 m. En el paso superior no se ejecuta zapata al ser el punto de acceso al callejón y disponer de estructura propia.
- Hormigón: HA-30/B/20 y HL-15, conforme al cuadro de materiales del proyecto constructivo de referencia.
- Acero: B500SD, con control estadístico y coeficiente de seguridad 1,15 conforme al Código Estructural.
- Armado de referencia: Ø16 cada 0,15m en dirección longitudinal y Ø16 cada 0,20m en dirección transversal, *Figura 65*, en cara superior e inferior, adoptando el mismo criterio que las notas técnicas de referencia.

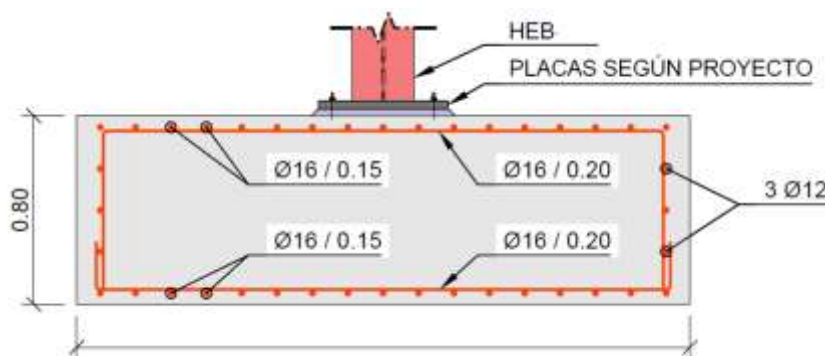


Figura 64. Zapata de referencia a ejecutar en la pantalla R358-R376. Fuente: proyecto constructivo de protección acústica de la nueva línea de AV del Levante.

- Recubrimiento mínimo: 40 mm para ambiente de exposición IIa conforme a la EHE-08.
- Tensión admisible adoptada: 2,00 kg/cm², valor normal para suelo medio. La tensión real transmitida en el caso pésimo, entre 0,80 y 0,88 kg/cm², valor que debe ser soportado holgadamente por cualquier suelo que no sea un terreno blando o relleno sin consolidar. Todo ello se estima en función de situaciones parecidas.

Por último, el desplazamiento de la pantalla al callejón implica que los postes HEB deben aumentar su altura para salvar la diferencia de cota entre el nivel del callejón y el punto de arranque de los paneles, además de la altura libre de pantalla de 5 m. La altura total del poste se define como:

$$H_{\text{Poste}} = H_{\text{Callejón}} + H_{\text{Pantalla}} - H_{\text{Zapata}} = 2,00 + 5,00 - 0,80 = 6,20\text{m}$$

Sobre la zapata se colocará un zócalo de hormigón armado que cumple una doble función, eleva el punto de arranque de los paneles respecto al nivel del callejón para que los paneles acústicos estén a la misma altura que en la solución original y mantener su eficacia, y actúa como masa pasiva que mejora el comportamiento dinámico del conjunto frente a las cargas de viento y las sobrepresiones por paso de trenes de alta velocidad. El proceso constructivo es el siguiente: primero se ejecuta la zapata con sus esperas, a continuación, se montan los postes HEB sobre dichas esperas, y finalmente se colocan los zócalos prefabricados y los paneles en cada vano situado entre dos postes contiguos.

9.3.2 Análisis constructivo

El proceso constructivo se desarrolla íntegramente en el callejón, en jornada diurna estándar y sin requerir ventanas de mantenimiento nocturnas, ni interrupción del tráfico ferroviario en ninguna de sus fases. No obstante, dado que el callejón se sitúa a aproximadamente 7 m del eje de la línea convencional en servicio, los trabajos se encuentran dentro de la zona de influencia ferroviaria definida por el RD 664/2015, por lo que se requiere la presencia de un piloto de vía durante la ejecución, además en la fase de montaje de postes y paneles se requerirá de coordinación con ADIF y corte de catenaria, enfundar el feeder, en el caso de que la maquinaria pesada trabaje próxima a la catenaria. Todas estas situaciones no condicionan el rendimiento ni el plazo de obra de forma significativa.

El callejón queda dividido en dos tramos independientes por un paso inferior, *Figura 65*, de 10 m que actúa como acceso al interior. El tramo derecho tiene una longitud de 60 m y el tramo izquierdo de 86 m, sumando una longitud total de zapata de 146 m. En el paso inferior no se ejecuta zapata al disponer de estructura propia y ser el punto de acceso y emplazamiento de la maquinaria de montaje.



Figura 65. Paso superior de la pantalla. Fuente: elaboración propia.

En el paso inferior no se ejecuta zapata corrida al tratarse de una estructura existente que da continuidad a una vía de tráfico rodado y peatonal que no puede interrumpirse. Esta singularidad constituye una limitación conocida y acotada de la alternativa: la continuidad estructural entre los dos tramos de zapata en esa zona requerirá una solución específica de empalme, que podrá basarse en cimentación puntual o en elementos de conexión al estribo del paso inferior.

El suelo del callejón ya cuenta con su respectiva capa de hormigón, por lo que no es necesaria ninguna excavación. El proceso de preparación del soporte consiste en el desbroce y limpieza de la superficie existente, seguido de la extensión de una capa de hormigón de limpieza HL-150 sobre la que se ejecuta directamente la zapata, de 2,00 m de anchura y 0,80 m de canto.

La zapata no se ejecuta como un elemento continuo hormigonado de una sola vez, sino mediante una secuencia de módulos independientes de aproximadamente 12 m de longitud, cada uno de los cuales comprende 3 vanos de 4 m y aloja 4 postes. Esta decisión tiene una justificación constructiva precisa, al ejecutar módulos cerrados en sí mismos, las armaduras se cierran dentro de cada módulo, trabajando de manera independiente, sin necesidad de prolongar las esperas para empalmar con el módulo siguiente, lo que simplifica la ferralla y reduce los tiempos y dificultad de montaje.

El proceso de ejecución se realiza en retroceso, avanzando desde el fondo de cada tramo hacia la entrada, de modo que la maquinaria y los materiales se introducen al inicio y van

retrocediendo conforme se hormigona cada módulo. Esto permite una secuencia de trabajo limpia y ordenada.

Para la ejecución de la zapata, un camión grúa de pequeño formato introduce desde el exterior del callejón, en retroceso, la armadura, los encofrados laterales y los materiales necesarios para cada módulo. El hormigonado se realiza mediante bomba estática posicionada en el exterior del callejón, cuyo largo alcance permite llegar a todos los puntos de los dos tramos sin necesidad de introducir ningún equipo de hormigonado en el interior.

El montaje de postes y paneles, al ser una fase posterior e independiente de la zapata, se realiza con una grúa de gran tonelaje, entre 100 y 300 toneladas en función del gálibo disponible, que se emplaza en el paso inferior. Desde esa posición central, la grúa alcanza los dos tramos: hacia la derecha los 60 m del tramo corto y hacia la izquierda los 86 m del tramo largo. Esta operación requiere la coordinación específica con ADIF para verificar que el radio de acción y la altura de trabajo de la grúa no invaden el gálibo de la catenaria de la línea convencional en servicio.

Tabla 13. Fases de ejecución de la cimentación superficial mediante zapata. Fuente: elaboración propia

Fase	Descripción	Duración aproximada (días)
1.- Replanteo	Replanteo topográfico de la alineación de la zapata en los dos tramos, verificación de cotas y trazado de ejes.	1
2.- Limpieza de la zona	Desbroce y limpieza del callejón. Sin excavación al existir suelo de hormigón.	2-3
3.- Hormigón de limpieza	Extensión de capa de hormigón de limpieza HL-150 sobre el suelo preparada. Superficie total: $146 \times 1,50 = 219 \text{ m}^2$	1
4.- Ejecución de la zapata	Montaje de armadura por módulos de 12 m, en total 8 módulos aproximadamente, en retroceso, encofrado lateral y hormigonado con bomba estática	12-15 + curado

	desde el exterior. Curado mínimo 7 día. Se hacen a la vez.	
5.- Montaje de los postes	Colocación de perfiles HEB-260/280 sobre las esperas de la zapata con grúa de gran tonelaje (100-300 t) emplazada en el paso inferior, alcanzando los dos tramos desde esa posición central. Coordinación con ADIF para verificación de gálibo de catenaria. En esta actividad se añaden las tareas de nivelación y mortero de los perfiles posteriores a su colocación.	3-4
6.- Colocación de zócalos	Montaje de zócalos de hormigón de 1,2 metro de altura y 3,93 metros de longitud con grúa de gran tonelaje desde el paso inferior.	2-3
7.- Instalación de los paneles	Montaje de paneles metálicos fonoabsorbentes (tramo inferior 3 m) y placas de metacrilato PMMA (tramo superior 2 m) con la misma grúa de gran tonelaje con la que se montan los zócalos desde el paso inferior.	4
	Total	40 días aprox.

9.3.3 Análisis económico

La estimación económica de la alternativa se realiza a partir de los precios unitarios del Documento nº4 del proyecto constructivo, aplicando los precios correspondientes a trabajos ejecutados desde exterior de vía sin recargo por horario nocturno, que son los aplicables al trabajo en callejón en jornada diurna y de las pantallas ejecutadas con zapata corrida. Las mediciones se basan en la geometría definitiva definida en el apartado 9.3.1: zapata corrida de 2,00 m × 0,80 m en dos tramos de 60 y 86 m respectivamente, sobre el callejón existente sin excavación.

Tabla 14. Presupuesto de ejecución material de la alternativa 3. Fuente: elaboración propia

Capítulo 1	Adecuación del terreno
	1.771,49€
Capítulo 2	Pantalla
	175.880,01€
Capítulo 3	Señalización y balizamiento
	319,28€
Total (PEM)	379.555,44€

El Capítulo 1 recoge los trabajos de adecuación del terreno, incluyendo el desbroce y limpieza de la solera existente del callejón y la extensión de la capa de hormigón de limpieza HL-150 sobre la que se ejecuta directamente la zapata, al no ser necesaria excavación alguna al existir solera previa. El Capítulo 2 engloba la totalidad de la estructura de cimentación y soporte: el encofrado lateral de la zapata, el hormigón armado HA-30 de la zapata corrida, el acero corrugado B500SD de la armadura y el acero laminado S275JR de los postes HEB. El Capítulo 3 comprende los elementos de pantalla propiamente dichos: los paneles acústicos mixtos metálicos y de metacrilato y el zócalo de hormigón armado sobre el que arrancan los paneles.

9.3.4 Conclusión de la alternativa

El análisis técnico, constructivo y económico de la alternativa permite caracterizarla como la solución que resuelve de forma integral la incompatibilidad constructiva identificada en el tramo R358-R376.

Desde el punto de vista técnico, la zapata corrida de 2,00 m de anchura media y 0,80 m de canto en hormigón armado HA-30/B500SD es una solución estructuralmente sólida, respaldada por notas técnicas de dimensionamiento de otras pantallas del mismo proyecto que demuestran su viabilidad. El desplazamiento de la pantalla al callejón elimina completamente el riesgo sobre el muro de contención existente y sobre la infraestructura ferroviaria en servicio, que son los condicionantes de mayor gravedad identificados en el análisis de las alternativas anteriores. La adopción de una anchura variable que respeta los

huecos de drenaje a cada lado garantiza además la compatibilidad de la solución con el entorno construido, preservando los sistemas de drenaje de las edificaciones colindantes. El zócalo prefabricado cumple una doble función estructural y acústica, elevando el punto de arranque de los paneles a la cota necesaria para mantener la eficacia de la pantalla equivalente a la solución original.

Desde el punto de vista constructivo, el proceso se desarrolla íntegramente en jornada diurna desde el callejón, sin dependencia del programa de ventanas de mantenimiento de ADIF y sin afección a la explotación ferroviaria en ninguna de sus fases principales. La ejecución por módulos independientes de 12 m en retroceso simplifica la ferralla, ordena el proceso productivo y permite un hormigonado eficiente mediante bomba estática desde el exterior. El emplazamiento de la grúa de gran tonelaje en el paso inferior como punto estratégico desde el que se alcanza la totalidad de los dos tramos resuelve de forma elegante la restricción de acceso del callejón. La presencia de piloto de vía y la coordinación puntual con ADIF para el izado son las únicas exigencias de coordinación ferroviaria, sin impacto significativo sobre el plazo total estimado de aproximadamente 40 días.

No obstante, presenta una limitación constructiva específica que debe mencionarse, el paso superior de 10 m que divide el callejón impide la continuidad de la zapata corrida en ese tramo, al tratarse de una estructura existente que da servicio a una vía de tráfico rodado y peatonal que no puede interrumpirse. Esta singularidad no invalida la alternativa, los dos tramos de 60 y 86 m son perfectamente ejecutables con zapata corrida, pero implica que la unión entre ambos tramos en la zona del paso inferior requerirá la búsqueda de una solución distinta de cimentación.

Desde el punto de vista económico, el Presupuesto de Ejecución Material asciende a 379.555,44€, lo que aplicando el 9% de gastos generales y el 6% de beneficio industrial resulta en un Presupuesto de Ejecución por Contrata de 436.488,76€ sin IVA. Este importe debe contextualizarse respecto a las otras alternativas: frente a la Alternativa 1, cuyo PEC es de 608.111,47€ sin incluir los sobrecostes operativos por trabajo nocturno y coordinación continuada con ADIF, la Alternativa 3 resulta económicamente más favorable en términos de coste real. Frente a la Alternativa 2, cuyo PEC es inferior pero que no garantiza el cumplimiento normativo del RD 1367/2007 en los receptores más críticos del tramo, la comparación carece de sentido al no ser soluciones equivalentes en su resultado final.

Tabla 15. Resumen de ventajas y desventajas de la alternativa 3. Fuente: elaboración propia.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Elimina totalmente la interferencia con el muro en estado deficiente existente y con ello, el riesgo de movimiento del talud o la plataforma ferroviaria.	Mayor volumen de hormigón debido a la construcción de la zapata y la necesidad de zócalo para salvar la altura del callejón.

Todos los trabajos se ejecutan en jornada diurna desde el exterior de la vía, sin necesidad de ventanas ADIF.	Necesidad de coordinación con ADIF para el descargo de la catenaria y obligación de presencia de piloto de vía durante toda la ejecución constructiva por la proximidad.
Garantiza el cumplimiento del criterio acústico mediante la compensación geométrica con zócalo y postes de mayor altura.	Requerimiento de una solución combinada por la presencia del paso superior que impide la continuidad de la zapata
Plazo de ejecución de aproximadamente 40 días hábiles.	Corte de vía rodante y paso peatonal para el emplazamiento de maquinaria pesada.
Tipología de cimentación ya utilizada y validada en el proyecto, por lo que existe una referencia.	El PEC es de 436.488,76€.
Tensión real transmitida al terreno en el caso pésimo, entre 0,37 y 1,16 kg/cm ² , muy por debajo de la tensión admisible de 1,85 kg/cm ² .	

9.4 Tabla resumen de las 3 alternativas.

Propiedades	Alt.1 – Cimentación profunda por pilotes	Alt. 2 – Minibarreras	Alt. 3 – Cimentación superficial mediante zapata
Tipología de cimentación	Pilotes, L=6m, Diámetro 650mm	Sin cimentación. Anclaje directo sobre el balasto	Zapata corrida. HA-30, 2,00x0,80m sobre el muro existente
Longitud total de la alternativa	146 m de pilotes + solución combinada en el paso superior, 10 m	156 metros	146 m de zapata por módulos+ solución combinada en el paso superior, 10 m
Número de elementos de cimentación	68 pilotes, 33 encepados y 39 postes HEB	78 módulos de minibarrera (2m/unidad)	Aproximadamente 12 módulos de 12 metros. 39 postes HEB
Posición de ejecución	Desde plataforma ferroviaria	Desde plataforma ferroviaria	Convencional, desde el exterior del dominio ferroviario
Jornada de trabajo	Nocturna (ventanas de ADIF)	Nocturna (ventanas de ADIF)	Diurna
Cumplimiento normativo RD 1367/2007 y Ley 7/2002	Si. Posición inicial de proyecto no modificada.	Parcial. No garantiza la reducción total a esa distancia de la línea de alta velocidad.	Si. Compensación geométrica mediante zócalo y postes de mayor altura.
Perfil	HEB-340	No aplica	HEB-340
Altura del perfil	5 m	No aplica	6,2 m
Altura de la pantalla	5 metros (3 m panel metálico + 2 m metacrilato)	1,2 m	6,2 metros (3 m panel metálico + 2 m metacrilato + 1,2 de zócalo)
Zócalo	No	No	Si
Riesgo sobre el muro existente	Alto. Vibraciones de perforación sobre el muro de mampostería en estado deficiente existente.	Nulo. Sin perforaciones, ni vibraciones sobre el muro.	Nulo. Sin perforaciones, ni vibraciones sobre el muro.
Descargo de catenaria	Si, enfundado del feeder	Si, enfundado del feeder	Si, enfundado del feeder
Plazo de ejecución	3-4 meses	4-5 semanas	1-2 meses
Singularidad constructiva	Paso superior de 10 metros de longitud. Requiere de una solución combinada (minibarreras o micropilotes)	Gran cantidad de infraestructuras ferroviarias a la salida de la estación.	Paso superior de 10 metros de longitud. Requiere de una solución combinada (minibarreras, pilotes o micropilotes)
PEM (Presupuesto de ejecución material)	528.792,58€	233.559,71€	379.555,44€
PEC (Presupuesto de ejecución por contrata)	608.111,47€	268.593,67€	436.488,76€

Sobrecostes operativos	Altos. Nocturnidad y necesidad de piloto de vía encargado de ADIF	Altos. Nocturnidad y necesidad de piloto de vía encargado de ADIF	Bajos. Piloto de vía de la propia empresa que ejecuta el proyecto.
Impacto de las obras sobre los vecinos	Alto. Ruido nocturno de la maquinaria (pilotadora, camión-grúa) sobre las edificaciones colindantes	Medio. Ruido nocturno de la maquinaria requerida para la colocación de los módulos, pero sin maquinaria de perforación.	Bajo. Jornada diurna, sin maquinaria de perforación.
Impacto visual	Alto. La pantalla próxima a las edificaciones residenciales	Bajo. La minibarrera de 1,2 metros no genera impacto visual	Muy alta. La pantalla de 5 metros de alto con el aumento por el zócalo.

10 EVALUACIÓN MULTICRITERIO

10.1 Metodología

El presente capítulo tiene por objeto seleccionar, mediante un análisis multicriterio estructurado, la alternativa de cimentación más adecuada para el tramo afectado de la pantalla R358-R376 entre las tres propuestas y analizadas. El análisis multicriterio es una herramienta utilizada en ingeniería civil que permite comparar alternativas de forma objetiva y transparente cuando la decisión depende de múltiples criterios de naturaleza heterogénea, como en este caso, y que no pueden reducirse a una única magnitud comparable.

La metodología empleada en el presente estudio se articula en torno a dos fuentes de valoración independientes y complementarias, cuya combinación aporta al análisis un grado mayor de objetividad al de un análisis realizado solo por la autora del estudio.

La primera fuente es un panel de expertos formado por siete profesionales de la empresa ejecutora con perfiles y experiencias diversas. Entre ellos se encuentran un jefe de obra, dos jefes de producción, un encargado de obra, el jefe de oficina técnica, el jefe de topografía y la autora del estudio, jefa de producción en prácticas. La diversidad de perfiles aporta distintos puntos de vista y lo acerca a la realidad de la toma de decisiones en obra.

La segunda fuente es una consulta a tres sistemas de inteligencia artificial (Claude, ChatGPT y Gemini) a los que se les dio toda la información técnica disponible y se solicitó una propuesta de ponderación de criterios razonada e imparcial. La inclusión de inteligencias artificiales como fuente de valoración responde a su capacidad de procesar grandes volúmenes de información técnica de forma sistemática y sin sesgos personales, aportando una perspectiva complementaria y nueva a la del panel de expertos humanos.

El peso final de cada criterio se obtiene como la media ponderada de ambas fuentes, asignando un 60% de peso al panel de expertos y un 40% a las inteligencias artificiales. Esta distribución, eleva el criterio profesional humano sobre el criterio por su experiencia y visión del proyecto, sin prescindir de la objetividad que aporta este último. El panel de expertos aporta un conocimiento gracias a su cercanía al caso de estudio, han visitado la zona, conocen el estado real del muro, han trabajado con maquinaria pesada y conocen las implicaciones y dificultades reales para coordinarse con ADIF. Todo ello, sumado a una larga carrera de experiencia hace que sus criterios deban tener un peso mayor, dejando a las inteligencias artificiales como un apoyo y verificación de la coherencia de los pesos dado por el panel de expertos.

10.2 Definición de criterios

Previamente a la definición de los criterios de evaluación, se procede justificar la exclusión de la viabilidad técnica como criterio de ponderación. En un análisis multicriterio convencional, la viabilidad técnica podría incluirse como un criterio más a evaluar y ponderar. Sin embargo, en el presente estudio su función es diferente y previa: la viabilidad técnica actúa como filtro de admisibilidad, no como criterio de comparación. Una alternativa

técnicamente inviable no puede ejecutarse en ninguna circunstancia, con independencia de su puntuación en el resto de los criterios. Por tanto, la viabilidad técnica determina qué alternativas entran en el análisis multicriterio, no cómo se puntúan dentro de él. Este criterio ha sido evaluado en el capítulo 9, donde se ha constatado que las tres alternativas propuestas son técnicamente posibles.

El análisis multicriterio se articula en torno a cinco criterios de evaluación que recogen las dimensiones más relevantes para la toma de decisiones en el contexto específico del proyecto:

- Seguridad y prevención: Evalúa el riesgo para las personas y para la infraestructura existente durante la ejecución y mantenimiento de cada alternativa. En el contexto específico del tramo afectado, este criterio recoge el riesgo de transmisión de vibraciones al muro de contención existente en estado deficiente, con riesgo de colapso y consecuencias directas sobre la estabilidad del talud ferroviario, la afección a la línea ferroviaria convencional en servicio, la exposición de los trabajadores a riesgos eléctricos por proximidad a la catenaria de alta tensión y las condiciones de trabajo en espacios reducidos como es el callejón. A todo ello se añade el factor de la nocturnidad, que en las alternativas que requieren ventanas de mantenimiento de ADIF introduce una capa adicional de riesgo, la reducción de la visibilidad y la presión del tiempo disponible en cada ventana. La Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales y el RD 1627/1997 de seguridad en obras de construcción establecen el marco normativo de referencia.
- Criterio acústico: Evalúa la capacidad de cada alternativa para garantizar el cumplimiento de los valores límite de inmisión establecidos en el RD 1367/2007, y la Ley 7/2002 para uso residencial, industrial, sanitario, docente o terciario, en los receptores del tramo afectado. Es el objetivo fundamental e irrenunciable de la actuación, una solución que no garantice el cumplimiento acústico no resuelve el problema que origina el proyecto, con independencia de sus ventajas en otros criterios. No obstante, ante la posibilidad de no encontrar una solución viable, una alternativa que no alcanza el cumplimiento normativo completo, pero sí reduce parcialmente los niveles de inmisión tiene un valor significativo como alternativa.
- Económico: Evalúa el coste de ejecución de cada alternativa como factor de decisión en el contexto de la obra pública. En el presente estudio, las estimaciones económicas disponibles corresponden al Presupuesto de Ejecución Material y al Presupuesto de Ejecución por Contrata obtenidos a partir de los precios unitarios del Documento nº4 del proyecto constructivo. Sin embargo, estos valores son no recogen en su totalidad los costes reales derivados de la coordinación continuada con ADIF, piloto de vía, gestión de las ventanas de mantenimiento, los pluses de nocturnidad aplicables al personal en las alternativas que requieren trabajo nocturno, ni los sobrecostes por rendimientos inferiores a los previstos en condiciones de trabajo restringido.
- Sostenibilidad e impacto ambiental: Evalúa el impacto ambiental de la actuación en términos de huella de carbono, generación de residuos, consumo de materiales y afección al entorno urbano consolidado de Carcaixent durante la ejecución. Incluye

también la dimensión social de la sostenibilidad: el impacto sobre los vecinos del callejón y del entorno inmediato durante los trabajos, ruido de maquinaria, vibraciones, horario de ejecución, es un factor relevante en un entorno residencial sensible. Se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible referenciados en el capítulo 4 del presente trabajo.

- **Plazo:** Evalúa la duración del proceso constructivo y su dependencia de factores externos condicionantes, en particular el programa de ventanas de mantenimiento de ADIF. En el contexto del tramo afectado, este criterio diferencia de forma determinante entre las alternativas que requieren trabajo nocturno con corte de circulaciones y las que pueden ejecutarse en jornada diurna sin restricciones ferroviarias.

10.3 Ponderación de criterios

10.3.1 Panel de expertos

A continuación, se presentan las propuestas de ponderación de criterios de cada miembro del panel de expertos con su justificación:

- **Jefe de obra**

Tabla 16. Ponderación de criterios - jefe de obra.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	50%
Criterio acústico	25%
Criterio económico	15%
Plazo de ejecución	5%
Sostenibilidad e impacto ambiental	5%
	100%

El jefe de obra le otorga un peso mayor a la seguridad, centrándose en el riesgo que existe con el muro en estado crítico. El criterio acústico ocupa el segundo lugar ya que es el objetivo fundamental del proyecto. El económico, el plazo y la sostenibilidad tienen pesos menores al entender que, si la solución no es segura y no cumple acústicamente, el resto de los criterios carecen de relevancia.

- **Jefe de producción**

Tabla 17. Ponderación de criterios - jefe de producción.

Criterio	Peso
-----------------	-------------

Seguridad y prevención	15%
Criterio acústico	30%
Criterio económico	20%
Plazo de ejecución	10%
Sostenibilidad e impacto ambiental	20%
	100%

Uno de los jefes de producción prioriza el criterio acústico entendiendo este como objetivo principal de la actuación. Además, le otorga un peso importante, tanto al criterio económico, ya que la solución en un proyecto debe ser viable en cuestión de presupuesto, como a la sostenibilidad por su convicción en la integración de la actuación en el entorno urbano. La seguridad y prevención, sin embargo, se quedan en segundo plano al considerar que muchas de las medidas vienen impuestas por la normativa a cumplir.

– Encargado de obra

Tabla 18. Ponderación de criterios - Encargado de obra.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	10%
Criterio acústico	5%
Criterio económico	25%
Plazo de ejecución	50%
Sostenibilidad e impacto ambiental	10%
	100%

El encargado, otorga el mayor peso con diferencia al plazo, entendiendo que el tiempo de ejecución influye en todos los demás aspectos, más tiempo implica más coste indirecto, mayor exposición al riesgo y mayor afección al entorno. El criterio económico ocupa el segundo lugar, ya que en su experiencia siempre hay que intentar no perder en la actuación. La seguridad y la sostenibilidad tienen pesos similares y moderados, y el criterio acústico recibe el menor peso al entender que se intenta colocar la solución más eficiente dentro de las dificultades existentes.

– Jefe de producción

Tabla 19. Ponderación de criterios - jefe de producción.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	20%
Criterio acústico	15%
Criterio económico	30%
Plazo de ejecución	20%
Sostenibilidad e impacto ambiental	15%
	100%

El siguiente jefe de producción, distribuye los pesos de manera más equilibrada, destacando el criterio económico con una visión de rentabilidad en el proyecto. La seguridad y el plazo de ejecución se posicionan en segundo lugar, relacionando el criterio del plazo de ejecución como condicionante para que el criterio económico sea rentable.

– Jefe de producción en prácticas

Tabla 20. Ponderación de criterios - jefe de producción en prácticas.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	40%
Criterio acústico	30%
Criterio económico	15%
Plazo de ejecución	6%
Sostenibilidad e impacto ambiental	4%
	100%

Desde un punto de vista como ingeniera en formación y teniendo en cuenta que he desarrollado este estudio en profundidad, se le otorga más peso a la seguridad al ser consciente de los riesgos que implica trabajar en un entorno tan condicionado como el descrito. El criterio acústico ocupa el segundo lugar al ser el objetivo fundamental de la actuación.

– Jefe de oficina técnica

Tabla 21. Ponderación de criterios - jefe de oficina técnica.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	5%
Criterio acústico	5%
Criterio económico	35%
Plazo de ejecución	30%
Sostenibilidad e impacto ambiental	25%
	100%

El jefe de oficina técnica trabaja directamente con los números del contrato y la planificación económica de la obra, lo que explica que otorgue el mayor peso al criterio económico y al plazo. Desde su perspectiva, cualquier sobrecoste respecto al presupuesto adjudicado repercute directamente en el margen de la empresa, y los retrasos generan penalizaciones contractuales que pueden superar el coste directo de la alternativa.

– Jefe de topografía

Tabla 22. Ponderación de criterios - jefe de topografía.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	15%
Criterio acústico	20%
Criterio económico	30%
Plazo de ejecución	25%
Sostenibilidad e impacto ambiental	10%
	100%

El jefe de topografía, con una visión transversal del proyecto derivada de su trabajo en todas las fases de replanteo y control geométrico, prioriza el criterio económico y el plazo por encima del resto. El criterio acústico ocupa el tercer lugar al ser el objetivo que justifica la existencia del proyecto. La seguridad recibe un peso moderado, desde la convicción de que cualquiera de las alternativas puede ejecutarse de forma segura con los medios y protocolos adecuados.

Media de ponderación de criterios del panel de expertos:

Tabla 23. Matriz de ponderación del panel de expertos.

Criterio	Jefe de obra	Jefe de Prod	Encargado	Jefe de Prod.	Jef. Ofc. técnica	Jef. Top.	Jefe de Prod. (Práct)	Media
Seguridad y prevención	50%	15%	10%	20%	5%	15%	40%	22%
Criterio acústico	25%	30%	5%	15%	5%	20%	30%	19%
Criterio económico	15%	20%	25%	30%	35%	30%	15%	25%
Plazo de ejecución	5%	10%	50%	20%	30%	25%	6%	21%
Sostenibilidad e impacto ambiental	5%	20%	10%	15%	25%	10%	4%	13%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

10.3.2 Criterio de inteligencias artificiales

A continuación, se presentan las propuestas de ponderación de criterios que cada inteligencia artificial ha aportado con su justificación:

- Claude, (Anthropic. (2025). Claude (Versión Sonnet 4.6) , 2025).

Tabla 24. Ponderación de criterios - Claude.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	40%
Criterio acústico	25%
Criterio económico	15%
Plazo de ejecución	12%
Sostenibilidad e impacto ambiental	8%
	100%

La inteligencia artificial Claude justifica su alto peso al criterio de seguridad y prevención en estado crítico del muro y la proximidad a la línea de servicio, pero sin desvalorizar el criterio acústico el cual es el objetivo del proyecto. Sin embargo, deja en un segundo plano los otros tres criterios repartiendo el peso sobrante.

- Chat GPT, (OpenAI. (2025). *ChatGPT (Versión GPT-4)*, 2025).

Tabla 25. Ponderación de criterios - Chat GPT.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	30%
Criterio acústico	25%
Criterio económico	20%
Plazo de ejecución	15%
Sostenibilidad e impacto ambiental	10%
	100%

Chat GPT por su parte, aunque otorga el mayor peso a la seguridad, reparte de manera más equitativa los pesos de los criterios asociando los plazos con un mayor coste económico al tratarse de cortes de vía y trabajos nocturnos y aumentando el peso económico como criterio fundamental al tratarse una obra pública.

- Gemini, (Google DeepMind. (2025). *Gemini*, 2025).

Tabla 26. Ponderación de criterios - Gemini.

Criterio	Peso
Seguridad y prevención	25%
Criterio acústico	25%
Criterio económico	20%
Plazo de ejecución	15%
Sostenibilidad e impacto ambiental	15%
	100%

La inteligencia artificial Gemini, reparte de manera igualitaria el peso para los criterios de seguridad y el acústico dándoles mayor importancia al ser criterios decisivos e innegociables en una obra ferroviaria. Tampoco deja atrás el peso del criterio económico

con un 20% para poder valorar los sobrecostos nocturnos y divide en partes iguales el peso del criterio de plazo y de sostenibilidad.

Media de ponderación de criterios de las inteligencias artificiales:

Tabla 27. Matriz de ponderación de inteligencia artificial.

Criterio	Claude	Chat GPT	Gemini	Media
Seguridad y prevención	40%	30%	25%	32%
Criterio acústico	25%	25%	25%	25%
Criterio económico	15%	20%	20%	18%
Plazo de ejecución	12%	15%	15%	14%
Sostenibilidad e impacto ambiental	8%	10%	15%	11%
	100%	100%	100%	100%

10.3.3 Pesos finales ponderados

Los pesos finales otorgado a cada criterio se obtienen de la media ponderada de las dos fuentes de datos, con un peso del 60% para el panel de expertos y un 40% para las inteligencias artificiales:

Tabla 28. Matriz de evaluación multicriterio.

Criterio	Media del panel de expertos (60%)	Media de las las (40%)	Peso final
Seguridad y prevención	22%	32%	27%
Criterio acústico	19%	25%	21%
Criterio económico	25%	18%	22%
Plazo de ejecución	21%	14%	18%
Sostenibilidad e impacto ambiental	13%	11%	12%
	100%	100%	100%

10.4 Matriz de evaluación multicriterio

Una vez repartidos los pesos de cada criterio, se establece la matriz de evaluación multicriterio, donde las puntuaciones se establecen en un rango del 1 al 5. El 1 representa un comportamiento muy desfavorable de la alternativa frente al criterio y el 5 un comportamiento muy favorable. La puntuación ponderada de cada alternativa en cada criterio se obtiene multiplicando la puntuación por el peso correspondiente, y la puntuación total es la suma de las puntuaciones ponderadas en los cinco criterios.

Escala de puntuaciones:

- 1 – Muy desfavorable
- 2 – Desfavorable
- 3 – Aceptable
- 4 – Favorable
- 5 – Muy favorable

Una vez definidos los pesos, se evalúa el comportamiento de cada alternativa mediante una escala de puntuación del 1 al 5. Esta escala permite traducir a valores numéricos comparables las diferencias entre las alternativas, generando un proceso de selección objetivo. A continuación, se justifica la puntuación asignada a cada alternativa en cada criterio.

Seguridad y prevención:

- Alternativa 1. Cimentación profunda mediante pilotes: 1
- Alternativa 2. Colocación de minibarreras: 4
- Alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata: 5

La alternativa 1, recibe se considera que tiene un comportamiento muy desfavorable frente a la seguridad por el riesgo de transmisión de vibraciones al muro de mampostería en estado crítico, con posibles puntos de colapso lo que puede tener grandes consecuencias sobre la estabilidad del talud ferroviario, sumado a la nocturnidad y la exposición continuada a riesgos eléctricos. La alternativa 2, se considera segura de ejecutar, valorándola con un 4 por requerir trabajo nocturno con corte de tensión en zona ferroviaria. Por último, la alternativa 3, es la más segura ya que se ejecuta en su totalidad en jornada diurna y fuera de la vía de manera convencional, sin ninguna perforación ni vibración sobre el muro o la infraestructura ferroviaria.

Criterio acústico:

- Alternativa 1. Cimentación profunda mediante pilotes: 5
- Alternativa 2. Colocación de minibarreras: 3
- Alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata: 5

Las Alternativas 1 y 3 reciben la puntuación máxima por garantizar el cumplimiento normativo completo del RD 1367/2007 y la Ley 7/2002 en todos los receptores del tramo al igual que la solución de proyecto. No obstante, la alternativa 2, tiene un comportamiento

aceptable frente al criterio acústico al no garantizar su cumplimiento al 100%, sin garantizar reducir el LAFmax de todos los receptores, aunque si generando una reducción real y siendo mejor que la ausencia total de protección.

Criterio económico:

- Alternativa 1. Cimentación profunda mediante pilotes: 2
- Alternativa 2. Colocación de minibarreras: 5
- Alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata: 3

La alternativa 2, es la más económica, con una gran diferencia respecto a las otras dos alternativas, por ello se le otorga la mayor puntuación. Si diferenciamos entre la alternativa 1 y la 3, a simple vista no existe gran diferencia, sin embargo, hay que tener en cuenta que en la alternativa 1 se debe añadir los sobrecostes no cuantificados por nocturnidad y coordinación continuada con ADIF.

Plazo de ejecución:

- Alternativa 1. Cimentación profunda mediante pilotes: 1
- Alternativa 2. Colocación de minibarreras: 3
- Alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata: 4

La Alternativa 1 recibe la puntuación mínima por su dependencia de 34 ventanas ADIF nocturnas para la ejecución de los pilotes y un plazo de cimentación y montaje de postes y paneles de 8-9 semanas. La Alternativa 2 recibe una puntuación de 3, comportamiento aceptable, con 15 ventanas y 4-5 semanas de plazo. La Alternativa 3 recibe una puntuación de 4, no llegando a tener un comportamiento muy favorable por la limitación constructiva del paso inferior de 10 m que impide la continuidad de la zapata corrida y requerirá una solución de empalme adicional, aunque el plazo total estimado de 40 días en jornada diurna es favorable.

Sostenibilidad e impacto ambiental:

- Alternativa 1. Cimentación profunda mediante pilotes: 2
- Alternativa 2. Colocación de minibarreras: 4
- Alternativa 3. Cimentación superficial mediante zapata: 3

La alternativa 2 cuenta con una puntuación de 4 al ser la que menos volumen de materiales conlleva y por su ausencia de excavación así como su menor impacto visual. No obstante, no se puede considerar muy favorable al requerir de trabajos nocturnos que generan un impacto de ruido negativo sobre la población. Por otro lado, la alternativa 3, se considera aceptable al no generar ningún impacto nocturno sobre los vecinos, pero consumiendo grandes volúmenes de hormigón tanto en la zapata como en el zócalo y con un gran impacto visual. La Alternativa 1 recibe una puntuación de 2 por el alto consumo energético nocturno, la generación de residuos de perforación y el mayor impacto sobre la población durante la ejecución.

Tabla 29. Puntuación de cada alternativa según criterio.

Criterio	Peso (%)	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Seguridad y salud	27	1	4	5
C. Acústico	21	5	3	5
C. Económico	22	2	5	3
Plazo de ejecución	18	1	3	4
Sostenibilidad e impacto ambiental	12	2	4	3

10.5 Resultado y alternativa seleccionada

Tabla 30. Resultados finales de cada alternativa.

Criterio	Peso (%)	Alt 1		Alt 2		Alt 3	
		Puntuación	Ponderada	Puntuación	Ponderada	Puntuación	Ponderada
Seguridad y salud	27	1	0,27	4	1,08	5	1,35
C. Acústico	21	5	1,05	3	0,63	5	1,05
C. Económico	22	2	0,44	5	1,1	3	0,66
Plazo de ejecución	18	1	0,18	3	0,54	4	0,72
Sostenibilidad e impacto ambiental	12	2	0,24	4	0,48	3	0,36
Total	100%		2,18		3,83		4,14

Los resultados de evaluación multicriterio muestran que la alternativa 3, cimentación superficial mediante zapata en el callejón sería la más favorable con una puntuación de 4,14 puntos sobre 5, seguida de la alternativa 2, minibarreras, con 3,83 puntos y por último, la alternativa 1, cimentación profunda, con la puntuación más desfavorable de 2,18 puntos.

La alternativa 1, obtiene la puntuación más desfavorable por su comportamiento frente a los criterios de seguridad y el plazo de ejecución. El riesgo que genera la realización de esta alternativa, la transmisión de vibraciones a un muro de mampostería en estado crítico con consecuencias potenciales sobre la infraestructura ferroviaria en servicio, combinado con una dependencia total de 34 ventanas para la realización de los pilotes y un plazo de cimentación de 8-9 semanas, hacen de esta alternativa la menos adecuada para la pantalla estudiada, a pesar de su óptimo comportamiento acústico.

La alternativa 2, colocación de minibarreras, se coloca como segunda opción por su ventaja en el ámbito económico y por ser buena opción de cara a la sostenibilidad. Su bajo impacto visual, el coste reducido y su plazo de ejecución hacen de esta alternativa una posible solución. Sin embargo, su incapacidad para garantizar el cumplimiento del LAFmax en los receptores más críticos del tramo la descarta como solución principal para una actuación cuyo objetivo fundamental es precisamente garantizar ese cumplimiento normativo.

La alternativa 3 obtiene la puntuación más alta gracias a dos criterios con altos porcentajes de pesos, la seguridad y prevención con un 27% y el criterio acústico con un 21%. Es la única alternativa que elimina completamente el riesgo sobre el muro de contención preexistente, garantiza el cumplimiento normativo completo del RD 1367/2007 y la Ley 7/2002 en todos los receptores del tramo y no genera dependencia de ADIF para la coordinación de los trabajos nocturnos.

Por todo esto, la alternativa 3, zapata corrida en el callejón, es la seleccionada como solución en este estudio de alternativas para resolver la incompatibilidad constructiva identificada en la pantalla R358-376 de Carcaixent.

La solución seleccionada presenta una limitación constructiva conocida y acotada, la imposibilidad de ejecutar zapata corrida en los 10 m del paso inferior, cuya resolución mediante una solución de empalme específica corresponde a la fase de proyecto de ejecución. Esta limitación no modifica la valoración global de la alternativa ni invalida su selección como solución óptima para el conjunto del tramo afectado.

11 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

La evaluación multicriterio vista anteriormente determina que la solución óptima entre las estudiadas para la resolución de la incompatibilidad constructiva de la pantalla localizada en Carcaixent es, la alternativa 3, la colocación de la pantalla mediante una cimentación superficial de zapata.

En el siguiente apartado se desarrolla la justificación de la selección mediante su estudio técnico y estructural, exponiendo también la resolución de la singularidad constructiva del paso inferior y la viabilidad del proceso constructivo. Además, se incorpora un análisis desde la perspectiva de Lean Construction que permite analizar la problemática estudiada y optimizar el proceso de ejecución de la solución adoptada.

11.1 Justificación técnica y estructural

La zapata corrida de hormigón armado adoptada como solución de cimentación para la pantalla R358-376 en el tramo del callejón es una tipología estructuralmente sólida y técnicamente contratada en el contexto del proyecto constructivo de referencia. La existencia de notas técnicas para el dimensionamiento de otras pantallas con características similares, demuestran que esta tipología ha sido validada y ejecutada en otras pantallas del mismo proyecto frente a situaciones análogas de imposibilidad de ejecución de cimentación profunda. En ambos casos, el mismo equipo técnico dimensionó zapatas corridas de 0,80 m de canto con armado Ø16/0,15 en dirección longitudinal y Ø16/0,20 en dirección transversal, adoptando una tensión admisible del terreno de 2,00 kg/cm², con tensiones reales transmitidas en el caso pésimo de entre 0,80 y 0,88 kg/cm².

La zapata corrida adoptada para la R358-R376 presenta las siguientes características definitivas: anchura de 2,00 m de media, dejando huecos a cada lado para garantizar la continuidad de los drenajes de las edificaciones colindantes, canto de 0,80 m, hormigón HA-30/B/20/IIa, acero B500SD, recubrimiento mínimo de 40 mm para ambiente de exposición IIa conforme a la EHE-08 y armado en la armadura, tanto longitudinal como transversal, inferior de Ø16/0,15 y para la armadura superior Ø12/0,15. La longitud total de zapata es de 146 m, distribuidos en dos tramos de 60 m y 86 m separados por el paso inferior de 10 m.

El desplazamiento de la pantalla al callejón implica que los perfiles deben ser de 6,20 metros de altura, salvando la diferencia de cota entre la base del callejón y el punto de inicio de los paneles. Sobre la zapata se ejecuta, después de colocar los perfiles, un zócalo de hormigón armado prefabricado que eleva el punto de arranque de los paneles respecto al nivel de, callejón, evitando la pérdida de eficacia acústica derivada del alejamiento de la pantalla respecto a los receptores.

La tensión admisible de 2,00kg/cm² adoptada por similitud con las notas técnicas de referencias ha sido verificada de forma independiente para el emplazamiento de la zapata en la zona de Carcaixent. En el Anejo 4 se ha calculado la capacidad portante del terreno a partir de los parámetros geotécnicos del Anejo 3 para la unidad de terraplén plataforma antigua granular (RAG), identificada en este tramo. El resultado obtenido es de 1,85kg/cm²,

confirmando que el valor por similitud utilizado inicialmente es coherente con las condiciones reales.

De manera adicional, en el Anejo 6 se ha calculado la tensión real transmitida por la zapata por cada poste en función de su axil y momento flector. Los resultados obtenidos son de entre 0,37kg/cm² y 1,16kg/cm² todos ellos quedan por debajo de la capacidad portante admisible del terreno, 1,85kg/cm².

11.2 Solución para el paso superior

El paso inferior de 10 metros que divide el callejón es la única limitación de la solución adoptada. Al tratarse de una estructura existente que da continuidad a una vía de tráfico rodado y peatonal que no puede interrumpirse, no es posible ejecutar la continuidad de la zapata. Esta situación no invalida la alternativa escogida, pero si requiere una solución específica en este tramo.

Para escoger una solución alternativa habría que realizar estudios y ensayos de vanos de 5 metros. No obstante, como las solicitaciones serán mayores que las de un poste normal, se propone la ejecución de un pórtico con dos apoyos independientes, uno a cada lado del paso inferior, conectados mediante un dintel superior.

Esta solución no incorpora zócalo de hormigón con el objetivo de preservar el gálibo del túnel y garantizar el paso sin restricciones tanto de vehículos como de peatones. Dicha ausencia de zócalo no afecta a factor acústico ya que el paso inferior ocuparía su lugar y la continuidad de la pantalla en los tramos adyacente garantiza la protección de los receptores del entorno.

El dimensionamiento del pórtico para verificación de instalación de un vano de 5 metros de altura con su respectivo perfil está fuera del alcance del presente estudio de alternativa.

11.3 Justificación constructiva

El proceso constructivo de la solución adoptada responde de forma eficiente a los condicionantes de emplazamiento, minimizando las afecciones a la infraestructura ferroviaria en servicio y optimizando el uso de los medios disponibles en el callejón.

La ausencia de excavación ya que el callejón cuenta con una solera de hormigón existente, elimina la tarea de excavación de la cimentación ya que la propia solera actúa como soporte directo de la zapata tras su desbroce y limpieza.

Además, la ejecución por módulos independientes de aproximadamente 12 metros en retroceso simplifica la ferralla al cerrar armaduras dentro de casa módulo sin necesidad de realizar empalmes con el siguiente, ordena el proceso constructivo y permite un hormigona eficiente mediante bomba estática colocada en el exterior del callejón.

El emplazamiento de la grúa, próximo al paso inferior es la solución más eficiente para el montaje de los postes y los paneles. Desde esa posición central alcanza los 60 metros del tramo derecho y los 86 metros del tramo izquierdo completando la instalación de la pantalla desde un único punto de emplazamiento sin necesidad de reposicionamientos.

11.4 Aplicación de Lean Construction a la solución

11.4.1 Intersección de la incompatibilidad desde el modelo TFV

El modelo TFV de Koskela (1992), propone comprender la producción en la construcción desde tres perspectivas; Transformación, Flujo y Valor definidos en el marco teórico. A su vez la incompatibilidad estudiada constituye un ejemplo de fallo simultáneo de las tres perspectivas TFV, cuyo impacto no fue mayor gracias a su detección anticipada antes de la coordinación de trabajos, planificación del proceso y petición del material.

Si el fallo no hubiese sido detectado con antelación, en la perspectiva de Transformación, que representa el proceso por el cual la materia prima se convierte en el producto final, la actividad de cimentación no habría podido ejecutarse conforme a lo planificado, generando retrabajo, rediseño, lo que conlleva una pérdida de material y movilización de equipos sin producción efectiva. Por otro lado, el Flujo, que persigue la continuidad y velocidad del proceso, evitando retrasos, reduciendo esperas y variabilidad de la planificación, habría fallado por la obligación de parar la construcción de la pantalla y con ello, la cadena de actividades dependientes, generando esperas y alterando la programación de los trabajos. Por último, en la perspectiva de Valor, la solución proyectada no era ejecutable en las condiciones reales del emplazamiento, por lo que el resultado entregado al cliente no habría coincidido con el resultado diseñado poniendo en duda tanto su funcionalidad acústica como su seguridad estructural.

La detección de la incompatibilidad en la fase de acondicionamiento de la zona de trabajo, antes de ejecutar cualquier elemento, permite reducir al mínimo el impacto, pudiendo adoptar una solución alternativa sin necesidad de demoler ni deshacer trabajo ejecutado. Esta circunstancia es, desde la perspectiva Lean, el mejor resultado posible ante una incompatibilidad de proyecto no detectada en fase de diseño. No obstante, dicho fallo genera un cambio en la planificación global del proyecto y posiblemente una necesidad de reacondicionamiento de las zonas de trabajos posterior.

11.4.2 Principio Genchi Genbutsu

El principio Lean de Genchi genbutsu, trata de ir al lugar real y ver la cosa real. Es la herramienta que habría prevenido la incompatibilidad si hubiera sido aplicada en la fase de redacción de proyecto. Un reconocimiento de campo conjunto del tramo afectado por el equipo redactor y el equipo de obra antes del inicio de los trabajos habría permitido detectar el muro preexistente, evaluar las dimensiones reales del callejón, verificar el estado de conservación del muro y comprobar las condiciones de acceso para la maquinaria. Con esa información, la solución de cimentación podría haberse diseñado desde el inicio teniendo en cuenta las condiciones reales del emplazamiento.

Podemos concluir entonces, que el fallo inicial se encuentra en la fase de redacción del proyecto al no tener una visión de campo. Una vez comenzado el proyecto, el reconocimiento de campo realizado antes de proponer ninguna alternativa ha sido el punto de partida de todo el análisis, verificando in situ la geometría del callejón, el estado del muro, el acceso de maquinaria y la presencia del paso inferior. La información obtenida en campo ha condicionado directamente las dimensiones de la zapata, la solución de módulos

en retroceso, la elección del hormigonado con bomba estática y la decisión de emplear la grúa de gran tonelaje desde el paso inferior.

11.4.3 Aplicación del modelo TFM al proceso constructivo de la solución adoptada

Si analizamos la solución adoptada desde las tres dimensiones del modelo TFM, evidenciando cómo cada decisión tomada en el diseño del proceso responde a una lógica de optimización Lean.

Desde la perspectiva de Transformación la ejecución por módulos independientes de 12 m garantiza que cada actividad de ferralla, encofrado y hormigonado se completa dentro del módulo antes de iniciar el siguiente reduciendo la probabilidad de fallo frente a las incompatibilidades de armadura que se producirían en una zapata corrida ejecutada como elemento continuo con empalmes sucesivos.

Desde el punto de vista del Flujo, la planificación anticipada y la ejecución de módulos de zapata independientes hacen que ninguna actividad de ferralla, encofrado y hormigonado se quede a medias, ni se solape, terminando un módulo e iniciando el siguiente. Esta planificación aumenta el plazo de ejecución frente a la realización de una zapata corrida desde un punto de vista inicial, pero elimina el cruce de flujos de materiales y maquinaria dentro del callejón, garantizando una circulación unidireccional que minimiza las interferencias entre actividades concurrentes y evita pérdidas de tiempo o esperas. El hormigonado con bomba estática desde el exterior elimina la necesidad de introducir equipos de bombeo en el interior del callejón, reduciendo la congestión del espacio de trabajo y mejorando la continuidad del proceso. El emplazamiento único de la grúa de gran tonelaje en el paso inferior para el montaje de postes y paneles aumenta el coste, pero elimina los reposicionamientos y optimiza el tiempo de utilización del equipo.

Respecto al Valor, la solución adoptada cumple los tres requisitos del cliente. El objetivo principal, las exigencias acústicas en todos los receptores del tramo según el proyecto. Además, cumple con la ausencia de riesgo sobre la infraestructura ferroviaria existente y sus alrededores y su ejecución es posible en un plazo de tiempo compatible con la ejecución general de la obra.

11.4.4 Aplicación de Last Planner System en la ejecución de la solución adoptada

El Last Planner System (LPS) aporta el marco de planificación y control de la producción más adecuado para gestionar el proceso constructivo solución adoptada, caracterizado por la ejecución de módulos secuenciales en un espacio confinado con restricciones de acceso, coordinación con ADIF, ocupación de vía ferroviaria y manejo de maquinaria pesada.

Desde la perspectiva del LPS, la gestión anticipada de restricciones es especialmente relevante en este proceso. Las restricciones identificadas son de tres tipos:

- De acceso, el camión grúa y la bomba estática deben posicionarse y retirarse de forma coordinada con el avance de los módulos, además de necesitar una ocupación de la vía.
- De coordinación ferroviaria, la presencia del piloto de vía y la coordinación puntual con ADIF deben gestionarse con antelación suficiente para no interrumpir el flujo de

trabajo.

- De coordinación interna, el trabajo en retroceso hace necesaria una mayor coordinación interna de actividades.

A continuación, se muestra una tabla con los 5 niveles del LPS adaptados a la ejecución de la solución:

Tabla 31. Niveles LPS adaptados a la solución adoptada del estudio.

Nivel	Horizonte	Objetivo principal	Agentes implicados
Programa Maestro	Proyecto completo (1-2 meses)	Establecimiento de los hitos generales teniendo en cuenta el acuerdo inicial con ADIF sobre la coordinación necesaria.	Dirección del proyecto y el jefe de obra.
Planificación de fases	1-3 semanas	Planificación de las actividades y su secuenciación, así como distribución de los recursos compartidos.	Jefe de obra, jefes de producción y encargados.
Planificación intermedia	1-2 semanas	Planificación del trabajo ejecutable a nivel semanal, pero con 2 semanas de antelación. Se identifican restricciones y problemas que afecten al trabajo semanal.	Jefe de producción y encargado
Planificación semanal de trabajo	1 semana	Se preparan y organizan las tareas que no tienen restricciones. Además, se realiza una medición del PPC semanal.	Encargado, equipo de ejecución del proceso
Aprendizaje	Semanal (continuo)	Análisis de los errores y las causas de incumplimiento del PPC (Porcentaje de Plan Completado).	Todo el equipo de obra

Tras la presentación de los cinco niveles del LPS aplicados al proceso, se desarrolla a continuación el contenido específico de las reuniones asociadas a cada nivel de planificación.

El Programa Maestro se materializa en una reunión inicial entre el jefe de obra y la asistencia técnica del proyecto, en la que se expone la solución adoptada, la base de cálculo y los criterios estructurales que la sustentan, verificando la conformidad del calculista con la solución propuesta. Esta reunión permite coordinar con la asistencia técnica cualquier modificación necesaria antes de iniciar la planificación de fases, garantizando que la solución que se va a ejecutar cuenta con el respaldo técnico necesario.

La Planificación de fases es una reunión de coordinación de equipo en la que participan el jefe de obra, los jefes de producción y los encargados, con el objetivo de definir qué fase del proceso constructivo asume cada jefe de producción y cada encargado, cómo se superponen las actividades entre sí y qué secuencia de fases debe respetarse. En este nivel se establece el reparto de responsabilidades y la coordinación general entre los distintos equipos de trabajo que intervendrán en el proceso.

La Planificación intermedia se desarrolla mediante reuniones del jefe de obra con cada encargado o jefe de producción responsable de su fase correspondiente, en las que se identifica lo que es necesario para poder ejecutar el trabajo planificado. Este nivel permite identificar y eliminar las restricciones con la suficiente antelación para que no se conviertan en causas de interrupción del proceso constructivo, preparando el trabajo de forma que llegue libre de restricciones al nivel semanal.

La Planificación semanal de trabajo es la reunión en la que el jefe de producción y el encargado reparten semanalmente los trabajos entre los distintos grupos de ejecución, grúas, ferralla, encofradores, mano de obra, asignando las tareas que no presentan restricciones pendientes. Este nivel permite conocer el Porcentaje de Plan Completado y registrar las desviaciones producidas respecto a lo comprometido, constituyendo la base del control semanal del proceso.

La aplicación sistemática del LPS a este proceso, con sus cinco niveles de planificación, desde el plan maestro hasta los compromisos semanales, y, la medición continua del PPC, constituye la herramienta más eficaz para garantizar que el plazo estimado de 40 días hábiles se cumple en las condiciones reales del emplazamiento, con la variabilidad inherente al trabajo en un callejón urbano con restricciones de acceso y coordinación ferroviaria.

12 CONCLUSIONES

El presente estudio ha abordado el análisis y resolución de una incompatibilidad constructiva real, identificada durante la ejecución de un proyecto de protección acústica del nuevo acceso ferroviario de alta velocidad de Levante en el municipio de Carcaixent (Valencia).

Con la identificación de la incompatibilidad constructiva, se han estudiado de manera técnica, constructiva, acústica y económica las tres alternativas propuestas, de las que, mediante un análisis multicriterio se han extraído las siguientes conclusiones.

12.1 Conclusiones sobre la incompatibilidad detectada

La identificación del fallo constructivo de proyecto constituye un ejemplo representativo de los problemas que pueden surgir en la redacción de proyectos constructivos de gran escala. En este caso, la solución de cimentación proyectada no ha sido verificada frente a las condiciones reales del emplazamiento con suficiente detalle en la fase de diseño.

- La solución de cimentación por proyecto, ejecución de micropilotes con encepado desde vía, resultado inviable a lo largo de 137 metros afectado por la interferencia directa de los micropilotes con un muro de contención existente de mampostería de piedra caliza. Además, de la falta de condiciones operativas y de seguridad que esta situación genera.
- El estado de conservación del muro existente es deficiente. Presenta ausencia de materiales, penetración de raíces y en ciertos puntos, curvaturas previas al colapso. Esto eleva el riesgo asociado a cualquier operación de perforación en su entorno a un nivel que no puede considerarse admisible sin estudios específicos adicionales, al comprometer potencialmente la estabilidad del talud ferroviario y la seguridad de la línea convencional en servicio.
- La incompatibilidad fue detectada en la fase de preparación previa a la ejecución, antes de que se materializara ningún desperdicio físico en obra. Esta situación, reduce el impacto del problema al mínimo y genera la posibilidad de adoptar una solución alternativa sin necesidad de demoler ni deshacer trabajo ejecutado.

12.2 Conclusiones sobre el análisis de alternativas

El estudio de las tres alternativas propuestas ha permitido caracterizar de forma realista sus ventajas, limitaciones y condicionantes específicos en el contexto del emplazamiento, aportando una base objetiva para la toma de decisiones.

- La Alternativa 1, pilotes convencionales de 650 mm desde la plataforma ferroviaria, es estructuralmente válida, pero presenta un riesgo de seguridad, derivado del muro existente durante la perforación, una dependencia total para el trabajo de las ventanas de mantenimiento nocturnas de ADIF. Su PEC de 608.111,47 € más sobrecostes operativos no cuantificados la hace la alternativa más costosa en términos de coste real.
- La Alternativa 2, minibarreras de baja altura junto a la línea convencional, aporta una reducción acústica real y cuantificable sobre el ruido de rodadura de la línea adyacente, con pérdidas por inserción de hasta 17,4 dB a 4 m de altura según el

ensayo Acustrain-ADIF realizado en el tramo Puçol-El Puig (2024-2025). Sin embargo, no puede garantizar el cumplimiento del LAFmax en los receptores más críticos del tramo por su distancia a la línea de alta velocidad principalmente. Dicha solución es la más económica y cuenta con un proceso constructivo sencillo.

- La Alternativa 3, zapata corrida en el callejón con reposicionamiento de la pantalla, es la única de las tres propuestas que elimina simultáneamente el riesgo sobre el muro existente, garantiza el cumplimiento acústico normativo en todos los receptores del tramo y es ejecutable sin dependencia del programa de ventanas de mantenimiento de ADIF. Su única limitación constructiva relevante, la imposibilidad de ejecutar zapata corrida en los 10 m del paso inferior, está acotada y tiene solución conceptual mediante dos pilotes y un encepado en la pared central del túnel.
- La evaluación multicriterio, realizada con la ponderación combinada de un panel de siete expertos profesionales del sector y tres sistemas de inteligencia artificial, con una distribución de pesos del 60% y 40% respectivamente, otorga a la Alternativa 3 una puntuación ponderada de 4,14 sobre 5, frente a 3,83 de la Alternativa 2 y 2,18 de la Alternativa 1, confirmando la superioridad de la solución adoptada de forma objetiva.

12.3 Conclusiones sobre los principios de Lean Construction

- El análisis del caso desde el modelo TFM de Koskela (1992) evidencia que la incompatibilidad detectada habría representado, de no haberse identificado anticipadamente, un fallo simultáneo en las tres dimensiones de la producción, imposibilidad de transformación de la actividad proyectada, interrupción del flujo de trabajo con efecto cascada sobre todas las actividades dependientes y entrega de un resultado no conforme con los requisitos del cliente en términos acústicos y de seguridad.
- La aplicación sistemática del principio Lean de Genchi genbutsu, verificación directa y presencial de las condiciones reales del emplazamiento antes de comprometer una solución de proyecto, habría permitido detectar la incompatibilidad en la fase de diseño con un coste mínimo.
- El proceso constructivo de la solución adoptada responde en su diseño a los principios del modelo TFM. Y la aplicación del Last Planner System para la gestión de restricciones de acceso, de coordinación ferroviaria e interna, y el seguimiento del PPC constituyen las herramientas de planificación y control más adecuadas para garantizar el cumplimiento del plazo estimado de 1/2 meses en las condiciones reales del emplazamiento.

12.4 Conclusiones sobre la solución adoptada

- La zapata corrida de 2,00m x 0,80m de hormigón armado HA-30/B500SD adoptada para la pantalla R358-376 es una solución técnicamente contrastada dentro del propio proyecto constructivo de referencia, respalda por notas técnicas de características similares. Además, ha sido verificada de forma específica para el emplazamiento estudiado en el Anejo 4 y el Anejo 6, donde se obtiene la capacidad portante del terreno, 1,85kg/cm² y la tensión real transmitida por cada tipo de poste.
- La colocación de zócalo prefabricado para salvar la diferencia geométrica, junto con

los postes de 6,20 metros de altura, garantizan que el desplazamiento de la pantalla de la plataforma al callejón no compromete la eficacia acústica de la solución, cumpliendo los valores límite del RD1367/2007 y de la Ley 7/2002.

- La ejecución de la zapata en retroceso, el hormigonado con bomba estática y el emplazamiento de la grúa de gran tonelaje junto al paso inferior para el montaje de postes y paneles constituyen las tres decisiones constructivas fundamentales que hacen viable y eficiente la ejecución de la solución.

12.5 Futuras líneas de trabajo

A su vez, este estudio abre varía línea de trabajo que, al queda fuera del alcance definido, no ha podido desarrollarse en profundidad pero que son una continuación del análisis realizado:

- El desarrollo y cálculo de la parte de la solución de ejecución de un par de pilotes para la ejecución de dos vanos de 5 metros constituye una línea de trabajo prioritaria, no solo en el ámbito de la cimentación sino también la aprobación y estudio acústico de los vanos de 5 metros.
- La aplicación de la metodología de análisis desarrollada en el presente trabajo, combinando la verificación de campo conforme al principio genchi genbutsu, el estudio de alternativas con criterios técnicos, constructivos y acústicos, y la evaluación multicriterio con panel de expertos e inteligencias artificiales, a otros tramos del proyecto constructivo con condicionantes similares podría contribuir a la detección anticipada de incompatibilidades análogas antes de su manifestación en obra.
- La realización de un estudio geotécnico específico del callejón permitiría sustituir las hipótesis conservadoras adoptadas en el presente estudio por datos reales del terreno, posibilitando una optimización de las dimensiones de la zapata y una reducción del coste de la solución.
- Otra línea de trabajo futura es la investigación y realización de ensayos en profundidad sobre minibarreras instaladas junto a líneas de alta velocidad. Aunque los ensayos Acustrain-ADIF en Puçol-El Puig han demostrado la eficacia de las minibarreras en línea convencional, no existen actualmente ensayos equivalentes que verifiquen su comportamiento estructural y acústico junto a una línea de AV.

BIBLIOGRAFÍA

- Acoustics-Railway applications-Measurement of noise emitted by railbound vehicles INTERNATIONAL STANDARD ISO 3095(E) ii COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT.* (2013).
- Alegre, D. M. (n.d.). *MEDIDAS CORRECTORAS PANTALLAS ACÚSTICAS Y DISPOSITIVOS REDUCTORES DE RUIDO.* Anthropic. (2025). *Claude (versión Sonnet 4.6)*. (2025).
- AN_UNE-EN 1993-1-1. (n.d.).
- AN_UNE-EN 1997-1. (n.d.).
- BOE-A-2003-613-consolidado. (n.d.).
- BOE-A-2007-18397-consolidado. (n.d.-a).
- BOE-A-2007-18397-consolidado. (n.d.-b).
- Carnicero López Co-Tutor, A., Jiménez Octavio, J., & Hemández Puertas, J. (n.d.). *QMILLA Cálculo de Esfuerzos y Desplazamientos sobre Pórticos CA-220 con Matlab Tutor: Alumno.*
- CatalogoNormativaTecnica. (n.d.).
- Danku, J. C., & Antwi, P. A. (2020). Perceived Benefits of Using Value Engineering on Road Projects in Ghana. *World Journal of Engineering and Technology*, 08(02), 217–236. <https://doi.org/10.4236/wjet.2020.82018>
- De España, R. (n.d.). *Martes 18 noviembre 2003 BOE núm. 276 I. Disposiciones generales JEFATURA DEL ESTADO 20976 LEY 37/2003, de 17 de noviembre.*
- Disposición adicional única. (n.d.).
- fletcher_munson. (n.d.).
- General Carreteras Secretaría General De Transporte Terrestre Gobierno De España Ministerio De Transportes Y Movilidad Sostenible, D. DE. (n.d.). *Guía para el proyecto y ejecución de obras de apantallamiento acústico en carreteras.* Retrieved <https://cvp.mitma.gob.es/>
- Google DeepMind. (2025). *Gemini.* (2025).
- Harris, C. M. . (1991). *Handbook of acoustical measurements and noise control.* McGraw-Hill.
- Insametal. (n.d.). *Equipamiento Ferroviario.* 2026.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2023). *Ruido.*
- INVASSAT. (n.d.). *ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region.* Generalitat Valenciana.
- la Prida Caballero, de, Ruiz, B., & Eliana, E. (n.d.). *53º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA XII CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA NORWAE-PROGRAMA PARA LA REDUCCIÓN DEL RUIDO FERROVIARIO POR MEDIO DE LA MODIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE REUDAS DE FERROCARRIL.*
- LAST PLANNER SYSTEM ITEC. (n.d.).
- Lefebvre. (2023). *El ruido es el segundo factor causante de enfermedades ambientales en Europa.*
- Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, J. (n.d.-a). *La percepción acústica: Física de la audición.*

- Mariano Merino Loida Muñoz-Repiso, J. (n.d.-b). *La percepción acústica: Física de la audición*.
- Metalesa. (n.d.). *Normativa sobre pantallas acústicas para ámbito ferroviario*. Metalesa.
- Mikel Iturralde. (n.d.). *treneando. todo sobre el mundo del tren*.
- Mundo ferroviario. (n.d.). *MATERIALES MODIFICADOS PARA AMINORAR VIBRACIONES Y RUIDO EN UNA EXPLOTACIÓN FERROVIARIA*.
- Nacional, A. (n.d.). *AN UNE-EN 1992-1-1*.
- Naciones Unidas. (n.d.). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*.
- Núm. (2021). *BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA*. <https://www.boe.es>
- OpenAI. (2025). *ChatGPT (versión GPT-4)*. (2025).
- Organización Mundial de la Salud (WHO). (n.d.). *El ruido*.
- PANTALLAS ACÚSTICAS*. (n.d.).
- Patrocinante, P., & Arenas, J. P. (2004). *UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA ACÚSTICA*.
- Peris, E. (2017). *Environmental noise in Europe - 2020*.
- RUIDO DE TRÁFICO: FERROCARRILES* AUTOR: FERNANDO SEGUÉS ECHAZARRETA. (2007).
- Segura, V. R. (n.d.-a). *Sesión 1: Introducción a la filosofía Construcción LEAN*. Retrieved <https://bimexcellence.org/>
- Segura, V. R. (n.d.-b). *Sesión 1: Introducción a la filosofía Construcción LEAN*. Retrieved <https://bimexcellence.org/>
- Thompson, D. (2009a). Track Vibration. In *Railway Noise and Vibration* (pp. 29–95). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-045147-3.00003-7>
- Thompson, D. (2009b). Wheel/Rail Interaction and Excitation by Roughness. In *Railway Noise and Vibration* (pp. 127–173). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-045147-3.00005-0>
- Thompson, D. J. (2009). *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier.
- UNE-EN 16272-5:2024*. (n.d.).
- UNEISO199612020*. (n.d.).