

VIBRACIONES PRODUCIDAS POR INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

Servicios de Ingeniería Acústica y Vibraciones





"Es preferible una respuesta aproximada a la pregunta correcta, a menudo imprecisa, que una respuesta exacta a una pregunta incorrecta que siempre podrá precisarse tanto como queramos".

John W. Tukey

Preguntas correctas llevan a respuestas correctas

"No tengo por qué jurar fidelidad a las palabras de ningún maestro".

Horacio

Lo positivo de un problema sin solución aparente es el placer que produce encontrarla

"Yo defiendo que la simbiogénesis es el resultado de una convivencia a largo plazo que es la principal fuente de innovación evolutiva en todos los linajes de organismos superiores no bacterianos".

Lynn Margulis

Una comunicación fluida constituye la base para seguir progresando.



Experiencia en ferrocarril

Ingeniería para el Control del Ruido (ICR), es una empresa con sede en Barcelona dedicada a la solución de problemas de ruido y vibraciones. Fundada en 1995 por profesionales con más de 20 años de experiencia en el campo de la vibro-acústica, ofrece los últimos avances en métodos de análisis para sectores tan diversos como el del ferrocarril, la automoción, la energía eólica, la industria o la construcción. El objetivo es proponer siempre una solución eficiente a cada problema vibro-acústico.

ICR ha tomado una posición relevante en el sector ferroviario internacional durante la última década gracias a la confianza depositada por los principales constructores europeos de infraestructuras. La razón de este éxito reside en la metodología de trabajo utilizada, basada en:

- Técnicas de previsión propias.
- Mediciones reales para minimizar especulaciones teóricas.
- El tratamiento del ruido aéreo y estructural de cada elemento que forma un coche.
- Tiempos de respuesta muy cortos.
- Precios muy ajustados.

ICR ha desarrollado un método de trabajo basado en su experiencia y en la inversión en I+D con el fin de poder ofrecer siempre las mejores herramientas de análisis y los mejores servicios de ingeniería para cada problema de ruido y/o de vibraciones. En algunos casos, este conocimiento se ha traducido en transferencia de tecnología desde ICR a sus clientes.

ICR ofrece diversos estudios predictivos estandarizados en el sector del ferrocarril:

- Predicción de niveles vibratorios para distintos tipos y topologías de soportes de vías ferroviarias.
- Predicción del ruido "squeal noise".
- Diseño de soluciones anti-vibratorias para infraestructuras ferroviarias.
- Ensayos de certificación de ruido según Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI/TSI).
- Medición de rugosidad de la vía (irregularidad del carril) y caracterización del comportamiento dinámico de la vía según ISO 3095.
- Predicción de la onda de compresión generada por un tren de alta velocidad entrando en un túnel.
- Análisis de las vías de transmisión de ruido y vibraciones (ATPA: Advanced Transfer Path Analysis Method). Este método propio desarrollado por ICR permite mejorar el confort acústico interior de un tren.
- Estudios de impacto ambiental en infraestructuras ferroviarias (tren, metro y tranvía) en fase de obra (construcción de la infraestructura) y en fase de servicio (explotación de la infraestructura):
 1. Impacto vibratorio: estudio de las vibraciones y de su propagación por el terreno hasta las zonas sensibles.
 2. Impacto acústico: estudio de ruido.

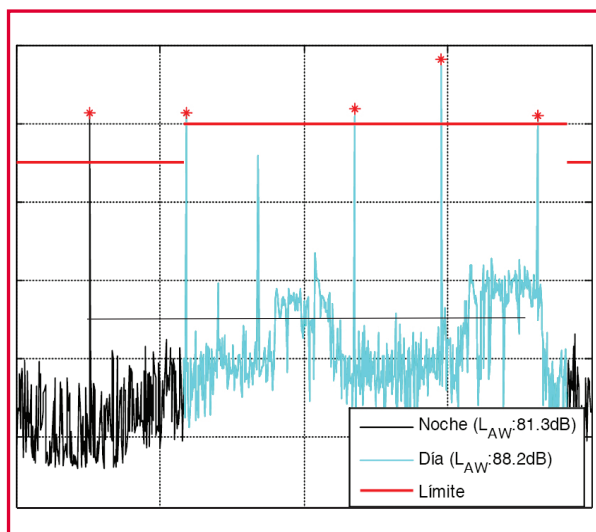
Antecedentes

Durante la última década, el sector del ferrocarril ha experimentado a nivel mundial un crecimiento notable tanto en inversión como en desarrollo de infraestructuras. Este rápido progreso del sector se ha traducido en el incremento del número de vías férreas y en la frecuencia de paso de ferrocarril urbano y suburbano. Como contrapartida, se han generado nuevos problemas de contaminación ambiental derivados de las vibraciones producidas durante la fase de obra del trazado y la fase de servicio, con el material rodante en circulación.

Anticiparse y predecir estas vibraciones en el terreno es uno de los objetivos de ICR en este campo para permitir al cliente optimizar el trazado proyectado y aplicar las soluciones constructivas necesarias con el fin de evitar vibraciones perjudiciales en el vecindario y preservar la integridad de los edificios cercanos a la vía.



Previsión de vibraciones en fase de servicio.



Gráfica de resultados de mediciones de vibraciones durante la fase de obra.

Los estudios de impacto ambiental desarrollados en infraestructura ferroviaria (tren, metro y tranvía) se dividen en dos fases diferenciadas:

- Control de vibraciones en fase de obra del trazado. El objetivo es controlar el impacto de los trabajos de construcción, montaje y movimiento de tierras sobre la integridad de los edificios y el confort acústico del vecindario.
- Previsión de vibraciones en fase de servicio. Se realiza a partir del estudio de la propagación de las vibraciones en el terreno producidas por la circulación de material rodante por la vía.

Ambos estudios se realizan teniendo en cuenta la normativa vigente y/o especificaciones del cliente.

Anticiparse y predecir las vibraciones en el terreno es uno de los objetivos de ICR en este campo para permitir al cliente optimizar el trazado y aplicar las soluciones constructivas necesarias.

Control de vibraciones en fase de obra

Durante la etapa de control de vibraciones en fase de obra (construcción de la infraestructura) se monitorizan las vibraciones producidas por los trabajos de construcción, los movimientos de tierra o las tuneladoras. El objetivo es examinar su incidencia sobre el confort acústico del vecindario y la integridad de los edificios cercanos. Estos estudios de control se desarrollan siguiendo las especificaciones marcadas por la normativa vigente y/o las marcadas por el cliente con el fin de evaluar su cumplimiento.

La gran variedad de herramientas y métodos de estudio disponibles en ICR, le permite adaptarse a las necesidades del cliente en cada momento y proponer el tipo de estudio que mejor se adecua a cada situación. Por ello, ICR ofrece mediciones de control de forma ininterrumpida o mediciones de control de manera puntual mediante el desplazamiento de un técnico sobre el terreno.

Las mediciones de control realizadas de forma ininterrumpida se desarrollan durante un periodo de tiempo variable en función de las exigencias de cada tipo de estudio (ej: 1 mes, 2 semanas, etc.). Dichas mediciones, se realizan según normativa o requerimientos específicos del cliente en los puntos de control previamente fijados. Durante este tiempo, ICR elabora informes de resultados con una regularidad adaptada a las características de cada estudio y las necesidades del cliente.

Paralelamente, se generan alarmas de control vía e-mail o SMS para informar de niveles de vibración superiores a los fijados inicialmente. De esta manera, el cliente conoce en tiempo real si los trabajos de obra llevados a cabo se sitúan dentro de los límites establecidos.

Otra alternativa de estudio es el desplazamiento de un experto de ICR al emplazamiento de la obra. Mediante el equipo de medición adecuado, se realizan las mediciones de vibración de manera personalizada siguiendo las especificaciones marcadas por la normativa o el cliente. Este tipo de estudio permite obtener un *feedback* inmediato y ganar una mayor flexibilidad a la hora de definir los puntos de control gracias a la presencia de un técnico a pie de obra.

ICR ofrece estudios de control de vibraciones en fase de obra a precios muy competitivos adaptados a la realidad diaria del cliente.

La dilatada experiencia de ICR en este campo y la disponibilidad de multitud de herramientas y métodos de medición de vibraciones, le permite ofrecer precios muy competitivos adaptados a la realidad diaria del cliente.



Estudio de vibraciones para evaluar la integridad de un edificio cercano a las obras.



Predicción de vibraciones en fase de servicio

En los estudios sobre el nivel de vibraciones producidos por la circulación de material rodante, ICR realiza varias mediciones y simulaciones con el objetivo de predecir las vibraciones antes de la definición del trazado o una vez definido. La finalidad es aplicar las modificaciones constructivas necesarias para cumplir con la normativa vigente. ICR controla así, las vibraciones del terreno desde la vía hasta las zonas sensibles (hospitales, viviendas, etc.).

Los estudios de propagación de vibraciones sobre el terreno se dividen en cuatro etapas principales:

- Etapa 1: estudio preliminar del terreno.
- Etapa 2: caracterización de las excitaciones.
- Etapa 3: determinación de las características de propagación del terreno.
- Etapa 4: cálculo sobre la totalidad del terreno.

Etapa 1: estudio preliminar del terreno

Durante la fase preparatoria ICR identifica los puntos sensibles y define los límites de molestia.

Para la identificación de los puntos sensibles, ICR divide y categoriza el trazado en varias zonas en función de la presencia de edificaciones sensibles y de viviendas cercanas a la futura vía.

La definición de los criterios de molestia se realiza con el cliente a partir del estudio de las normas sobre riesgos para la integridad de los edificios, el confort vibratorio o los límites de percepción humanos.



Ferrocarril en fase de servicio.

Etapa 2: caracterización de las excitaciones

La meta de ICR en esta fase es caracterizar la fuente vibratoria mediante mediciones en la superficie y/o en el subsuelo del terreno a estudiar o mediante simulaciones numéricas.

Etapa 3: determinación de las características de propagación del terreno

Para definir las características de propagación del terreno, ICR ofrece dos alternativas de estudio:

1. El método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves): medición de las características dinámicas de las distintas capas del terreno para su posterior modelización a partir de métodos numéricos del terreno y de la infraestructura que se instalará en el mismo.
2. El método empírico: medición de la atenuación en la propagación de las vibraciones desde la infraestructura ferroviaria hasta los puntos sensibles previamente definidos.

El primer estudio identifica las características dinámicas del terreno y el segundo mide la propagación de las ondas.

1. Método SASW

¿Qué calcula?

El método SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) es una técnica de análisis que permite identificar las características dinámicas del terreno a partir de mediciones vibratorias en superficie y de los parámetros físicos estáticos (extraídos del estudio geotécnico del terreno). Los parámetros obtenidos por el método, determinan el comportamiento dinámico del suelo y posibilitan, por lo tanto, prever la propagación de las vibraciones en el terreno y estimar su incidencia sobre las estructuras cercanas.

La cuantificación de todos estos parámetros, posibilita elaborar un modelo numérico para predecir la propagación de las vibraciones en el terreno:

- Modelo de elementos finitos (FEM).
- Modelo de elementos de contorno (BEM).
- Modelos analíticos de propagación de Rayleigh.

En su origen, el método pretendía determinar sólo el módulo elástico de las distintas capas del terreno pero, posteriormente, se añadió la evaluación separada de la amortiguación. Como resultado, el SASW permite determinar de forma simultánea el módulo elástico y la amortiguación de forma acoplada.

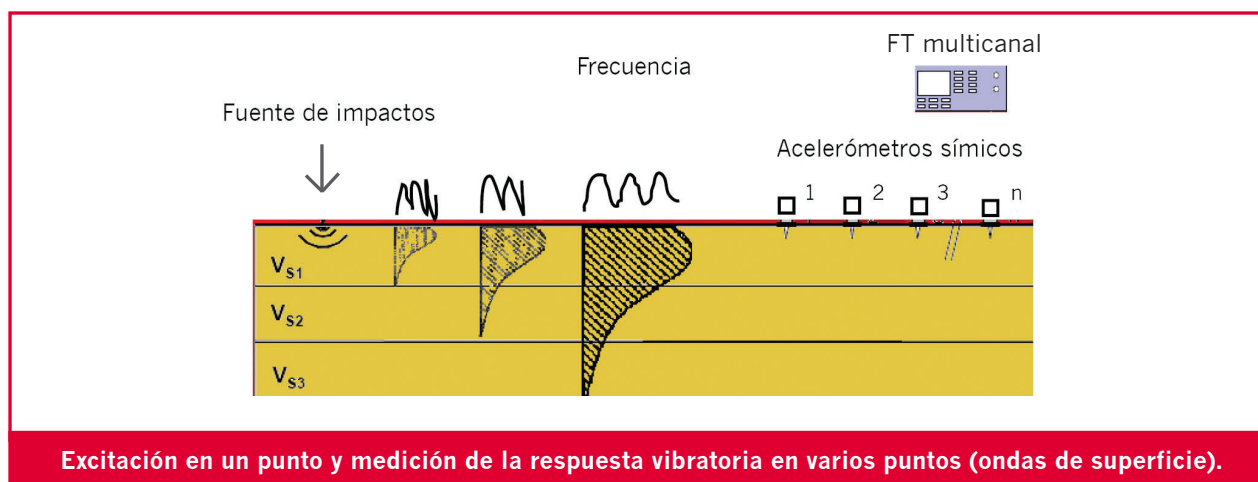
La tecnología SASW determina la velocidad de propagación de las ondas de cizalla y los amortiguamientos asociados para cada una de las capas que influyen en la propagación. Paralelamente, se utiliza el método de Nakamura, que permite determinar la profundidad necesaria para el modelo numérico. El número de capas a estudiar, es decir, la profundidad del terreno, dependerá del rango de frecuencias a tener en cuenta en el futuro modelo.

¿Cómo funciona?

Los estudios vibratorios mediante el método SASW se efectúan midiendo las aceleraciones en dirección vertical en diversos puntos distribuidos a lo largo de una línea recta.

El método SASW permite identificar las características dinámicas del terreno.

La fuente de excitación se emplaza en la misma línea. Finalmente se obtiene el perfil de velocidades de propagación en función de la profundidad del terreno.





2. Método empírico

El método empírico, basado en el manual de la FTA (US Federal Transit Administration) sobre el estudio de impacto ambiental de ruido y vibraciones, es una metodología de análisis que permite caracterizar un terreno de manera puramente experimental. Es decir, permite conocer la propagación de las vibraciones directas e indirectas en el terreno cuando se aplica una fuerza en un punto de control determinado situado sobre el terreno.

El método empírico se basa en realizar mediciones de transferencia de movilidad para predecir la propagación de las vibraciones desde el punto donde se encontrará la futura fuente de vibración (la infraestructura ferroviaria) hasta el punto receptor. La fuerza se aplica en el mismo punto donde está previsto el paso del ferrocarril.

Este procedimiento de trabajo permite:

- Obtener datos sobre la propagación de las vibraciones desde la vía hasta los puntos receptores más sensibles.
- Cuando el número de puntos sensibles a estudiar es bajo y los emplazamientos fácilmente identificables, se trata de una solución económicamente viable.

¿Cómo funciona?

El funcionamiento del método se expresa mediante la siguiente formulación:

$$L_v = L_F + T_M + C_e$$

donde:

L_v: nivel de vibración en un punto sensible.

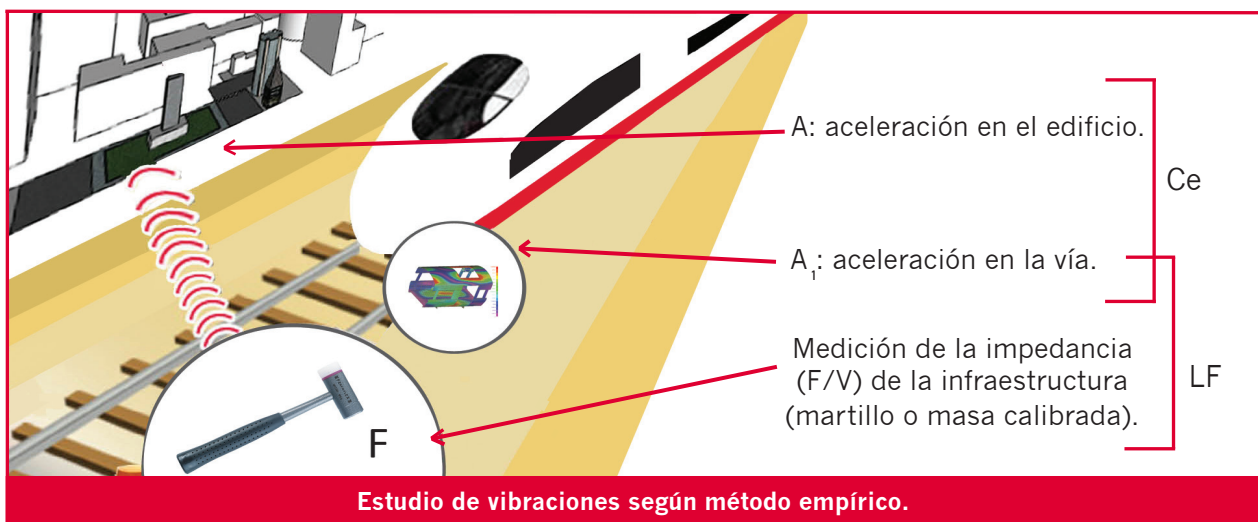
L_F: fuerza aplicada por el tren en un punto de paso.

T_M: función de transferencia de movilidad de la fuente lineal desde las vías hasta el punto sensible. Esta función expresa la relación entre la fuerza de entrada en el terreno y la vibración en el punto sensible.

C_e: ajustes para tener en cuenta la interacción entre el terreno y los edificios y la atenuación o amplificación de las amplitudes de vibración propagadas a través de los edificios.

Para obtener la fuerza real aplicada por la circulación del tren, ICR ofrece dos vías de estudio posibles:

- Simulaciones mediante un modelo y utilizando la base de datos de ICR sobre material rodante.
- Mediciones en instalaciones con material rodante de características iguales o similares.



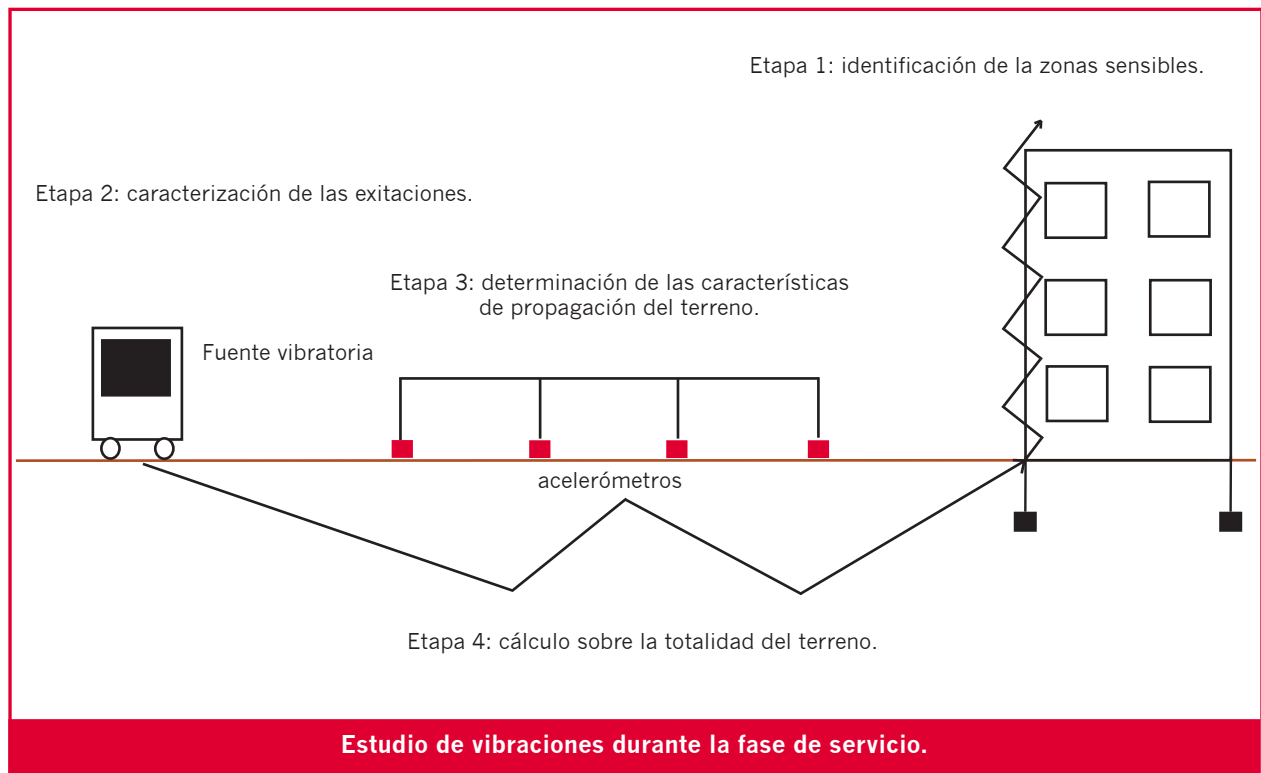
Etapa 4: cálculo sobre la totalidad del trazado

En la etapa final del estudio se pretende:

- Estimar, mediante cálculo, los niveles de vibraciones en la totalidad del trazado.
- Dar recomendaciones sobre el sistema de soporte anti-vibratorio a instalar en las zonas críticas.
- Minimizar la longitud de las instalaciones de soportes anti-vibratorios en la totalidad del trazado, respetando los niveles de molestia definidos en la etapa 1.

Para ello, se estimarán los niveles vibratorios a pie de los edificios y en su interior a partir de:

- La fuente de vibraciones (material rodante) caracterizada en la etapa 2.
- El tipo de soportes en el montaje de la vía.
- Las características de propagación de vibraciones en el trazado.





EXPERIENCIA

Proyectos de control y predicción de vibraciones en infraestructura ferroviaria

- Control de vibraciones durante la fase de obra del AVE en el tramo de UTE Sagrera. Acciona Infraestructuras.
- Control de vibraciones durante la fase de obra del AVE en Montmeló y evaluación del impacto vibratorio en la industria Farmhispania S.A. Ferrovial Agroman S.A.
- Control de vibraciones durante la fase de obra del AVE en Montmeló y evaluación del impacto vibratorio en el polígono industrial Pla sota el Molí. Cliente Confidencial.
- Control de vibraciones en la fase de obra de la línea 9 del Metro de Barcelona. GEOCAT, Gestió de Projectes S.A.
- Control de vibraciones durante la fase de obra de la línea 9 del Metro de Barcelona. Entorn S.A. Enginyeria i Serveis.
- Control de vibraciones puntual durante la fase de obra de la línea 9 del Metro de Barcelona. UTE Gorg.
- Control semanal de las vibraciones producidas por una tuneladora durante la fase de obra del tramo 3 de la línea 9 del Metro de Barcelona. Entorn S.A. Enginyeria i Serveis.
- Estudio del impacto acústico ambiental producido por la circulación del AVE (tren de alta velocidad) por la sierra del Guadarrama (tramo Segovia - Soto del Real). Previsión de los niveles de ruido, pulso de presión a la entrada en túneles, impacto acústico de las obras de construcción del túnel y las vías y diseño de soluciones. Inimasa.
- Estudio de vibraciones en el terreno de la central Termosolar Borges de Abantia y Comsa Emte. Elaboración de un modelo de predicción vibratorio mediante Elementos Finitos (FEM) para estimar el nivel de propagación de las vibraciones en el terreno producidas por la circulación del AVE (tren de alta velocidad) por las proximidades de la central. Comsa Emte.
- Estudio del impacto acústico ambiental en la línea del AVE (tren de alta velocidad) de Levante. Análisis del área de estudio, modelización y medidas correctoras. Ineco Tifsa.
- Estudio acústico y vibratorio del impacto ambiental producido por un nuevo sistema tranviario en el Camp de Tarragona. Auding Intraesa.
- Estudio del impacto vibratorio producido por la circulación del tren en las cercanías de las instalaciones de la planta industrial NorControl en Tarragona.



Otros proyectos de control y predicción de vibraciones

- Mediciones y control de vibraciones a pie de fachada en una vivienda cercana a las obras del cliente durante un periodo de 5 días. Barcelona. ACSA Sorigué.
- Control puntual de vibraciones según normativa en el interior de la industria Indurken a causa de la perforación del terreno próximo a la planta durante la fase de obra de unas viviendas en el Prat de Llobregat, Barcelona. Paymacotas.
- Mediciones de vibración en el subsuelo, previsión del impacto ambiental mediante modelo de propagación de las vibraciones y cálculo del impacto ambiental vibratorio en las obras del aeropuerto de Montflorite. Proyecto ZIMA-041189-ES con adjudicación nº 041190. Ineco Tífsa.
- Proyecto sincrotrón ALBA del Vallès: ensayos y predicción de vibraciones sobre el terreno mediante método SASW y Modelo de Elementos Finitos (FEM) para determinar la estructura necesaria para la colocación de la Losa Crítica y cumplir con las especificaciones vibratorias. Determinación de las constantes del terreno para la elaboración de un modelo numérico capaz de prever el comportamiento de la zona crítica frente a las vibraciones del terreno. Máster Ingeniería S.A.



Ingeniería para el Control del Ruido

Berruguete, 52. (Vila Olímpica Vall d'Hebron)
08035 Barcelona. España - Tel/Fax. +34 93 428 63 39
E-mail: icr@icrsl.com
www.icrsl.com