

Control de las vibraciones generadas por el paso de dos tuneladoras bajo las edificaciones del casco urbano de Vigo

La excavación mediante tuneladoras genera vibraciones, que aunque de menor intensidad que las generadas por las voladuras hay que tener en cuenta para no causar daños o evitar reclamaciones en estructuras próximas a su trazado. El presente artículo tratará del control de vibraciones realizado en la obra de ejecución de los túneles para el acceso de la Alta Velocidad a la ciudad de Vigo.

Palabras clave: AVANCE, CAPTADOR, ESTRUCTURA, EXCAVACIÓN, FRECUENCIA, SISMÓGRAFO, TRANSMISIÓN, TUNELADORA, VELOCIDAD, VIBRACIÓN.



Iván DEL CASTILLO MARTÍNEZ.
VIBRAQUIPO, S.L.U.

La obra del túnel ferroviario del eje Atlántico de Alta Velocidad Vigo-Pontevedra, Tramo Vigo-Das Maceiras, está siendo ejecutado por la UTE Vigo-Das Maceiras, constituida por las empresas Fomento de Construcciones y Contratas y Acciona Infraestructuras.

El trazado del túnel comienza en el extremo norte de la estación de Vigo, cruzando la ciudad bajo tierra. El túnel tiene una tipología bitubo y ha sido excavado mediante dos tuneladoras de roca dura de manera simultánea con una distancia mínima entre máquinas de 500 metros. Los tubos están separados 30 m entre ejes, con un diámetro de excavación de 9,56 m.

Ambos túneles tienen una longitud aproximada de 8 km, de los que se consideró tramo urbano una longitud de 350 metros, dado que a mayores distancias, con los recubrimientos existentes no existen interferencias significativas con las estructuras existentes. El perfil longitudinal del tramo urbano presenta unas profundidades a rasante entre 26 y 40 m respecto al nivel de la calle. A estas profundidades hay que descontar los sótanos de las edificaciones.

Todo el tramo urbano estaba constituido por un gneis muy sano, a excepción de algunas zonas falladas que fue necesario consolidar mediante inyecciones.

Criterio de prevención

En proyecto constructivo estaba prevista la medición de las vibraciones en aceleración, sin un claro criterio a aplicar para la evaluación de los niveles de vibración medidos.

Se descartó el uso de Norma UNE-22.383/91, ampliamente empleada en España cuando el foco generador de vibraciones son las voladuras, debido a que las vibraciones generadas por maquinaria quedan fuera de su ámbito de aplicación.

Finalmente se decidió aplicar la Norma DIN 4150, parte 3, Efectos de la vibración en estructuras, que contempla el presente caso con todo detalle. No se aplicó la Norma DIN 4150, parte 2, Exposición humana a las vibraciones

en edificios (criterios de confort) debido a la relativa rapidez del paso de las tuneladoras bajo las edificaciones.

La Norma DIN 4150-3, Efectos de la vibración en estructuras, fue publicada en 1986 y corregida en 1.999, trata de la Vibración estructural. Especifica el método de medida y evaluación de los efectos de la vibración en estructuras diseñadas para cargas estáticas. Es de aplicación en estructuras que no necesitan estar diseñadas de acuerdo con estándares específicos para cargas dinámicas. Esta Norma da las directrices para que cuando sea cumplida, no se produzcan daños a las estructuras.

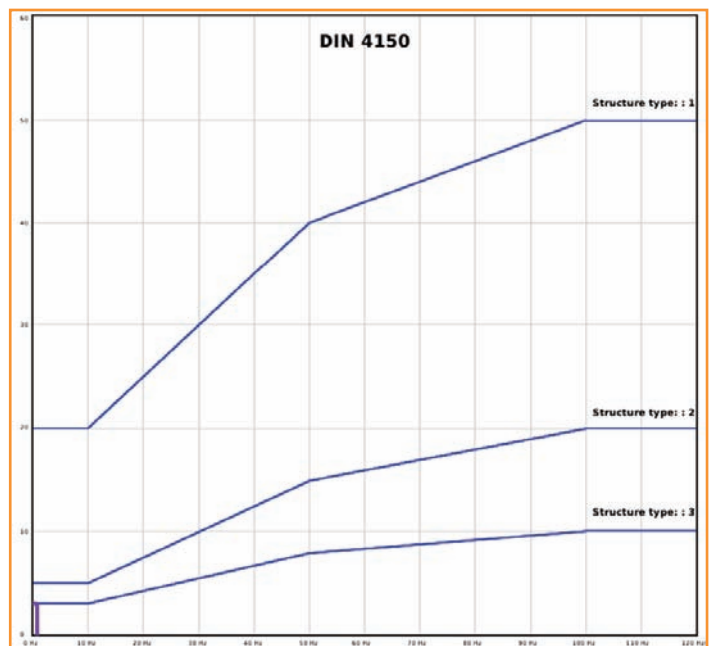
Considera como parámetro a medir el valor máximo absoluto de la velocidad (*valor pico*), v_i , para las tres componentes espaciales (vertical, longitudinal y transversal) medidas en la cimentación del edificio. También debe realizarse una medida en la planta más alta del edificio midiendo las dos componentes horizontales (longitudinal y transversal) tomando el valor máximo de ellas. Las medidas tomadas en este punto serán empleadas para determinar la

respuesta horizontal de la estructura a la vibración en la cimentación.

En la **Tabla 1** y **Fig. 1**, se dan las directrices para v_i , en cimentación y en la planta alta del edificio. La experiencia ha demostrado que si

Línea	Tipo de estructura	Valores máximos v_i en mm/s			
		Vibración en la cimentación			Vibración horizontal en la planta más alta
		1 - 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100 Hz	Todas las frecuencias
1	Edificios para uso comercial, industrial o diseños similares	20	20 - 40	40 - 50	40
2	Edificios asimilables a viviendas	5	5 - 15	15 - 20	15
3	Estructuras que por su particular sensibilidad a la vibración no pueden ser clasificados en las líneas 1 y 2 (Ej. Edificios históricos)	3	3 - 8	8 - 10	8

[TABLA 1] .- Valores máximos de vibración para la evaluación de los efectos de vibraciones de corta duración en estructuras.



[Figura 1].- Valores máximos de vibración para la evaluación de los efectos de vibraciones de corta duración en estructuras.

se respetan esos valores, no existirá daño al edificio. Si aún así, el daño existe, se debe asumir que han sido otras las causas del mismo. Exceder los valores de la tabla no significa necesariamente que se produzcan daños, no obstante, son necesarias investigaciones al respecto.

Para la medida de vibración en cimentaciones los captadores triaxiales deberán colocarse en la planta mas baja del edificio, en los cimientos o en el muro externo. En edificios sin sótanos el punto de medida no debe estar a más de 0,5 metros sobre el nivel del terreno.

Los puntos de medida se elegirán preferiblemente en el lado de la estructura más próximo a la fuente de vibraciones. Una de las direcciones de medida debe ser paralela a la pared externa del edificio.

Opcionalmente se podrá colocar un captador que mida en dirección vertical en los pisos en los que sea previsible un mayor nivel de vibración. En este caso, el punto de medida estará en el centro de la planta.

EQUIPOS EMPLEADOS

Los equipos empleados para la aplicación de la Norma deberán cumplir con lo especificado en la Norma DIN 45669-1 (Especificaciones técnicas que deben cumplir los equipos de medida de vibración utilizados en la aplicación de las Normas DIN 4150).

Se utilizaron 3 medidores de vibración (usualmente denominados sismógrafos) **Vibracord DX (Fig. 2)**, este equipo cumple con los requerimientos empleados para la medida de vibraciones generadas por voladuras (en España UNE-22.381), así como con la Norma DIN 45669-1. Se emplearon 3 captadores, uno triaxial (vertical + longitudinal + transversal) para la medida de vibraciones en cimentación, uno biaxial (longitudinal + transversal) para medida



[Figura 2].- Medidor de vibraciones (sismógrafo) Vibracord DX.

en planta alta y uno uniaxial (vertical) para medida en el centro de la planta.

Los equipos incorporan un *Módem GSM* que permite la conexión del mismo a Internet, pudiéndose manejar y consultar los datos de los registros de manera remota desde cualquier lugar con conexión de datos. Un sistema de alarmas permite notificar mediante correo electrónico o mensajes *SMS* al usuario si se superan los niveles de alarma previamente establecidos.

Estudio preliminar

Con el fin de tener una previsión de las vibraciones que generarían las tuneladoras al acercarse a los edificios en la zona urbana se realizó un estudio preliminar de vibraciones. Para ello se escogió una zona de medida de tal modo que la formación geológica fuese lo más parecida a la existente en la zona en la que se encuentran las edificaciones.

Se procedió a la ubicación del captador (Fig. 3) en la intersección entre la dovela y el plano horizontal que pasa el centro de la sección. De este modo, la distancia de corte con la rueda de la tuneladora es la mínima posible.

Los ejes de medida quedaron con la siguiente disposición:

- Vertical: Línea imaginaria al centro de la tierra.
- Longitudinal: sentido de avance de la tuneladora.
- Transversal: perpendicular al sentido de avance de la tuneladora.

Por los datos obtenidos se observa que los valores representativos de la vibración se corresponden con el avance de la máquina, siendo prácticamente inapreciable el regriping. Durante el transcurso de los trabajos se anotaron los siguientes datos:

- Anillo.
- Fecha.
- Hora de inicio.
- Hora final.
- Distancia (proyección horizontal).
- Distancia real de la cabeza de corte al captador.
- Revoluciones de la rueda de corte
- Fuerza de contacto
- Valores de vibración obtenidos para cada canal.

De los datos de las mediciones, se observó que los parámetros más significativos en el nivel de la vibración fueron la distancia y la velocidad de avance de la máquina. Es de destacar que la *TBM* produce una vibración muy constante, a intervalos regulares, y con forma de onda *casi senoidal*, tal y como se refleja en la Fig. 4.

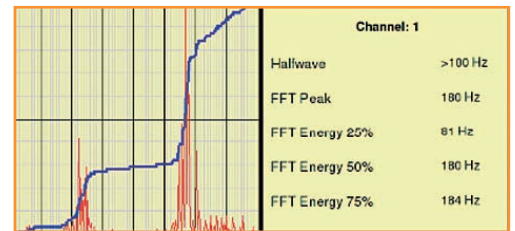


[Figura 3].- Ubicación del captador en la dovela.



[Fig. 4].- Velocidad de avance: 33 mm/s - Rotación: 5 RPM - (100 ms/división).

Del mismo modo, la frecuencia fue muy constante, en todos los casos por encima de 100 Hz (Fig. 5).



[Figura 5] .- Análisis de frecuencias correspondiente al canal vertical.

Los datos obtenidos en las mediciones fueron tratados estadísticamente con el fin de obtener la *Ley de transmisión de la vibración* (también llamada de *amortiguación* o de *correlación*) que sirve de base para poder hacer una predicción en los niveles de vibración que se obtendrán en las edificaciones al paso de las tuneladoras.

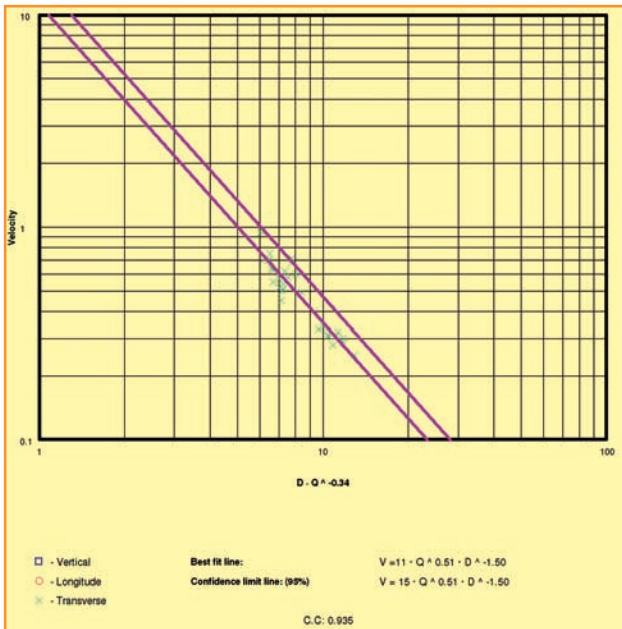
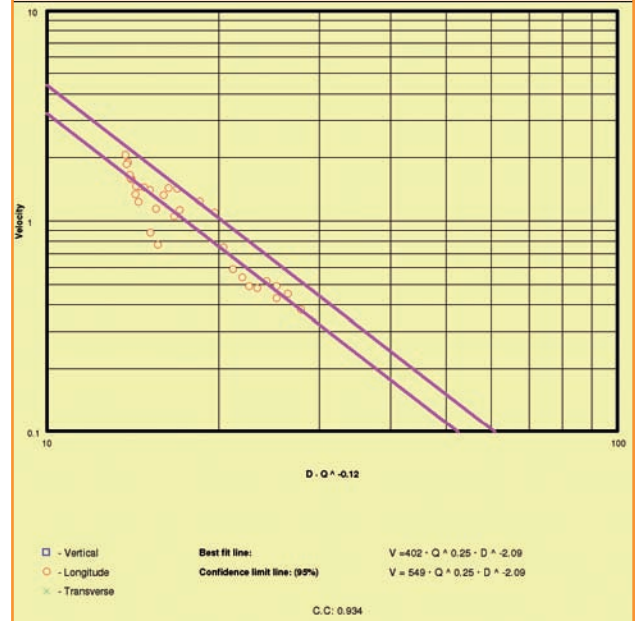
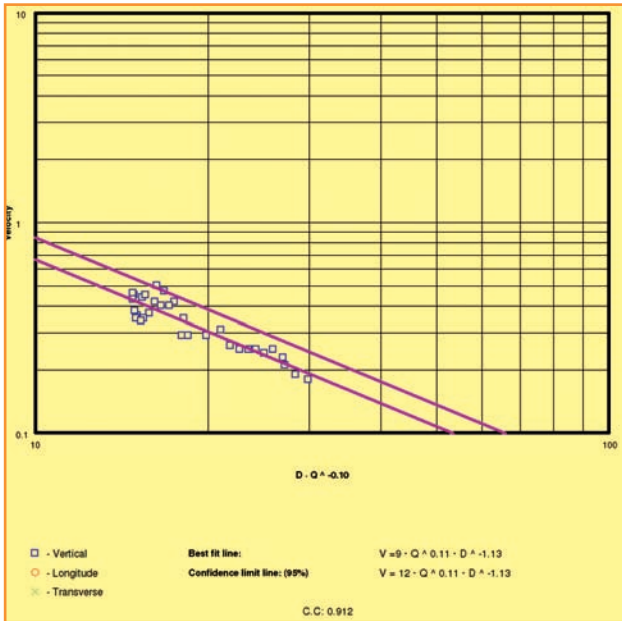
En las pruebas se ha observado que los parámetros que influyen en la *velocidad de vibración* son la distancia entre el punto de registro y la cabeza de corte, así como la velocidad de avance. Estos dos parámetros serán empleados en el cálculo de la Ley de transmisión de la vibración.

La Ley de transmisión dará una recta de ajuste de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V = k \cdot A^\alpha \cdot D^\beta$$

Siendo:

- V = Velocidad (en el presente caso pico).
- A = Velocidad de avance de la tuneladora
- D = Distancia del punto de registro a la cabeza de corte
- K = Constante a determinar en el estudio.
- α = Constante a determinar en el estudio.
- β = Constante a determinar en el estudio.



MEDICIONES DE CONTROL

Al paso de las tuneladoras bajo la zona urbana se realizaron las correspondientes mediciones de control. Para ello, se instalaron los equipos en los edificios más significativos presentes en el trazado. El empleo del Módem GSM permitió la instalación en zonas privadas/comunes de los edificios causando un mínimo de molestias a sus ocupantes, al no ser necesario acceder físicamente al equipo para la lectura de los resultados de las medidas.

Los captadores se ubicaron según la disposición indicada en la Norma DIN 4150, las Figuras 9 y 10 muestran a modo de ejemplo las fijaciones en una de las edificaciones en la cimentación y planta alta, respectivamente.

Velocidad de avance: 30 mm/min	
Distancia (m)	Velocidad estimada (mm/s)
15	3,28
16	2,86
17	2,52
18	2,24
19	2,00
20	1,80
21	1,62
22	1,47
23	1,34
24	1,23
25	1,13
26	1,04
27	0,96
28	0,89
29	0,83
30	0,77
31	0,72
32	0,67
33	0,63
34	0,59
35	0,56
36	0,53
37	0,50
38	0,47
39	0,44
40	0,42
41	0,40
42	0,38
43	0,36
44	0,35
45	0,33
46	0,32
47	0,30
48	0,29
49	0,28
50	0,26
51	0,25
52	0,24
53	0,23
54	0,23
55	0,22
56	0,21
57	0,20
58	0,19
59	0,19
60	0,18



[Figura 9] .- Captador triaxial ubicado en la cimentación del edificio (40 cm sobre ella).

[TABLA II] .- Previsión de la vibración para el canal vertical con un avance de 30 mm/min.

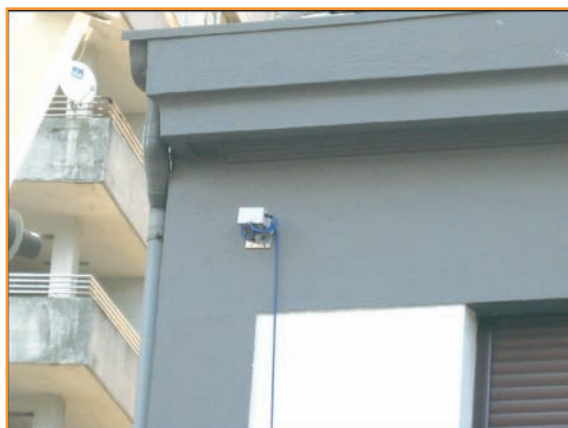
[Figura 8] .- Ley de transmisión para el canal transversal.

Para cada ajuste se ha calculado una recta de confianza, que garantiza que el 95 % de las medidas estarán bajo el valor de velocidad requerido.

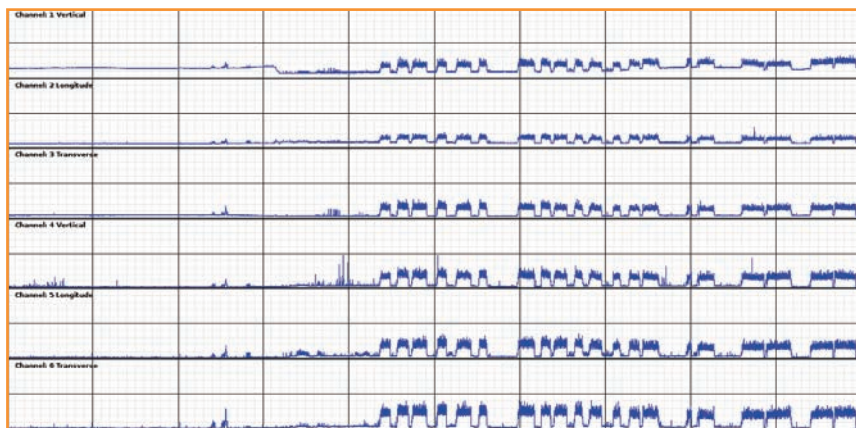
Las Figs. 6, 7 y 8 reflejan los cálculos de las Leyes de transmisión para los canales vertical, longitudinal y transversal, respectivamente.

Los coeficientes de correlación de los ajustes, superiores a 0,9, valoran completamente el análisis estadístico realizado.

Con las leyes obtenidas se calculan fácilmente las tablas de previsión de la velocidad de vibración. A modo de ejemplo, la Tabla II muestra la previsión para una velocidad de avance de la máquina de 30 mm/minuto en el canal vertical.



[Figura 10].- Captador biaxial ubicado en la planta alta del edificio.



[Figura 11].- Ejemplo de registro de vibración

La **Fig. 11** muestra un ejemplo de registro obtenido durante el paso de las tuneladoras bajo los edificios. En el mismo pueden identificarse perfectamente los ciclos de avance de la cabeza de corte.

Los datos de las medidas reales cuando las tuneladoras pasaron bajo los edificios estuvieron completamente en línea con el estudio preliminar realizado. En general, todos los datos medidos estuvieron por debajo del 10% de

desviación sobre la predicción realizada en el estudio.

Bibliografía

- **Norma DIN 4150, parte 2**, Exposición humana a las vibraciones en edificios.
- **Norma DIN 4150-3**, Efectos de la vibración en estructuras.
- **Norma DIN 45669-1** (Especificaciones técnicas que deben cumplir los equipos de medida

de vibración utilizados en la aplicación de las Normas DIN 4150).

- **www.vibracord.com**, Datos de los equipos empleados en el estudio.

VIBRAQUIPO, S.L.U.
Galteiro de Soutelo, 3 - bajo
36004 Pontevedra
☎: 986 860 272 • Fax: 986 853 840.
E-mail: vibraquipo@vibraquipo.com
Web: www.vibraquipo.com

Vibraquipo - Vibratesting

Especialistas en equipos para voladuras y servicios de calibración

Equipos para voladuras y servicios de calibración.

Destacados:

- Sismógrafos para voladuras
- Explosores
- Ohmetros
- Inclinómetros para perforadoras
- Calibración de sismógrafos (todas las marcas)
- Servicios de reparación (todas las marcas)



Vibracord DX
Máxima funcionalidad



Vibracord TX
Facilidad de uso

Más información en
www.vibraquipo.com