

Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings

Luis Manuel Villa-García

Department of Construction and Manufacturing Engineering, School of Engineering of Gijón, Gijón, Asturias, Spain. villa@uniovi.es

Received: September 02nd, 2016. Received in revised form: September 07th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract

Currently there is no specific legislation that addresses the issue of induced impacts on the ground vibrations due to industrial work, nor a general consensus regarding the permissible levels of vibration standards that address problems (pile driving, step trains, etc.). Therefore, and taking into account the impulsive nature of the excitation source (ie impacts of high-level, short-term), employment is justified as an indicator of vibration measurements, the peak value of the signal in the time domain acceleration or speed, and the dominant frequency, since the danger with respect to a structure as well as the inconvenience to the occupants, both factors influence. In this paper the dynamic, constructive or structural damage caused on a house by industrial work of a steel company housing are analyzed.

Keywords: Forensic engineering; impact; vibration.

Análisis de los daños constructivos sobre una vivienda unifamiliar producidos por vibraciones inducidas por impactos contra el suelo en sus proximidades

Resumen

Actualmente no existe una normativa específica que trate la problemática de las vibraciones inducidas por impactos contra el suelo debido a labores industriales, ni un consenso general en lo relativo a los niveles admisibles de vibración en normas que tratan problemas relacionados (hinca de pilotes, paso de trenes, etc.). Por ello y teniendo en cuenta la naturaleza impulsiva de la fuente de excitación (es decir, impactos de alto nivel, de corta duración), se justifica el empleo como indicador de las vibraciones medidas, del valor pico de la señal en el dominio del tiempo en aceleración o en velocidad, y la frecuencia dominante, dado que en la peligrosidad con respecto a una estructura, así como las molestias a sus ocupantes, influyen ambos factores. En el presente trabajo se analizan los perjuicios dinámicos, constructivos o estructurales, causados sobre una vivienda unifamiliar por las labores industriales de una empresa siderúrgica.

Palabras clave: Patología de estructuras; impactos; vibraciones.

1. Introducción

El funcionamiento de una planta de clasificación de escorias perteneciente a una acería, causa graves perjuicios constructivos sobre una vivienda unifamiliar, situada a unos 100 metros de distancia. La finalidad de la citada planta de clasificación, es el reciclado de las escorias de la acería, separando la chatarra de la escoria, para su posterior reutilización. Los trozos grandes se

fracturan con ayuda de una grúa, dejando caer sobre los mismos -desde una altura de unos 20 metros- una bola metálica de grandes dimensiones, con el estruendo y las vibraciones inducidas que ello conlleva (Fig. 1).

Con anterioridad a los trabajos de medición de las mismas, los propietarios se pusieron en contacto con diversos medios de comunicación (televisión, prensa local, revistas, etc.) al objeto de dar a conocer a la sociedad la problemática

How to cite: Villa-García, L.M., Análisis de los daños constructivos sobre una vivienda unifamiliar producidos por vibraciones inducidas por impactos contra el suelo en sus proximidades DYNA, 84(203), pp. 328-333, December, 2017.



Figura 1. Planta de clasificación de escorias, con la carretera regional en primer término.
Fuente: el autor.

creada por la Planta de Clasificación de Escorias, e intentar llamar la atención sobre la misma. Desde entonces las labores en la citada planta se han vuelto muy esporádicas; esto es, los trabajos de fracturación de trozos de escoria de grandes dimensiones, ya no se realizan de forma continuada, en una franja horaria regular, sino a intervalos cortos de tiempo y totalmente aleatorios, lo que hace mucho más difícil y prolongada la recogida de datos; ya que en muchas ocasiones, cuando el técnico llegaba al lugar del asunto, las operaciones ya se habían detenido. Asimismo, se ha podido observar, que la bola impactadora, ya no se levanta hasta su cota vertical máxima mediante la grúa, sino que se detiene aproximadamente a un tercio de la altura total antes de dejarla caer. Además -según la declaración de los propietarios- también se ha dejado de utilizar una segunda bola de dimensiones aún mayores (de aproximadamente el doble), que ha estado causando un estruendo y unas vibraciones inducidas, considerablemente mayores que las actuales producidas con una bola de menores dimensiones.

Para informar del alcance y los efectos dinámicos, sobre la totalidad de la estructura de la vivienda y de su influencia sobre la calidad de vida de sus ocupantes, se solicitó la colaboración del *Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón*.

2. Objeto

El presente trabajo tiene por objeto cuantificar y valorar el efecto que producen los impactos citados sobre la vivienda. A tal efecto, el ingeniero que suscribe se desplazó a la vivienda del asunto en reiteradas ocasiones, al objeto de inspeccionar el lugar y realizar varias mediciones “in situ” de las vibraciones producidas.

Para ilustrar este trabajo, se ha escogido una parte sesgada del dictamen pericial correspondiente al tema del asunto. Como es obvio, se han omitido y/o alterado los nombres propios y el lugar.

3. Descripción de la vivienda

La vivienda está ubicada dentro de un polígono industrial, en frente de una planta de clasificación de escorias, separada de esta

por una carretera regional. La edificación está constituida por dos plantas: planta baja y una altura. A esta última se accede a través de una escalera exterior que discurre por la fachada lateral.

4. Lesiones observadas

En la primera planta, los pavimentos del salón y de la cocina (este último recientemente colocado), presentan unas fisuras longitudinales, con las baldosas cerámicas fracturadas, de amplitud inferior a 1 mm. Asimismo, el techo de la cocina, reformado recientemente, al igual que su pavimento, presenta varias fisuras en las proximidades de la fachada principal.

En la planta baja, en el interior de un pequeño almacén situado bajo la escalera, se aprecian notablemente, desprendimientos en el techo de la carga de mortero, quedando a la vista las bovedillas y viguetas del forjado.

Todas las lesiones mencionadas se sitúan en el entorno de la fachada principal.

5. Prediagnóstico y estudio patológico

Se hace necesario valorar la posible influencia de otros factores antes de atribuir a las vibraciones inducidas, por impactos contra el suelo, los daños descritos:

- Según la forma y ubicación de las fisuras existentes, se descartan asientos diferenciales en la vivienda, ya que no hay fisuras presentes en ninguna de las paredes.
- También se descartan flechas o deformaciones excesivas en el forjado de la planta primera o en el techo de esta, ya que los cerramientos verticales interiores no presentan figura alguna.
- Se descartan directamente la influencia de otros factores, debido a la edad de la construcción: retracciones plásticas de la capa de compresión, ahogado, etc.

5.1. Medición de vibraciones “in situ”

A la vista de los hechos, con el fin de justificar la valoración de los efectos producidos sobre la estructura y sobre las personas que en ella viven, se programa una campaña de ensayos, consistente en una serie de mediciones de las vibraciones en el interior de la vivienda.

A continuación se expone la metodología utilizada y el equipo empleado, así como los resultados de las mediciones de las vibraciones, en el interior de la vivienda.

5.1.1. Equipo utilizado

El equipo de captación y almacenamiento de datos, empleado en las mediciones “in situ” está formado por los siguientes componentes:

- Un analizador colector CSI, modelo 2120-A2: RBM-Consultant, con procesador FFT que soporta una resolución máxima de 6400 líneas y entrada para dos canales dinámicos simultáneos.
- Un acelerómetro PCB (IMI Division), modelo 636A03, con sensibilidad nominal de 1000 mV/g.
- Dos acelerómetros industriales CSI, modelo A0760GP, con sensibilidad nominal de 100 mV/g.

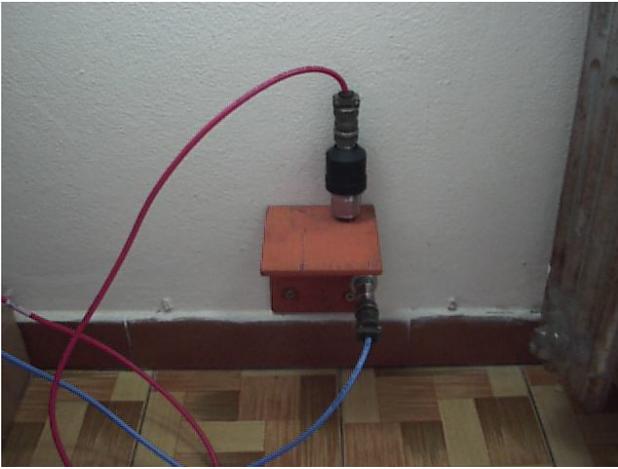


Figura 2. Disposición de acelerómetros en una de las paredes de la vivienda. Fuente: el autor.

- Un ordenador portátil y diverso software para tratamiento de la señal y análisis modal.

5.1.2. Ubicación de sensores

Como se ha mencionado anteriormente, la vivienda unifamiliar se compone de planta baja (destinada a garaje y almacén) y primera planta (destinada a las estancias de la vivienda propiamente dicha). La ubicación de los sensores de captación de datos, se ha realizado mediante base magnética, sobre las paredes de cerramiento laterales, e incluso en zonas próximas a las esquinas de la mismas -de mayor rigidez- con ello se tiende a medir las aceleraciones que se producen en la base de la vivienda, las cuales podrían amplificarse, en función de las frecuencias propias de los diferentes componentes de la vivienda, particularmente de los forjados (Fig. 2).

Debido a que las vibraciones constituyen un movimiento espacial, han sido registradas mediciones de las mismas, en tres direcciones sensiblemente ortogonales (Fig. 3), correspondientes a:

- a_v : aceleración vertical.
- $a_{h \text{ long}}$: aceleración horizontal longitudinal (dirección aprox. 290° oeste).
- $a_{h \text{ trans}}$: aceleración horizontal transversal (dirección aprox. 200° sur).

5.1.3. Resultados de las mediciones “in situ”

No existe actualmente una normativa específica que trate esta problemática, ni un consenso general en lo relativo a los niveles admisibles de vibración en normas que tratan problemas relacionados (hinca de pilotes, paso de trenes, voladura de rocas, etc.) [1-3]. Por ello y teniendo en cuenta la naturaleza impulsiva de la fuente de excitación (es decir, impactos de alto nivel, de corta duración), se justifica el empleo como indicador de las vibraciones medidas, del valor pico de la señal en el dominio del tiempo en aceleración o en velocidad (en el presente trabajo se ha utilizado la primera) y

la frecuencia dominante, dado que en la peligrosidad con respecto a una estructura, así como las molestias a sus ocupantes, influyen ambos factores [4].

Como se ha mencionado en el apartado anterior, las vibraciones se registraron como componentes en tres direcciones ortogonales. Con el objeto de caracterizar las vibraciones inducidas sobre la estructura, en este trabajo se utilizaron los siguientes parámetros característicos de la vibración:

- valor pico de la aceleración (en la señal en el tiempo) de su mayor componente,
- y la frecuencia dominante de la vibración, obtenida a través de un espectro de frecuencias de la señal.

Si se da la circunstancia de que un registro presente varios picos de aceleración de vibración del mismo orden y con diferentes frecuencias, se debe considerar la menor de las mismas. Esta circunstancia queda cubierta al efectuar un análisis de Fourier para generar el espectro [4,5].

De las tres componentes registradas se ha seleccionado la dirección vertical (a_v), ya que presenta unos niveles de magnitud sensiblemente superiores a las componentes horizontal longitudinal ($a_{h \text{ long}}$) y transversal ($a_{h \text{ trans}}$); dándose además la circunstancia de que dicha componente vertical, es la más sensible en lo que respecta a la incomodidad de las personas y para la que además se presume -a falta de un análisis de esfuerzos más detallado- causa mayores daños estructurales en los forjados de la vivienda [5-7].

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados de varias mediciones, indicándose el número de registro y de impacto para cada uno de ellos, así como el valor pico de la amplitud vertical de la aceleración a_v en términos de la aceleración de la gravedad terrestre en [g's] y del sistema internacional de unidades en [m/s²], y la frecuencia dominante en [Hz], que aparece en el espectro de la señal vertical de la aceleración de cada uno de los impactos. A continuación, se representan los gráficos correspondientes a los dos últimos registros de la respuesta vertical, efectuados en día y hora diferentes, en el dominio del tiempo, en el primero de ellos (Fig. 4) se pueden apreciar claramente ocho impactos, mientras que el tercero (registro n° 3) presenta un único impacto -sin lugar a dudas de mayor magnitud-.

Seguidamente -y a modo ilustrativo- se representa una ampliación de los impactos n° 12 y 14, así como su correspondiente espectro de aceleración en el dominio de la frecuencia (Figs. 5 y 6).

Al objeto de ilustrar y cuantificar la magnitud de las fuerzas inducidas sobre la totalidad de la estructura de la vivienda, considérese por ejemplo el valor pico correspondiente a la señal en el tiempo del impacto número 14, perteneciente al registro número 3 (Fig. 6), en la que se muestra una aceleración vertical de hasta 0.12650 m/s² (tabla 1), la Segunda Ley del Movimiento de Newton, pone de manifiesto que por cada 1000 kg de masa que gravitan sobre la estructura de la vivienda, se generan unos esfuerzos adicionales de 126.5 N. Adicionalmente, nótese que el registro citado se corresponde únicamente con la respuesta vertical, mientras que el efecto de las vibraciones inducidas por los impactos constituyen un movimiento espacial, en tres dimensiones, por lo que el valor pico total, resultante de la combinación de las tres componentes sería:

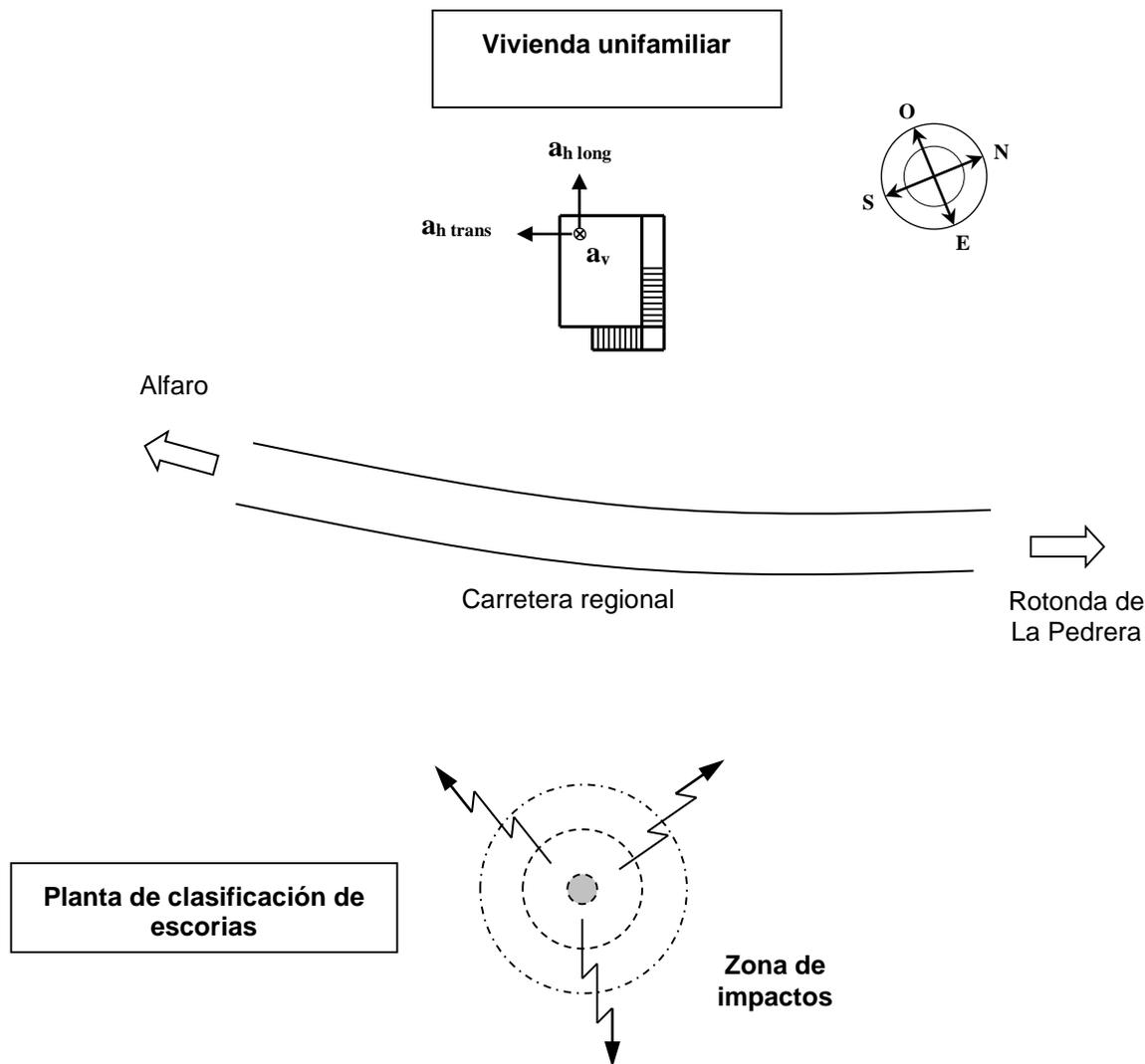


Figura 3. Croquis de la vista en planta del lugar de los hechos; en el que también se indica la orientación de los sensores de captación.
Fuente: el autor.

$$\sqrt{(a_v)^2 + (a_{h \text{ long}})^2 + (a_{h \text{ trans}})^2} \quad (1)$$

siendo a , el valor pico de la aceleración en la señal, en el dominio del tiempo, para:

- a_v : la dirección vertical.
- $a_{h \text{ long}}$: componente horizontal longitudinal (dirección aprox. 290° oeste).
- $a_{h \text{ trans}}$: componente horizontal transversal (dirección aprox. 200° sur).

el cual tiene una magnitud -evidentemente-, mayor que las mostradas en la tabla 1.

Tabla 1.

Registro n°	Impacto n°	a_v		Frecuencia dominante [Hz]
		[G's]	[m/s ²]	
1	1	0.00697	0.06835	20.50
	2	-0.00814	-0.07982	20.00
	3	-0.00728	-0.07139	20.00
	4	-0.00682	-0.06688	20.00
	5	0.00825	0.08090	20.00
	6	-0.00658	-0.06452	20.50
	7	-0.00582	-0.05707	20.00
2	8	-0.00602	-0.05903	20.00
	9	-0.00794	-0.07786	20.50
	10	-0.00797	-0.07815	20.50
	11	-0.00948	-0.09296	20.00
3	12	-0.00978	-0.09590	20.00
	13	-0.00819	-0.08031	20.00
	14	-0.01290	-0.12650	20.50

Fuente: el autor.

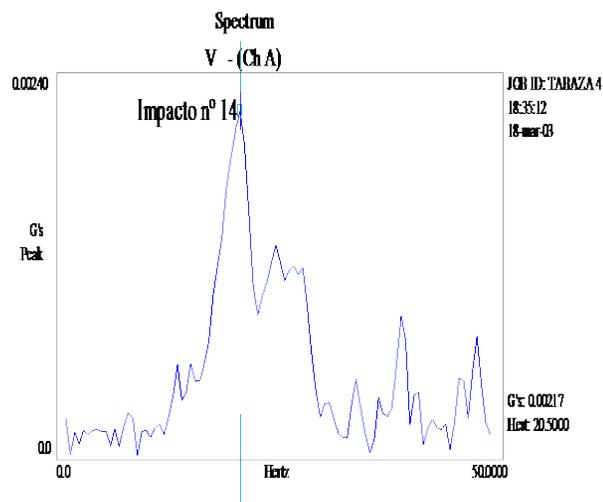
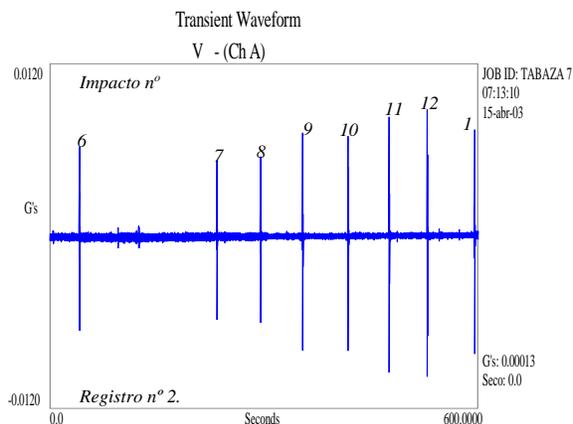


Figura 4. Registro n° 2.
Fuente: el autor

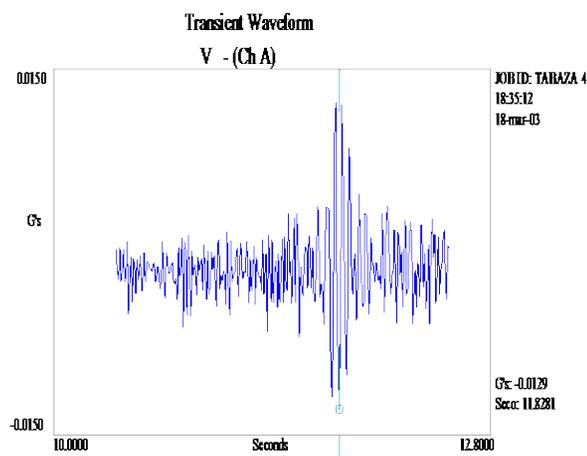
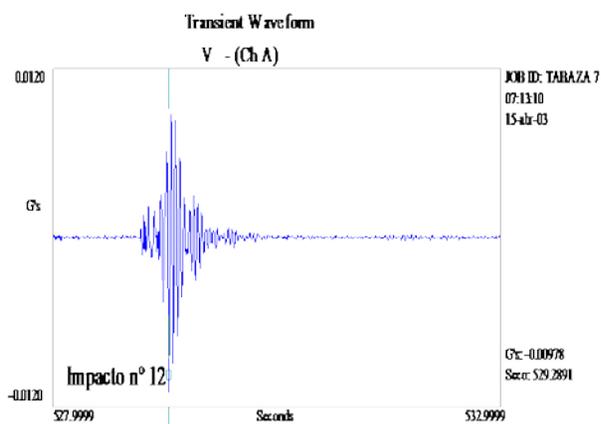


Figura 6. Ampliación del impacto n° 14 y espectro del mismo.
Fuente: el autor

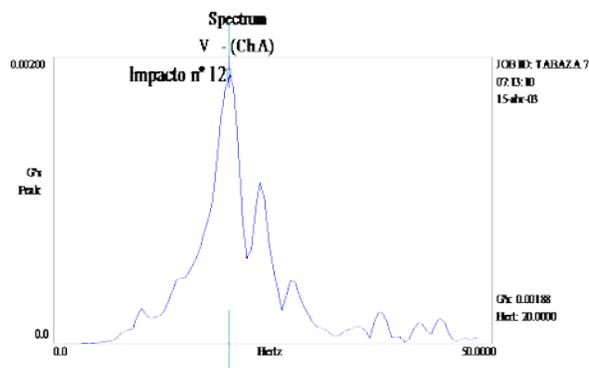


Figura 5. Ampliación del impacto n° 12 y espectro del mismo.
Fuente: el autor

6. Conclusiones

Durante la realización del presente trabajo -debido a las razones que se han citado en la introducción- no ha sido posible

efectuar mediciones de impactos producidos con la bola de mayores dimensiones, la cual sin lugar a dudas hubiese causado un estruendo y vibraciones inducidas sensiblemente mayores que las aquí expuestas. A pesar de todo, los registros obtenidos con la bola de menores dimensiones -sin izarla hasta su cota máxima- se considera que ya alcanzan por si mismos una magnitud sobradamente intolerable, siendo presumiblemente las correspondientes aceleraciones la causa principal de los daños que se observan en la vivienda, tanto en elementos como: falsos techos, enlucidos, pisos, tabiques, etc.

Tal como se ha mencionado en el apartado 5.1.3, la composición de las aceleraciones según sus componentes resulta de la expresión (1), por lo que el efecto dinámico es aún superior al captado en la dirección vertical. Además -y he aquí la conclusión final de este párrafo- los esfuerzos en los elementos resistentes, con cargas predominantemente distribuidas y puntuales, aumentan de forma drástica proporcionalmente a la magnitud de la aceleración actuante sobre las masas que gravitan sobre ellos.

Si bien la representación gráfica en las páginas anteriores, de los registros de algunas de las mediciones realizadas, constituye una prueba palpable de la problemática que se está analizando, el testimonio del técnico que suscribe, testigo de excepción de los impactos que se indican, corrobora que las vibraciones inducidas por los impactos, sobre la vivienda de la demandante, son inaceptables para unas condiciones de confort y de calidad de vida óptimas.

En relación con la estructura de la vivienda, ha de mencionarse que toda sollicitación cíclica (impactos aislados en el tiempo varias veces por semana) entraña un proceso de acumulación de daño, que no ha sido previsto en su día -por razones obvias- en el proyecto de ejecución de la vivienda; por lo que se considera, que la continuación de las labores de impacto en los niveles presentes constituye una imprudencia. Sin lugar a dudas, los daños actuales manifiestan un aviso del previsible agravamiento de los mismos, y la aparición de otros posibles adicionales que se producirían en un futuro, de continuar con las citadas labores.

Por último -en lo que a la alteración de la vida normal y a las molestias sobre las personas que habitan la vivienda se refiere- se insiste en que las oscilaciones verticales (que como hemos dicho presentan una mayor magnitud que las horizontales longitudinales y transversales) son -evidentemente, después de todo lo mencionado- claramente perceptibles, y capaces de interrumpir el descanso de las personas, dándose además la circunstancia de que esta componente de las oscilaciones es la más sensible para el cuerpo humano.

Como ya se ha mencionado -en la actualidad-, dado que no existe normativa de referencia sobre el problema analizado, y por otra parte, entre la comunidad científica internacional, tampoco hay acuerdo entre los niveles de vibración admisibles en normas que tratan problemas relacionados (hinca de pilotes, voladura de rocas, paso de trenes, etc.); las recomendaciones de actuación que se pueden dar para el problema tratado son de carácter general. Entre ellas se pueden citar:

- Aumentar la distancia de separación, en la medida de lo posible, de zonas urbanas y residenciales.
- Esta distancia es variable y no solo depende de la magnitud del impacto (dependiente a su vez de la masa proyectada y de la altura de izado), si no también de la propia naturaleza del terreno circundante. Al transmitirse las vibraciones por ondas a través del suelo, estas pueden amortiguar en mayor o menor medida, el movimiento del mismo según el tipo de terreno por el que se desplazan.
- Debido a esta heterogeneidad de los terrenos, antes del inicio de labores industriales seriadas en el tiempo, se hace necesario la realización de un informe técnico previo, en donde a través de una monitorización de las vibraciones del suelo en la ubicación de la zona de actividad, permita valorar la idoneidad del emplazamiento previsto o la conveniencia de aumentar la distancia de seguridad; en función de la tipología de las construcciones próximas, del uso de las mismas, y de los riesgos de daños.

References

- [1] López-Jimeno, C., Manual de perforación y voladura de rocas, Instituto Tecnológico Geominero de España, España 1994.
- [2] Vega, J., Fraile, A., Alarcón, E., Hermanns, L., Dynamic response of underpasses for high-speed train lines, *J. Sound Vib.* 331, pp. 5125-5140, 2012.
- [3] Romero, A., Galvín, P., Domínguez L., Comportamiento dinámico de viaductos cortos considerando la interacción vehículo-vía-estructura-suelo, *Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing.* 28, pp. 55-63, 2012.
- [4] Norma UNE 22-381-93. Control de vibraciones producidas por voladuras. AENOR, España.
- [5] Clough, R.W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw Hill, USA, 1993.
- [6] Vega, J., Hermanns, L., Alarcón, E., Fraile, A., Measuring dynamic effects on underpasses of high-speed railway lines, *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, volume 10, issue 1, pp. 41-56, 2014.
- [7] Vega, J., Hermanns L., Alarcón E., Fraile, A., Fórmulas para el cálculo del factor de impacto de estructuras semienterradas en líneas de ferrocarril de alta velocidad, *Rev. int. Métodos numér. cálc. diseño ing.*, 30, pp. 188-193, 2014.

L.M. Villa-García, is PhD. degree in Eng. Construction and Fabrication, Industrial Engineer (1995), Technical Industrial Engineer (1991), both at the Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Spain. Technical Specialist (1988), Assistant Technician (1985), both in Revilla Gígedo Foundation, Gijón, Spain. Currently professor of the Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Spain, since 1998.
ORCID: 0000-0002-1353-3434



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5172