



Determinación de daños generados por vibraciones en una estructura de mampostería y concreto armado

Determination of damage generated by vibrations in a masonry and reinforced concrete structure

Carla Begoña Alvarado Gómez
cbalvaradog@gmail.com

Universidad de Carabobo, Venezuela

María José Cristancho Acosta
mariajcristancho@gmail.com

Artículo recibido mayo 2018 | Arbitrado en junio 2018 | Publicado en septiembre de 2018

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito determinar la existencia de daños ocasionados por vibraciones en una estructura de mampostería y concreto armado, mediante la utilización de acelerómetros como fuente de medición de las excitaciones producidas en la estructura, los cuales, vienen pre-instalados en dispositivos celulares. Esta información es procesada utilizando el software Seismosignal v4.3, que provee las gráficas de aceleración, velocidad y desplazamiento de la partícula en movimiento en cualquier instante de tiempo durante la medición. Se usó la teoría de las rigideces, para analizar la concentración de tensiones producidos por los desplazamientos en los puntos reales de medición. Los valores de vibración resultantes de la aplicación de la fuerza sobre la estructura fueron procesados, traducidos en valores de velocidad máxima de partícula y parámetros de interés, para ser contrastados con los estándares permitidos por las normas DIN 4150 y SN 640312, resultando estar dentro de los parámetros normales máximos de las mismas, teniendo en cuenta que con un margen del 30% por encima de los valores fijados por dichas normativas, significa un pequeño aumento en la probabilidad de daños mínimos.

Palabras clave: Vibraciones, Acelerómetro, velocidad de partícula

ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the existence of damage caused by vibrations in a masonry and reinforced concrete structure, using accelerometers as a source of measurement of the excitations produced in the structure, which are pre-installed in cellular devices. This information is processed using Seismosignal v4.3 software, which provides the acceleration, velocity and displacement graphs of the moving particle at any instant of time during the measurement. The stiffness theory was used to analyze the concentration of stresses produced by displacements at the actual measurement points. The vibration values resulting from the application of force on the structure were processed, translated into values of maximum particle speed and parameters of interest, to be contrasted with the standards allowed by the DIN 4150 and SN 640312 standards, resulting in being within their maximum normal parameters, taking into account that with a margin of 30% above the values set by said regulations, it means a small increase in the probability of minimum damage.

Key words: Vibrations; Accelerometer; particle speed



INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la ingeniería estructural (Valencia, Guidiño, y Díaz, 2006), el tema que mayor importancia ha recibido es el análisis de las vibraciones causadas por los movimientos de placas tectónicas, por su alta peligrosidad (Ramírez-Durán y Urgellez-Cardoza, 2011). A pesar de que existen otros tipos de causas de vibración, como las de origen antrópicas, que también interactúan con las estructuras. En países como Canadá, Estados Unidos y Alemania existe gran cantidad de investigaciones y diferentes normatividades sobre fenómenos de vibración relacionados con las actividades humanas, abriendo un nuevo escenario llamado: relación Humano - Estructura (Arias-Castro y Martínez-Oropesa, 2016).

En Venezuela no existen normativas o manuales referentes al manejo de la problemática o modo de proceder en cuanto al control de vibraciones causadas por la actividad humana, partiendo de la comparación de umbrales. Debido a esta realidad, es indispensable realizar estudios de investigación y nuevos aportes en las ciencias que estudian la relación del ser humano con su entorno y técnicas de información, para así disminuir el impacto de los eventos tanto naturales como antrópicos, que inciden directamente en la sociedad.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objeto determinar la existencia de algún tipo de daño en una estructura aporticada de mampostería y concreto armado o su ocurrencia futura, con el fin de informar del alcance y los efectos dinámicos, sobre la totalidad de la estructura y de su influencia sobre la sensación de inseguridad del personal de trabajo en la planta de alimentos. De igual manera, la intención de este trabajo es que

sea utilizado como herramienta base para la buena práctica y conducción de problemas de vibraciones en estructuras.

METODOLOGÍA

Levantamiento geométrico de la estructura

A partir de información fotográfica y medidas tomadas en sitio del pórtico en estudio, se realiza el levantamiento geométrico, tomando como referencia las medidas de un bloque de concreto con dimensiones nominales de 20x20x40 cm (Pérez, Cabanillas, Hinojosa, y Borbón, 2011).

Modelaje del Pórtico

Para la elaboración del modelo, se utiliza el software SAP 2000 V20 (Alvarado y Cristancho, 2018). Al no existir una norma venezolana que trate específicamente sobre bloques de ventilación, se puede utilizar la Norma COVENIN 42-82 "Bloques huecos de concreto" (COVENIN, 1982) como referencia para clasificarlo y hacerlo cumplir con una serie de requisitos de apariencia y acabado, químicos y mecánicos. Las propiedades del mortero, se consideran a partir de, la Norma ASTM-C270 (ASTM, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry) *American Society for Testing and Materials* (Sociedad americana para ensayos y materiales, ASTM), que establece la resistencia a la compresión según su uso.

Para el caso que los elementos cumplen con los requisitos mínimos establecidos en las normas respectivas, se parte de la clasificación de los bloques de acuerdo a los agregados y según su uso como bloques semipesados y de tipo A1. De igual manera se considera un mortero tipo N (mortero de mediana resistencia para uso general en mampostería, paredes internas y divisiones,



mampostería, paredes internas y divisiones, combina resistencia, trabajabilidad y economía), según lo establecido en la Norma ASTM C-270 (ASTM, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry).

En los extremos de la estructura se tienen perfiles metálicos definidos como columnas HEA-200, medidas directamente en sitio. La resistencia a compresión del concreto de los elementos como vigas de corona y columnas o machones se fija a partir de un ensayo de índice de rebote (esclerómetro Schmidt) (Liniers, 1982) cumpliendo con los procedimientos establecidos en la Norma ASTM C-805-02 "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete" (ASTM, ASTM C805 - 02. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, 2002), obteniéndose como resultado de la correlación de la resistencia elástica y de la resistencia a compresión un $f'c = 180 \text{ kgf/cm}^2$ con una dispersión máxima $\pm 57 \text{ kgf/cm}^2$.

Antes de proceder al modelaje de la estructura aporticada de mampostería y concreto armado, se establece una relación del elemento sólido de un bloque con un elemento área, a partir de las rigideces y deformaciones por carga a las que se somete en condiciones reales dicho elemento. Una vez establecida la relación proporcional del elemento sólido con el elemento tipo Shell, se procede a la elaboración de un modelo matemático de la estructura de mampostería y concreto armado, basada en una discretización por el método de elementos finitos, definiendo pequeñas áreas rectangulares que darían forma al diseño de cada bloque y junta dentro del pórtico, con el objetivo de realizar una simulación del comportamiento dinámico de la pared. Las principales propiedades dinámicas obtenidas, fueron las

frecuencias naturales de vibración de la estructura y sus configuraciones modales asociadas.

Se presenta el paso a paso de la metodología de elaboración del modelo numérico de la locación donde se efectuaron las mediciones, en Software SAP 2000 (Alvarado y Cristancho, 2018):

1. Definición de los materiales: debe ser el especificado el material a utilizar, el espectro varía entre: concreto, acero, bloques, mampostería, etc, introduciendo correctamente las especificaciones de cada material.
2. Definición de las propiedades de las secciones: Se especifican las secciones tipo frame para los elementos estructurales y tipo área para la mampostería.
3. Se define la fuente de masa, debido a la masa de los elementos
4. Se procede a definir la grilla base sobre la cual serían modelados todos los elementos previamente definidos, tomando en cuenta las dimensiones de los bloques, el tamaño promedio de las juntas entre los mismos y el eje central de los elementos tipo viga y columna
5. El procedimiento siguiente consistió en rellenar la grilla base con los elementos tipo shell que conforman la estructura, como también con las vigas, columnas y machones definidos como elementos tipo frame. Además de la adición de los puntos de estudio donde fueron tomadas las mediciones de aceleración.

Registro de mediciones

Para la recaudación eficiente de datos, se procede a fijar los dispositivos móviles a una caja de seguridad elaborada en madera con cierre a presión, la cual, fue



previamente conectada a la estructura mediante tornillos de anclaje.

Luego de creación de distintos modelos de datos y creación de archivos de medición de prueba por parte de los equipos involucrados, fue iniciado el proceso de toma de datos, procurando que el tiempo de inicio fuera el mismo para todos los dispositivos. Con lo cual, se procedió a dar luz verde al proceso de excitación de la estructura mediante el golpeteo del monta cargas.

En esta etapa se realizaron registros de aceleración causada por la operación de la maquinaria, con el fin de evaluar el nivel de vibración que se presenta en la pared en condiciones actuales de operación, tomando lecturas en puntos estratégicos localizados en la pared.

Equipos

Teléfonos celulares con acelerómetros. Los registros para los diferentes puntos en la estructura se tomaron a partir de la aplicación Science Journal

Sitios de medición

Se ubicaron los equipos en tres puntos estratégicos y susceptibles a la vibración en la pared, mediante soportes permitiendo la fijación de los mismos, procurando obtener mediciones exactas y evitar la ocurrencia de resultados erróneos. Los lugares exactos de los puntos de medición se encuentran en (Alvarado y Cristancho, 2018). Posteriormente a indicaciones dadas al operador, encargado de la maniobra y acción del monta-cargas se generó una interacción entre este y las zonas cercanas a los puntos establecidos.

Tiempo de medición

El tiempo abarcó aproximadamente tres (3) minutos.

Variables de medición

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

- Az: aceleración vertical (perpendicular al plano de la pared).
- Ax: aceleración longitudinal.
- Ay: aceleración transversal.

Procesamiento de datos

Para cada locación se realizó un (1) registro con los tres (3) acelerómetros (ISO, 2003) en las posiciones anteriormente señaladas. Los registros se efectuaron en los instantes donde la maquinaria operaba. En la toma de datos in situ se almacenaron registros de aceleración en el tiempo. Tomando los registros y calculando su respectivo espectro de Fourier (Espada, y otros, 2003) mediante el software Seismosignal y así determinar el modo de frecuencia dominante.

El procesamiento de los datos comienza tomando los registros obtenidos por los equipos y ordenándolos en un archivo Excel para luego crear archivos con extensión *.txt.

Interpretación de datos

Las vibraciones se registraron como componentes en tres (3) direcciones ortogonales (Bravo, 1989). 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, velocidad y desplazamiento (como la señal en el tiempo) de su mayor componente.



- La frecuencia dominante de la vibración, obtenida a través de un espectro de frecuencias de la señal.
- De ocurrir una situación en la 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 ser efectuado un análisis de Fourier para generar el espectro.

De las tres componentes registradas fue seleccionada la dirección z, ortogonal al plano de la pared (az), por ser la que presenta niveles de magnitud sensiblemente superiores a las componentes longitudinal (ax long) y transversal (ay trans); donde se produjo además la circunstancia de que dicha componente vertical, fue la más sensible en lo que respecta a la incomodidad de las personas y para la que, además se presume posibles causa de daños estructurales.

Análisis por elementos finitos

Se procedió a realizar una aproximación sucesiva para encontrar el valor de la fuerza generada en la estructura, específicamente en la viga de corona simulando la acción del monta cargas y la separación de sus paletas (una distancia de 80 cm) distribuidos en dos puntos, con el fin de que se registrara en zona de medición el valor del desplazamiento máximo obtenido con el uso del software Seismosignal v4.3, cuyos valores resultantes fueron de 3000 kgf, los mismos fueron añadidos a un patrón de carga y a un caso de carga, ambos definidos como Fy, por ser esta su dirección de aplicación.

Una vez cargadas todas las características del caso de carga a estudiar, la fuerza generada en la parte superior del

pórtico, así como los elementos que conforman la estructura, se procedió a realizar la corrida del modelo. Discretizando según el caso de estudio, en el apartado "Set Analysis Cases to Run".

Análisis del estado límite de vibración

En esta etapa se realiza un análisis del nivel de vibración que se produce en la estructura, comparando los niveles máximos de velocidad de partícula obtenidos a partir del uso del software Seismosignal v4.3, con los límites permisibles de vibración, con el fin de establecer el comportamiento estructural del pórtico y la sensible percepción de las personas que operaran en el sitio.

La normativa DIN 4150 (DIN, 2002), en su parte segunda trata sobre los efectos de las vibraciones de diversos orígenes sobre las personas y permite obtener un valor empírico para la intensidad de la percepción conocido por KB (González, 2013). La norma DIN 4150 (DIN, 2002), establece los valores máximos de velocidad de vibración (en mm/s) en función de la frecuencia, para que no se observen daños en diferentes tipos de edificaciones (comercial, viviendas, edificios, industrias).

De igual manera, la norma SN 640312 (Alvarado y Cristancho, 2018), creada específicamente para vibraciones, establece los valores máximos de velocidad dependiendo de la susceptibilidad de la edificación, la frecuencia de las sollicitaciones y la frecuencia dominante.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como se mencionó anteriormente, la señal de la que derivaran todos los resultados será en la dirección z, ortogonal al plano de la pared (az), por ser la que



presenta niveles de magnitud sensiblemente superiores a las componentes longitudinal (ax long) y transversal (ay trans).

El procesamiento de señales se realizó mediante el uso del software Seismosignal v4.3, desde donde se obtuvo para cada punto, valores de aceleración, velocidad, desplazamiento y espectro de fourier, para obtener la frecuencia.

Criterios estructurales

La Norma DIN 4150 (DIN, 2002) establece los valores indicativos en la tabla 3, desde donde se fijan las características de la estructura estudiada según su uso, partiendo de la línea 1, donde se tienen edificaciones del tipo industrial y la velocidad de partícula en el plano horizontal superior, como variables propias del pórtico. La velocidad máxima de partículas de 40 mm/s, valor bajo el cual se elimina cualquier sospecha de daño estructural.

En la presente investigación se asumieron las velocidades de partícula de comparación con el plano horizontal superior de la estructura, conociendo que la esbeltez y altura del pórtico condicionarían los desplazamientos y oscilaciones más desfavorables en la parte superior de la misma.

En la Normativa Suiza SN 640312 (Alvarado y Cristancho, 2018) se establecen las velocidades pico de partícula máximas permitidas de acuerdo a la susceptibilidad de la construcción ante las vibraciones (Susceptibles y poco susceptibles) y la frecuencia u ocurrencia de las vibraciones.

La clasificación del tipo industrial de la estructura condiciona la evaluación dentro del contexto de la norma mencionada como una edificación poco susceptible a daños por vibraciones, además de establecerse la ocurrencia de la excitación debido a los

golpes de forma ocasional, con lo cual, al interceptarse con los valores de frecuencia menores de 30 Hz, derivan en un valor de velocidad normal permitida de 30 mm/s.

Así mismo, se conoce que las normas asumen diversos factores de seguridad a la hora de estimar los valores máximos permisibles y dentro de las especificaciones de uso de cada estructura, razón por lo cual, son flexibles en cuanto a la estimación de daños. En los casos de estudio de estructuras sin ningún daño visible, se extiende el valor máximo de velocidad permitido hasta el 30% más del valor indicado en la tabla, estableciéndolo como un límite sensible a la condición de la estructura. Con la obtención de valores del doble del permitido, los daños esperados serían fisuras pequeñas de tipo superficial, multiplicando por 3 el valor máximo esperado se esperarían fisuras continuas y daño estructural dentro de la construcción.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los valores obtenidos en cada punto de medición de velocidad vertical pico fijados, se encuentran dentro del rango de extensión de aceptación (valores hasta 30% por encima del máximo), establecidos por la Norma DIN 4150 (DIN, 2002), y al valor límite con la norma suiza SN 640312 (Alvarado y Cristancho, 2018).

Criterios psicológicos

Dentro de este apartado se clasifica la vibración inducida en la estructura debido a la percepción humana, en el caso particular de la investigación en curso, se somete a revisión la edificación debido a la presencia de trabajadores en el área de funcionamiento del pórtico estudiado.

La Norma DIN 4150 (DIN, 2002) en su parte 2 editada en 1999, caracteriza y define la intensidad de la percepción



humana de las vibraciones debido a un parámetro conocido como KB, el cual depende directamente de la frecuencia fundamental de la estructura, así como de la amplitud (d), variable que puede ser obtenida al conocer la velocidad de partículas máxima, así como la aceleración presentada dentro de la edificación producto de una excitación. La amplitud (d), es relacionada con la velocidad o aceleración.

El valor KB que se obtiene de este cálculo debe compararse con los valores del criterio de aceptación teniendo en cuenta factores como el uso del edificio, la frecuencia de ocurrencia de las vibraciones, la duración de los efectos y el momento del día en que se produce la vibración.

Debido al uso de la estructura del tipo industrial, así como la frecuencia ocasional de las vibraciones y el tiempo en el que se realizan las excitaciones (de día), el valor de Kb permitido es de 12. Al compararlos con los valores obtenidos de forma experimental con las excitaciones inducidas, se determinó que los resultados están dentro del límite de lo establecido en la norma, de forma que las vibraciones observadas en la edificación están dentro de los parámetros aceptables de intensidad de percepción.

Criterios de productividad

El uso de la estructura en estudio consiste en ser un apoyo para estantes de almacenamiento de producto terminado (sacos de alimentos para animales), así como una pared divisoria entre el área de depósito y el área de mantenimiento de la planta. La edificación a pesar de sus tres décadas de construcción, así como su cambio de uso con el paso del tiempo, no presenta ningún tipo de falla visible. Las vibraciones inducidas por el golpeteo del

monta cargas de forma ocasional solo han generado movimientos oscilatorios mínimos percibidos por trabajadores, experimentalmente se ha demostrado que dichas vibraciones entran dentro de los rangos de observación permisibles y así mismo, la funcionalidad de la estructura sigue intacta, de forma que dichas vibraciones no afectan la productividad de la planta, ni comprometen ningún equipo dentro de la empresa.

CONCLUSIONES

Se elaboró el modelo matemático de la estructura de mampostería y concreto armado, basada en la discretización por el método de elementos finitos, dando como resultado la simulación del comportamiento dinámico de la pared.

Los valores de vibración resultantes de la aplicación de la fuerza sobre la estructura fueron procesados, traducidos en valores de velocidad máxima de partícula y parámetros de interés, para ser contrastados con los estándares permitidos por las normas DIN 4150 y SN 640312, resultando estar en el límite de los parámetros normales máximos de las mismas, teniendo en cuenta que un margen del 30% por encima de los valores fijados por dichas normativas, significa un pequeño aumento en la probabilidad de daños mínimos, en forma experimental y en forma física, traducido como la percepción humana del movimiento de la estructura.

En el caso del análisis por elementos finitos para el estudio de las tensiones de Von Mises dentro de la estructura, mediante la aplicación de un caso de carga que simulaba el desplazamiento máximo obtenido de la traducción de la señal excitadora se obtuvo, que el 95% de la estructura está sometida a tensiones de



carácter bajo, que no provocan ningún tipo de riesgo a la misma; sin embargo existe un mínimo porcentaje representado por el 5% de la concentración de tensiones, ubicado en las zonas de empotramiento de las columnas, en donde se presentan valores elevados de tensión, los cuales indican que se producirse algún agrietamiento o fisura en el futuro, vendría dado por la repetición asidua de las vibraciones en el pórtico en un tiempo muy prolongado y comenzaría en la zona inferior de la estructura, cercana a los empotramientos de las columnas.

Con base en la investigación realizada y en observaciones directas se concluye que la estructura no presenta ningún tipo de daño superficial, ni continuo, además, la excitación a la que es sometida de forma ocasional, puede ser perceptible para el ser humano, mas no indica ningún riesgo de falla de la misma. Asimismo, los valores de velocidad experimentados por los puntos críticos del pórtico, entran dentro de los estándares normativos, permitiendo concluir que la estructura no está próxima a sufrir ningún tipo de irregularidad o fallo estructural debido a la causa en estudio, si se mantienen las mismas condiciones de operación.

REFERENCIAS

- Alvarado, C., y Cristancho, M. (2018). *Determinación de los daños generados por las vibraciones en una estructura de mampostería y concreto armado, ubicada en la planta de alimentos para animales MERSAN CA en el Tanaquillo, Estado Cojedes*. Valencia: Universidad de Carabobo
- Arias-Castro, G., y Martínez-Oropesa, C. (2016). Evaluación de la exposición al riesgo por vibraciones en el segmento mano brazo en compañías del sector metalmecánico. *Medicina y seguridad del trabajo*, 62(245), 327-336
- ASTM. (2002). *ASTM C805 - 02. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. West Conshohocken: ASTM
- ASTM. (s.f.). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. ASTM
- Bravo, J. (1989). Tres teomas fundamentales de la teoría del diseño de estructuras. *Informes de la construcción*, 40(399), 57-66
- COVENIN. (1982). *COVENIN 42-82. Bloques Huecos de Concreto*. Caracas: SENCAMER
- DIN. (2002). *DIN 4150. Vibrations in buildings*. Berlin: DIN
- Espada, L., Sanjurjo, M., Urréjola, S., Bouza, F., Rey, G., y Sánchez, A. (2003). Ventajas del análisis Wavlet sobre el análisis de Fourier para la interpretación del ruido electroquímico. *Revista de metalúrgica*, 39, 72-79
- González, B. (2013). *Diseño y validación de una escala de percepción de la velocidad para monitorizar la intensidad en el entrenamiento de la fuerza*. Granada: Universidad de Granada
- ISO. (2003). *ISO 16063-21:2003. Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21: Vibration calibration by comparison with a reference transducer*. Washington, DC : ISO
- Liniers, A. (1982). Determinación de la resistencia del hormigón mediante ensayos no destructivos realizados con esclerometro y ultrasonido. *Informes de la Construcción*, 33(338), 49-55
- Pérez, J., Cabanillas, R., Hinojosa, J., y Borbón, A. (2011). Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico. *Información tecnológica*, 22(3), 27-38



Ramírez-Durán, J., y Urgellez-Cardoza, I. (2011). La asignatura geotectónica y su aplicación en la defensa nacional. *Ciencia y Futuro*, 1(2), 11-20

Valencia, D., Guidiño, J., y Díaz, E. (2006). Herramienta de aprendizaje activo en las asignaturas de ingeniería estructural. *Ingeniería y universidad*, 10(1)