

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES EN LAS ESTRUCTURAS

MSc. Ing. Alejandro Hernández Hernández¹, Ing. Annarelys Salas Navarro²

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. alejandro.hdez@umcc.cu

2. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. annarelys.salas@umcc.cu

Resumen

Uno de los agentes causantes de daños en las construcciones es la acción de las vibraciones. La percepción de vibraciones mecánicas constituye una experiencia humana relativamente reciente, y en términos de conocimiento, los estudios señalan que es un campo aún en estudio. Como muchas variables ambientales, la vibración es particularmente significativa en el contexto urbano debido a las concentraciones de personas residiendo cerca de las principales conexiones de transporte (carretera y ferrocarril), muy cerca de la construcción de otros edificios y de la actividad industrial. En este trabajo se analizan las vibraciones como fenómeno, debido a la importancia que tiene para el ingeniero civil desde el punto de vista físico-mecánico, sus fuentes de surgimiento, su propagación y aspectos básicos en su tratamiento para disminuir su efecto negativo en las estructuras.

Palabras claves: Vibraciones, resonancia, análisis dinámico.

Introducción

El control de vibraciones en estructuras es de marcado interés, debido a la continua innovación en materiales, los cuales ofrecen cada día mejores prestaciones, haciéndolos de gran interés para muchas aplicaciones en ingeniería. Las estructuras presentan vibraciones propias asociadas a sus características que se denominan vibraciones naturales, cuando estas se conjugan con las vibraciones exógenas se puede producir el fenómeno de resonancia que amplifican el efecto de las vibraciones.

En 1713 el matemático inglés Brook Taylor (1685-1731), halló la solución teórica (dinámica) del problema de la cuerda vibratoria, y a su vez presentó el famoso teorema de Taylor sobre una serie infinita. El procedimiento adoptado por Taylor fue perfeccionado con la introducción de derivadas parciales en las ecuaciones de movimiento por Daniel Bernoulli (1700-1782), Jean D'Alembert (1717-1783) y Leonard Euler (1707-1783). Euler en 1744 y Daniel Bernoulli en 1751 estudiaron por primera vez la vibración de vigas delgadas apoyadas y sujetas de diferentes maneras, su método se conoce como teoría de vigas delgadas o de Euler-Bernoulli. (Rao, 2011)

Entre los contribuyentes modernos a la teoría de vibraciones, los nombres de Stodola, De Laval, Timoshenko y Mindlin son notables. Aurel Stodola (1859-1943) contribuyó al estudio de vibración de vigas, placas y membranas. Stephen Timoshenko (1878-1972), al considerar los efectos de la deformación producida por inercia y cortante rotatorios, presentó una teoría mejorada de vibración de vigas, la cual se conoce como teoría de Timoshenko, o de vigas gruesas. R. D. Mindlin presentó una teoría parecida para analizar la vibración de placas gruesas, incluidos los efectos de deformación por inercia y cortante rotatorios. (Rao, 2011)

Hasta hace aproximadamente 40 años, los estudios de vibración, incluso los que tienen que ver con sistemas de ingeniería complejos, se realizaron utilizando modelos brutos, con sólo unos cuantos grados de libertad. Sin embargo, el advenimiento de computadoras de alta velocidad en la década de 1950 hizo posible tratar sistemas moderadamente complejos y generar soluciones aproximadas en forma semidefinida, con métodos de solución clásicos y la evaluación numérica de ciertos términos que pueden expresarse en forma cerrada. El desarrollo simultáneo del método del elemento finito permitió a los ingenieros utilizar programas digitales para realizar el análisis de vibración numéricamente detallado de sistemas mecánicos, vehiculares y estructurales que despliegan miles de grados de libertad. (Rao, 2011)

La vibración y el ruido, entendido este último como los sonidos no deseados, son fenómenos vinculados, y desde esa perspectiva, el ruido es una parte de la energía de la vibración que se transforma por variaciones de presión. En los procesos dinámicos es normal que exista ruido y vibraciones, siendo esta el resultado de fuerzas dinámicas en máquinas o estructuras que tiene partes en movimiento o sometidas a fuerzas variables.

A menudo, es necesario evaluar edificios existentes que, en condiciones de servicio, presentan respuestas vibratorias indeseadas. El abordaje requiere un análisis integral para cuantificar los niveles vibratorios y justificar la toma de decisiones con intervenciones en la

estructura y/o máquina, propensas a amortiguar los efectos de los niveles vibratorios detectados.

Desarrollo

Vibraciones

Se considera vibración u oscilación a todo movimiento oscilatorio de un cuerpo sólido respecto a una posición de referencia. Las vibraciones se caracterizan por su frecuencia y por su amplitud; siendo la frecuencia el número de veces por segundo que se realiza el ciclo completo de oscilación y se mide en Hercios (Hz) o ciclos por segundo. (Krysinski & Malburet, 2007)

Las Vibraciones Mecánicas estudian los movimientos vibratorios de los cuerpos, sistemas y las fuerzas dinámicas asociadas, constituyen un fenómeno que puede generar: aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales y daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral. (Reyes, 2009)

Las vibraciones se clasifican por la causa del movimiento y la determinación de esta, por la pérdida de energía y por las características de los elementos. (Rao, 2011; Dukkipati, 2007)

- ✓ Según la causa del movimiento se originan dos tipos de vibraciones:
- Vibraciones libres: el sistema luego de una perturbación inicial queda vibrando por sí mismo, es decir, es sacado de su estado de equilibrio estable por impulso o empuje, siendo esta causa eliminada posteriormente. La energía del sistema constará de la cinética y la elástica, existiendo un intercambio continuo entre las mismas. La oscilación de un péndulo simple es un ejemplo de vibración libre.

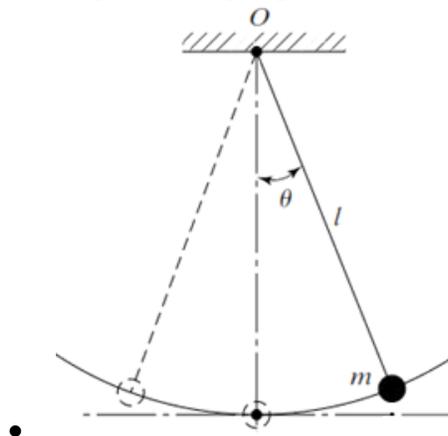


Fig.1.1 Péndulo simple. (Rao, 2011)

- Vibraciones forzadas: el sistema es sometido a una fuerza excitatriz externa (usualmente periódica). Si los movimientos provocados por la actuación de una carga dinámica varían su dirección más de una vez, dentro de un lapso de tiempo, entonces tal movimiento se denomina oscilación forzada.
- ✓ Según la determinación de la causa del movimiento:
 - Vibraciones deterministas: el valor de la fuerza excitatriz se conoce en cada instante de tiempo. Para este tipo de vibraciones se establecen tres clasificaciones: armónicas, periódicas (no armónicas) y no periódicas.
 - Vibraciones no deterministas (estocástica o aleatoria): el valor de la fuerza excitatriz no puede ser predicho con exactitud, pero se dispone de cierta información estadística sobre el mismo.

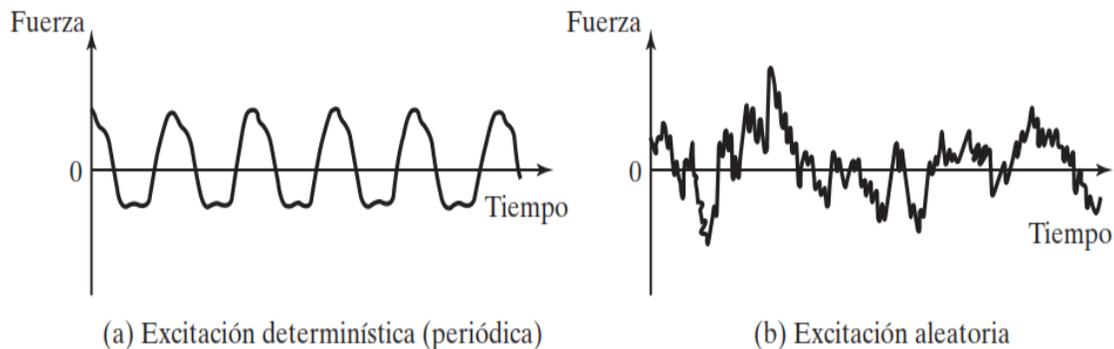


Fig. 1.2 Excitación determinística y aleatoria (Rao, 2011)

- ✓ Según la pérdida de energía:
 - Vibraciones no amortiguadas: no hay energía perdida o disipada por fricción u otra fuerza no conservativa. Si las resistencias son pequeñas, el proceso de amortiguamiento va lentamente por lo que en estos casos en los cálculos se prescinde de la resistencia, y se obtiene, teóricamente, el proceso de oscilaciones no amortiguadas, durante el cual la energía comunicada al sistema no disminuye y el proceso de oscilaciones no está limitado en el tiempo.
 - Vibraciones amortiguadas: la cantidad de energía disipada durante el movimiento vibratorio no es despreciable. Las diferentes resistencias exteriores e interiores al movimiento del sistema, absorben continuamente una parte de la energía del

sistema, siendo amortiguado el proceso de las oscilaciones, es decir, limitado en el tiempo.

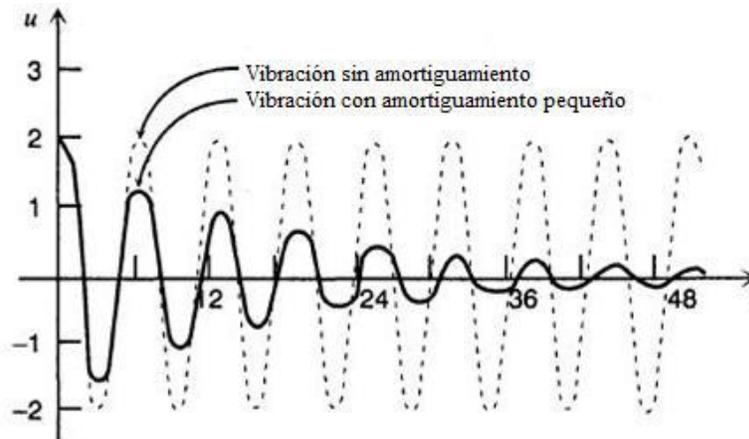


Fig.1.3 Amortiguamiento.

- ✓ Según las características de los elementos:
 - Vibraciones no lineales: Alguno de los componentes básicos del sistema (inercial, elástico y amortiguador) se comporta de manera no lineal.
 - Vibraciones lineales: Todos los componentes básicos del sistema se comportan de forma lineal.

La amplitud de la vibración puede ser descrita en términos de la aceleración, la velocidad o el desplazamiento. Estas variables son interdependientes y se condicionan entre sí. La aceleración es la unidad básica para medir la magnitud de la vibración.

Frecuencia natural de oscilación

La elasticidad es la propiedad que tienen los cuerpos de deformarse bajo la acción de fuerzas externas y de recuperar su forma una vez que desaparecen estas fuerzas; dentro de ciertos rangos la deformación para todos los cuerpos es proporcional a la fuerza deformante aplicada. Por tanto, antes de alcanzar otra vez su estado de equilibrio, los cuerpos desarrollarán un cierto número de oscilaciones; y cada uno, dependiendo de su forma, masa, material, así como de las restricciones a que esté sometido, oscilará con ciertas frecuencias propias a las que se les denomina frecuencias naturales. (Peralta et al., 2009)

Entonces la cantidad de ciclos por unidad de tiempo se llama frecuencia de oscilación y si se deja que un sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial, la frecuencia con la cual oscila sin la acción de fuerzas externas se conocerá como frecuencia natural, por tanto, se puede concluir que cualquier objeto oscilante tiene una frecuencia natural, siendo su tendencia a vibrar luego de una perturbación. (Kelly, 2000; RAO, 2011)

En sistemas mecánicos de un grado de libertad, es la frecuencia del movimiento armónico que resulta al introducir un desplazamiento y/o una velocidad inicial a un sistema de un grado de libertad, que está en posición de equilibrio, y dejarlo vibrar libremente sin amortiguamiento. (RAO, 2011)

En sistemas con N grados de libertad, cada modo natural de vibración (vector propio) tendrá una frecuencia natural (valor propio) asociada, que será la del movimiento armónico resultante al desplazar los nudos del sistema respecto de su posición de equilibrio estático en la forma del modo natural correspondiente. (RAO, 2011)

En cualquier caso, la o las frecuencias naturales constituyen un parámetro modal intrínseco al sistema y sólo dependerán de la rigidez (k) e inercia (m) del sistema y de su distribución por el sistema en el caso del N grados de libertad, pero no del tiempo ni de las condiciones iniciales. Sean cuales sean estas condiciones iniciales, el sistema siempre tendrá la misma o mismas frecuencias. (RAO, 2011)

Resonancia

Si el mundo se encuentra sometido continuamente a fuerzas oscilantes, y, además, está rodeado de estructuras elásticas como ventanas, puentes, edificios, etc., es factible que en muchos casos la frecuencia de las fuerzas oscilantes coincida con alguna de las frecuencias naturales de las estructuras elásticas provocando entonces fenómenos de resonancia, el cual conduce a deflexiones y fallas excesivas, por lo que se puede decir que las fallas de estructuras como edificios, puentes, turbinas y alas de avión se asocian a la ocurrencia del fenómeno. (Blanco, 2018)

Un ejemplo concluyente de los efectos que pueden producirse en caso de resonancia se presenta cuando una ciudad es afectada por un sismo; la ciudad está llena de estructuras elásticas de gran escala, tales como edificios y puentes; la frecuencia de los sismos, es decir, la frecuencia con que se mueve el suelo, está ante todo en el rango de los 0.5 -2 Hz, siendo relativamente bajas, pero las grandes masas de los edificios de más de 5 pisos de altura por su propia inercia tienden a tener frecuencias bajas y propician por tanto la ocurrencia del fenómeno de resonancia. En este caso la amplitud de las oscilaciones

mecánicas de los edificios tiende a crecer tanto en cada ciclo que pueden llegar al punto de ruptura. (Peralta et al., 2009; Dukkupati, 2007).

Se dice que un sistema está en condición de resonancia o que tiene lugar un fenómeno de resonancia, cuando la frecuencia de la excitación que actúa sobre el mismo coincide con alguna de sus frecuencias naturales. Es decir, en el caso de sistemas con un grado de libertad, en la resonancia $\beta=1$. Para frecuencias de excitación próximas a alguna frecuencia natural, la amplitud del desplazamiento resultante puede ser varias veces el desplazamiento estático que se obtendría aplicando estáticamente una fuerza de la misma amplitud. Así mismo, en la resonancia, el desfase de la respuesta del sistema respecto a la excitación es siempre de 90° (independientemente del valor del amortiguamiento relativo). (Krysinski & Malburet, 2007)

Estabilidad del sistema.

La estabilidad es una de las características más importantes de cualquier sistema vibratorio. Aun cuando el término estabilidad se puede definir de muchas maneras según la clase de sistema o el punto de vista, considérese la definición de sistemas lineales e invariables con el tiempo. Un sistema se define como asintóticamente estable si su respuesta de vibración libre tiende a cero a medida que el tiempo tiende a infinito. Un sistema se considera inestable si su respuesta de vibración libre crece ilimitadamente (tiende a infinito) a medida que el tiempo tiende a infinito. Por último, se dice que un sistema es estable si su respuesta de vibración libre ni decae ni crece, sino que permanece constante u oscila a medida que el tiempo tiende a infinito. Es evidente que un sistema inestable cuya respuesta de vibración libre crece sin límites puede dañar el sistema, las propiedades adyacentes y la vida humana. Usualmente, los sistemas dinámicos se diseñan con límites para impedir que las respuestas crezcan sin límite. (Rao, 2011)

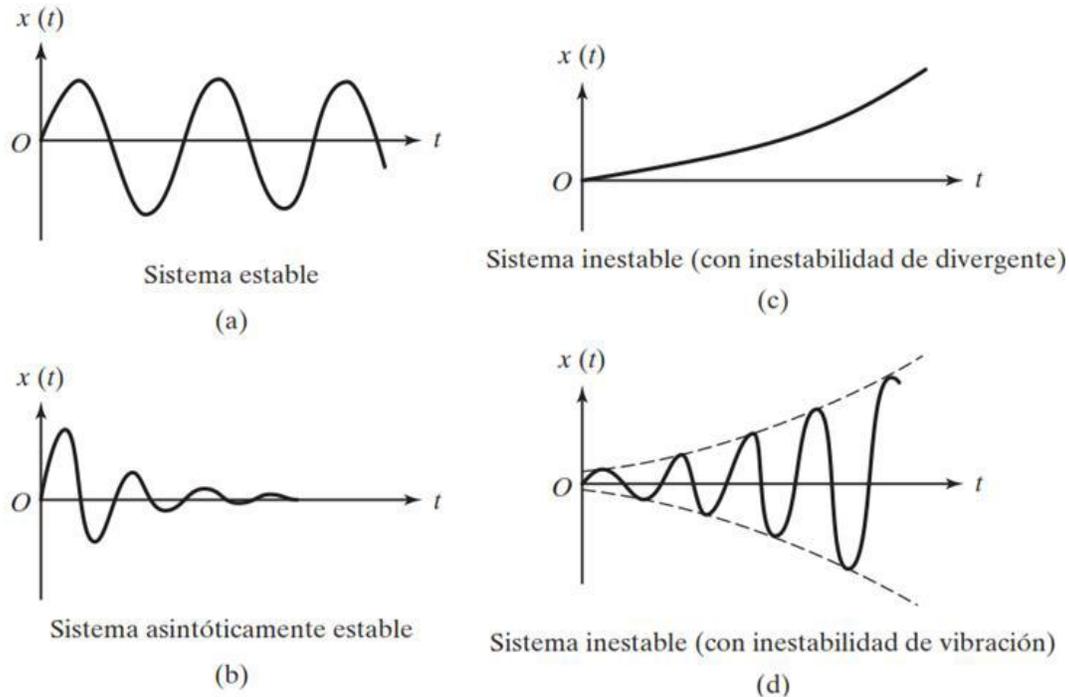


Fig.1.4 Tipos de estabilidad. (Rao, 2011)

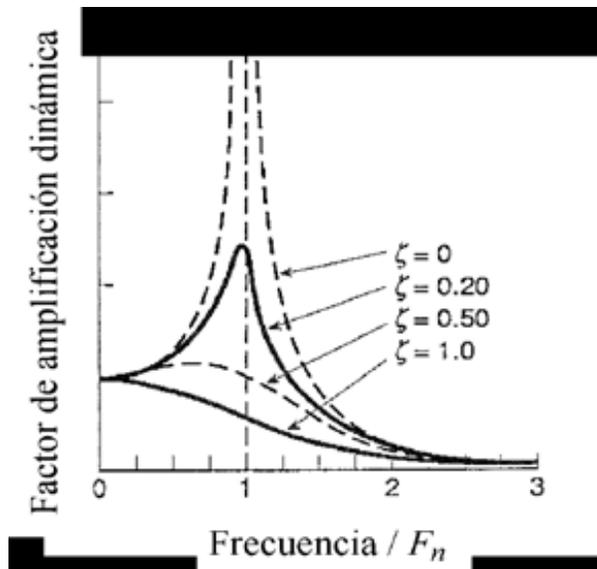
Importancia del estudio de las vibraciones en las construcciones

En muchos sistemas de ingeniería, el ser humano actúa como una parte integral del sistema. La transmisión de vibraciones a los seres humanos provoca molestias y pérdida de eficiencia. La vibración y el ruido generados por motores molestan a las personas, y en ocasiones producen daños a las propiedades. Por estas razones es que el ingeniero mecánico diseña el motor o máquina de forma tal que se reduzca al máximo el desequilibrio y el ingeniero civil trata de diseñar la estructura de modo que el efecto del desequilibrio sea lo menos dañino posible. (Rao, 2011)

Vibraciones en las estructuras.

Las características dinámicas, modos y frecuencias de vibración, son indicadores del comportamiento estructural dinámico, incluyendo la posible afectación de la capacidad portante. (Lujan, 2016) Los parámetros involucrados en las estructuras son su masa m , su rigidez k y su amortiguamiento c según la siguiente ecuación:

$$ma + cv + kx = F(t)$$



*Fig. 1.5 Factor de amplificación dinámica en función de la frecuencia fundamental.
(Lujan, 2016)*

En la figura 1.5 puede apreciarse el importante rol del amortiguamiento y de la relación frecuencia de la excitación y frecuencia fundamental en la respuesta a través de la variación del Factor de Amplificación Dinámica.

El comportamiento estructural se evalúa mediante la respuesta estructural dinámica, obtenida mediante técnicas experimentales y/o numéricas, y dada en términos de aceleraciones y velocidades vibratorias. La evaluación se realiza comparando los resultados obtenidos de las mediciones “in situ” con los límites indicados por normativas y criterios internacionales. (de la Paz, 2018)

La medición y el análisis de vibraciones, como técnica dinámica no destructiva, utilizada en conjunto con otras técnicas, constituyen una herramienta de interés para evaluar daño estructural y/o afectación de la capacidad portante de las estructuras durante su vida en servicio. Estas técnicas son muy prácticas en su aplicación, fundamentalmente antes y después de una intervención. (Ríos-Gutiérrez & Silva-Navarro, 2013)

En la actualidad, son muchos los países que han desarrollado normativas y guías técnicas para la evaluación de la respuesta a la vibración, usando estándares nacionales e internacionales. Cada uno de esos estándares de vibración mide su nivel, dirección de la vibración, frecuencia de la vibración y tiempo de exposición, así como también consideran las características de la construcción y el piso.

Ya que el edificio puede ser usado para distintas actividades, las vibraciones verticales del edificio pueden ingresar al cuerpo por los distintos ejes (x, y, z), o una combinación de los tres. La medición de la vibración se debe hacer en el eje apropiado o considerar la curva combinada (Obando, 2002).

Las formas de intervención para mitigar problemas de vibraciones dependen de las condiciones de operación y limitaciones constructivas. Las opciones, según Van (2012), son las siguientes:

- Intervención puramente mecánica, sobre la fuente que produce las vibraciones (máquina o mecanismo) minimizando la generación de fuerzas vibratorias, por ejemplo, a través del control del balanceo del rotor.
- Intervención puramente estructural, sobre la estructura afectada por vibraciones. Las opciones posibles con el objetivo de desintonizarla son: modificación de su masa o rigidez para cambiar sus frecuencias naturales, y/o incremento del amortiguamiento para minimizar la amplitud de las oscilaciones.
- Intervención estructural-mecánica, sobre el vínculo entre máquina y fundación, con aislamiento de vibraciones y modificación de transmisibilidad.

En muchos casos la carga predominante de diseño de estructuras esbeltas son las cargas de viento. En estructuras muy altas (más de 70 m), las vibraciones causadas por el viento provocan problemas en la estructura principal, los revestimientos, equipamiento y ocupantes. Las aceleraciones, causadas por las vibraciones, que se producen en los pisos superiores son perceptibles por las personas provocando incomodidad y algunas veces conduciendo al abandono del lugar de trabajo por algunas horas. La percepción de las vibraciones también se presenta en las torres de observación de los aeropuertos, que se construyen a una gran altura, donde trabajan los controladores del tráfico aéreo en el piso superior. La percepción humana del movimiento de una estructura se debe casi enteramente a la componente fluctuante del movimiento. La percepción está ligada a la vibración de la estructura, ya sea por flexión o por torsión, y no a la deflexión. El tratamiento cuantitativo de este problema es complejo porque la sensibilidad humana a las vibraciones depende de la posición de las personas (parada, caminando, sentada o acostada), la atención que dedica a su actividad, ruidos del viento o de la estructura misma, y visualización de movimientos. Los efectos torsionales inducidos por el viento provocan una distribución de presión no equilibrada sobre la superficie del edificio. Los efectos de la carga de viento son amplificados si el edificio es de forma asimétrica porque son más sensibles dinámicamente.

Por lo tanto, no sólo es necesario realizar un diseño basado la seguridad estructural sino también incluir el punto de vista del confort de los ocupantes. (Blessman, 1998)

El control de vibraciones en zonas sísmicas no sólo se limita a edificios de altura, sino a todas las estructuras (principalmente hospitales) que necesariamente deben seguir funcionando después de un sismo severo. La alternativa para lograr un aumento de la seguridad estructural, son los disipadores pasivos de energía, que constituyen una forma económicamente viable de encarar estos problemas. (Inés, 2001)

Los sistemas de reducción de vibraciones se pueden dividir en dos grandes grupos:

1-Sistemas de aislación

2-Sistemas de control de vibraciones

El campo de aplicación de los sistemas de aislación se restringe a la aislación sísmica y los sistemas de control de vibraciones se aplican principalmente para controlar las oscilaciones producidas por el viento, la disipación de energía en este caso se produce bajo deformación cíclica y su efecto de reducción de respuesta es significativo en casos donde existe una acumulación energética durante varios ciclos de vibración. En forma adicional, su efecto es despreciable en el caso de una sollicitación impulsiva de duración mucho menor que el período de vibración de la estructura. (Inés, 2001)

Conclusiones

Las vibraciones se dividen para su estudio en varias clasificaciones partiendo del movimiento que generen estas. Según la causa del movimiento existen las vibraciones libres y forzadas, de acuerdo a como se determine esta causa están las deterministas (no armónicas) y las no deterministas (estocástica o aleatoria). También se clasifican de acuerdo a la pérdida de energía y por las características de los elementos, donde la primera se divide en vibraciones amortiguadas y vibraciones no amortiguadas y la segunda corresponde a las lineales y no lineales.

El fenómeno de la resonancia surge cuando la frecuencia de las fuerzas oscilantes coincide con alguna de las frecuencias naturales de las estructuras, trayendo como consecuencia la amplificación de las oscilaciones que conducen a sobretensiones, desplazamiento excesivos y en ocasiones fallas o colapsos.

El estudio de las vibraciones es de vital importancia ya que estas pueden llegar a provocar daños tanto en las edificaciones como en los humanos, generando ruidos y molestias, por lo

que el ingeniero civil debe diseñar las estructuras de modo tal que el desequilibrio que se genere sea lo menos dañino posible, involucrando la masa, rigidez y amortiguamiento de estas, evaluando su comportamiento mediante la respuesta dinámica.

Existen varias formas para mitigar los efectos de las vibraciones en las estructuras teniendo en cuenta las limitaciones constructivas y las condiciones de operación, surgiendo tres opciones: intervención puramente mecánica, intervención puramente estructural e intervención mecánica-estructural. Por tanto, los sistemas de reducción se dividen en sistemas de aislamiento (sismo) y en sistemas de control (viento).

Bibliografía

BLANCO BARREDA, D. Comparación entre el análisis estático equivalente y análisis dinámico en estructuras regulares apoyados en la NC 46:2017 “construcciones sismorresistentes-requisitos básicos para el diseño y construcción”. Trabajo de diploma de Ingeniería Civil. Universidad de Matanzas. 2018.

BLESSMAN. Introducao ao estudo das acoes dinamicas do Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande du Sul, Brasil. 1998.

CASSANO, A. M. Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas. Universidad Tecnológica Nacional. 2009.

DE LA PAZ, M. V. Vibraciones en edificios. Estándares de medición y efectos en la legislación extranjera. Biblioteca del congreso nacional de Chile. Asesoría técnica parlamentaria. 2018.

DUKKIPATI, R. V. Solving Vibration Analysis Problem Using MATLAB. Ansari Road, Daryaganj, New Delhi, India: New Age International. 2007

INES, M. Vibration control system in very high structures. Facultad de Ingeniería, Universidad Nac. del Centro de la Pcia. de Buenos Aires. 2001

KELLY, S. G. Fundamentals of Mechanical Vibrations. In: COMPANIES, T. M.-H. (ed.) Second ed. McGraw-Hill, Boston, MA (USA). 2000

KRYSINSKI, T. & MALBURET, F. Mechanical Vibrations. In: LTD, I. (ed.) Active and Passive Control. Great Britain. 2007.

LUJAN, E. N. Evaluación de estructuras sometidas a vibraciones de máquinas. Revista argentina de ingeniería - año 4 - volumen 8. 2016

PATIL, P. S. & KADAM, S. R. Investigation of Dynamic Behavior of Framed Structure Under Impact Load. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology, Vol 2, 79-86. 2014.

OBANDO, M.A. Comprobación de curvas de aceptabilidad por vibraciones según norma ISO 2631:2-1989 en oficinas adyacentes a salas de máquinas de edificio Millenium y edificio Bosque Norte. Tesis de Grado Presentada como parte de los requisitos para optar al grado de licenciado en Acústica. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería Acústica. 2002.

PERALTA, J. A., REYES, P. & MUÑOZ, A. G. El fenómeno de la resonancia. Latin-American Journal of Physics Education, Vol 3,612-618. 2009.

RAO, S. S. & YAP, F. F. Mechanical vibrations, Prentice hall Upper Saddle River. 2011.

REYES, I. M. Identificación de las causas de vibraciones excesivas presentes en una estructura portante y propuesta para la solución del problema. Master, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría. 2009.

VAN, H. Vibrations of machine foundations and surrounding soil, Heron Journal, 57:1:1-26. 2012

RÌOS-GUTIERREZ, M. & SILVA-NAVARRO, G. Active vibration control in bulding like structures using piezoelectric actuators and positive acceleration feedback. Dyna. Edición 179, pp. 116-125, Medellín. ISSN 0012-7353