



Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Construcciones

MODELACIÓN NUMÉRICA DE BASE PARA MAQUINARIA TIPO CUCHILLA DEL CENTRAL MARIO MUÑOZ

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Carlos Yaniel Vázquez Castañeda

Tutor(es): Ing. Juan Carlos Verdecia Somoano

Ing. Javier Alejandro García Miranda

Matanzas, 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Margarita y Carlos Manuel, y a mi familia por haberme apoyado en todo momento

A mis tutores y amigos Ing. Javier Alejandro García Miranda e Ing. Juan Carlos Verdecia Somoano los cuales me han ayudado en el angosto pero bello camino de la ciencia, sin ellos, la Ing. Camila y el Ing. Alejandro a mi lado esta investigación no pudiera haberse realizado

A todos mis compañeros de aula en especial a mis compañeros y compañeras de la beca, y a Alfredo Rodríguez Bello

A mis compañeros de carrera que de una forma u otra brindaron su apoyo: Yasmany, Lázaro, Michel y demás compañeritos y compañeritas

A los trabajadores del central Mario Muñoz por su colaboración para la recopilación de datos.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que yo Carlos Yaniel Vázquez Castañeda soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

El central Mario Muñoz Monroy ubicado en el municipio de los Arabos es uno de los principales productores de azúcar y miel final de la provincia de Matanzas además de contribuir en la generación de energía eléctrica para apoyar dicho municipio. Como parte de un proceso de mejoramiento técnico se sustituirán algunos equipos como el motor que mueve la cuchilla No 1 la cual se encuentra apoyada sobre un bloque de hormigón por lo que se hace necesario el estudio de este elemento para determinar si puede continuar cumpliendo su función. Para este estudio se realiza la modelación numérica en el software SAP2000 teniendo en cuenta las tensiones generadas por las vibraciones producidas por el movimiento oscilatorio de la cuchilla y las cargas estáticas producto del peso propio de dicho equipo cuyo resultado demuestra que las cargas dinámicas generan condiciones más críticas sobre la base al punto de impedir el funcionamiento del equipo y por tanto un paro en la producción de la industria.

Palabras claves: Vibración; bloque; tensiones; dinámica; estática.

ABSTRACT

The central Mario Muñoz Monroy located in the municipality of Los Arabos is one of the main producers of sugar and final honey from the province of Matanzas as well as contributing to the generation of electric power to support the municipality. As part of a process of technical improvement, some equipment will be replaced, such as the motor that moves the blade No. 1, which is supported on a concrete block, so it is necessary to study this element to determine if it can continue to fulfill its function . For this study, numerical modeling was carried out in the SAP2000 software taking into account the stresses generated by the vibrations produced by the oscillating movement of the blade and the static loads product of the own weight of said equipment, the result of which shows that the dynamic loads generate more criticism based on the point of preventing the operation of the equipment and therefore a stoppage in the production of the industry.

Keywords: Vibration; block; tensions; dynamic; static.

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1 Revisión Bibliográfica	5
1.1. Breve historia del origen del estudio de las vibraciones.	5
1.1.1. Orígenes del estudio de las vibraciones.	5
1.2. Conceptos básicos	6
1.3. Tipos de vibraciones.....	7
1.4. Elementos de amortiguamiento.....	9
1.5. Importancia del estudio de las vibraciones en las construcciones	11
1.6. Grados de Libertad	12
1.6.1. Sistemas de un grado de libertad	12
1.6.2. Vibración armónicamente excitada.....	14
1.7. Estabilidad del sistema.	15
1.8. Análisis <i>steady state</i> o estado estable.....	16
1.9. Análisis modal.....	16
1.10. Tipos de cimentaciones para maquinarias.	17
1.10.1. Clasificación de las máquinas según su frecuencia de operación	21
1.11. Concepción general de la modelación.	22
1.12. Programas para modelar.	23
1.13. Método de elementos finitos.....	27
Capítulo 2 Definición de parámetros para la modelación.....	28
2.1. Planteamiento del problema.	28
2.2. Características de la maquinaria.....	28
2.3. Parámetros para modelar.....	29
2.3.1. Modelo geométrico.	29
2.3.2. Modelo de material.	29
2.3.3. Modelo del hormigón.....	30
2.3.4. Modelo del suelo.....	31
2.3.5. Cargas.	32
2.4. Mallado.....	33
2.4.1. Tipo de elemento.....	33
2.4.2. Densidad de mallado.....	34
2.5. Calibración.	39
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	43
3.1. Análisis estático de tensiones.....	43
3.2. Análisis dinámico de tensiones.	45
3.3. Análisis de frecuencias.....	52
Conclusiones	55
Recomendaciones	56
Referencias Bibliográficas	57
Anexos	59

INTRODUCCIÓN

La vibración es un fenómeno que está presente en la mayoría de las actividades diarias del hombre, escuchar es posible porque los tímpanos vibran y ver es posible porque las ondas luminosas vibran. También se puede decir que las vibraciones están presentes en todo tipo de estructuras por ejemplo, un puente o un edificio están sometidos a la acción constante del viento el cual genera oscilaciones y por tanto vibraciones, que en muchos casos son imperceptibles por el hombre pero no se pueden despreciar y es importante tenerlas en cuenta a la hora del diseño de cada elemento.

El interés en la vibración surge cuando se crean los primeros instrumentos musicales, probablemente silbatos o tambores. Desde entonces, tanto músicos como filósofos han buscado las reglas y las leyes de la producción del sonido, las han utilizado para mejorar los instrumentos musicales, y las han pasado de generación en generación. Ya en el año 4000 a.C. la música había alcanzado un alto nivel de desarrollo y era muy apreciada por chinos, hindúes, japoneses y, quizá, los egipcios. Estos pueblos antiguos observaron ciertas reglas definidas que de alguna manera estaban relacionadas con el arte de la música, aunque su conocimiento no llegó a nivel de ciencia.(Rao, 2012)

Los eruditos antiguos en el campo de la vibración concentraron sus esfuerzos en la comprensión de los fenómenos naturales y el desarrollo de las teorías matemáticas para describir la vibración de sistemas físicos. En años recientes, muchas aplicaciones de la vibración en el campo de la ingeniería han motivado a los investigadores, entre ellas el diseño de máquinas, cimientos, estructuras, motores, turbinas y sistemas de control.

El diseño de cimentaciones de maquinaria pesada de cualquier tipo es un problema sumamente complejo. Aún en los países más industrializados se acostumbra diseñar estas cimentaciones por medio de métodos más o menos empíricos desarrollados localmente y, por tanto, aplicables solamente a las características de la maquinaria y del suelo para las que fueron deducidas.(Zetina, 2011)

Está por demás decir que estos métodos (del tipo: tantos metros cúbicos de concreto para cada kilo watt de potencia de la máquina) además de antieconómicos pueden llevar a fracasos lamentables. Por otra parte, es indudable la importancia de un diseño correcto de este tipo de cimentaciones ya que debe garantizarse el funcionamiento óptimo de los

equipos para evitar roturas o interrupciones de la producción como en el caso de la Empresa Azucarera “Mario Muñoz Monroy” que fundada en 1988 es un punto fundamental en el desarrollo económico del municipio Los Arabos y es un importante productor de azúcar crudo así como sus derivados, tales como: miel final, bagazo y la generación y cogeneración de energía eléctrica.

Por lo antes mencionado es evidente que las cimentaciones de maquinaria requieren una atención especial del ingeniero diseñador ya que la operación del equipo genera fuerzas y momentos dinámicos que con el paso del tiempo la máquina experimenta desbalances. La cimentación de máquina transmite las cargas dinámicas al suelo de desplante y estas se adicionan a las cargas estáticas debidas a la combinación del peso de la maquinaria y del bloque de soporte. Son varios los parámetros que deben ser determinados en el diseño de una cimentación, teniendo en cuenta su estado tanto estático como dinámico, entre los cuales están la frecuencia natural del sistema y la amplitud de vibración en condiciones normales de operación, pero además de esto se deben determinar los esfuerzos internos y las deformaciones que experimente la estructura, para conocer si estos se encuentran en los rangos permisibles para proceder a su correcto diseño.

De lo anterior se plantea como situación problemática que debido al proceso de modernización de los motores de los ejes de cuchillas No 1 en el central “Mario Muñoz Monroy” es necesario conocer si la base existente es apta para resistir las solicitaciones producto de las nuevas maquinarias.

Como problema científico se tiene la modernización de los motores de los ejes de cuchillas No 1 del central Mario Muñoz.

En esta investigación se define como objeto de estudio: Modelación numérica de la base para el eje de cuchilla No.1 en el central Mario Muñoz Monroy.

Siendo el objetivo general: Modelar numéricamente la base del eje de la cuchilla No. 1 del central Mario Muñoz Monroy.

El campo de acción de esta investigación se enfoca en la modelación de bases para maquinarias.

En correspondencia con el problema científico se define la siguiente hipótesis: Si se realizara el modelo numérico de la base del eje de cuchilla No.1 del central Mario

Muñoz Monroy analizando el efecto de las vibraciones, permitirá estudiar su comportamiento estructural y determinar si puede continuar en servicio una vez que se modernicen los equipos.

De la hipótesis quedan definidas las variables de la investigación:

Variable independiente: Modelo matemático de las bases.

Variable dependiente: Comportamiento estructural de las bases.

Objetivos específicos:

- Analizar el estado del arte del diseño de bases de hormigón para maquinarias
- Definir parámetros y procedimientos para modelar numéricamente la base del eje de cuchilla No.1 en el central Mario Muñoz Monroy
- Modelar numéricamente la base para el eje de cuchilla No.1 del central Mario Muñoz Monroy.

Tareas de la investigación

- Análisis del estado del arte del diseño de bases de hormigón para maquinarias
- Obtención de datos de la maquinaria
- Obtención de los datos de la base
- Modelación numérica de las bases para maquinaria del central Mario Muñoz Monroy
- Análisis de las tensiones en la base.

Se emplearán como métodos de investigación, los métodos empíricos, a través del análisis documental de información recopilada, y empírico experimental como la observación de los fenómenos del objeto estudiado; se tendrán en cuenta además los métodos teóricos como análisis-síntesis, donde se relacionan las partes analizadas, producto de los resultados obtenidos en la búsqueda documental; el método inducción-deducción, la cual posibilita la conformación empírica de la hipótesis; y el método

histórico-lógico, donde de forma ilustrativa se realizará modelaciones del estudio en cuestión.

Aportes esperados

Un modelo numérico que permita estudiar el comportamiento estructural de la base del eje de cuchilla No 1 ante los esfuerzos generados por las vibraciones.

Estructura de la tesis:

Capítulo 1: Fundamentación teórica. Este capítulo posibilita justificar el desarrollo de la investigación. Se expone los antecedentes y el estado actual del tema de la modelación y diseño de bases de maquinarias y se establecen conceptos básicos según los materiales recopilados.

Capítulo 2: Definición de parámetros para la modelación. Se puntualizan los parámetros determinantes en el comportamiento estructural de las bases de maquinarias, tales como la geometría del modelo, las características de los materiales a utilizar, la modelación de los mismos y la modelación de las cargas y el suelo.

Capítulo 3: Análisis de los resultados alcanzados, comprobando la hipótesis general de investigación y definición de los valores de mallas a utilizar y criterios a seguir para la modelación de los modelos.

Conclusiones.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El estudio de las vibraciones tiene gran importancia para las edificaciones y las estructuras en general, pero principalmente para las que han sido diseñadas para soportar máquinas centrífugas pesadas como motores y turbinas, o máquinas reciprocantes como motores de vapor y de gasolina. Entre los factores más importantes a tener en cuenta se encuentran la frecuencia, la amplitud, frecuencia de excitación y resonancia. Todas estas invariantes son de especial importancia a la hora del diseño y construcción de este tipo de estructuras. Este capítulo tiene como objetivo principal brindarle al lector como se encuentra el estado del conocimiento referente a la temática de la presente investigación, resaltando las principales tendencias en el campo de la modelación y diseño de bases de maquinarias.

1.1. Breve historia del origen del estudio de las vibraciones.

1.1.1. Orígenes del estudio de las vibraciones.

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)

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, 2012)

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, 2012)

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 hicieron 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, 2012)

1.2. Conceptos básicos

La vibración es un fenómeno que por su importancia, hoy en día continua siendo objeto de estudio de muchos investigadores e ingenieros, nombres como: (Zetina, 2011, Rao, 2012, Ferrández, 2016), que al igual que el autor coinciden en que cualquier movimiento que se repite con respecto a una posición de equilibrio después de un intervalo de tiempo se llama vibración u oscilación por ejemplo el vaivén de un péndulo y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos muy comunes de vibración. La teoría de la vibración tiene que ver con el estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas con ellos.

1.3. Tipos de vibraciones

Vibración libre o forzada

La vibración se puede clasificar de varias maneras. Algunas de las clasificaciones importantes son las siguientes.

Vibración libre: Si se deja que un sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial, la vibración resultante se conoce como vibración libre. Ninguna fuerza externa actúa en el sistema. La oscilación de un péndulo simple es un ejemplo de vibración libre.

Vibración forzada: Si un sistema se somete a una fuerza externa (a menudo, una fuerza repetitiva), la vibración resultante se conoce como vibración forzada. La oscilación que aparece en máquinas como motores diesel es un ejemplo de vibración forzada. (Rao, 2012)

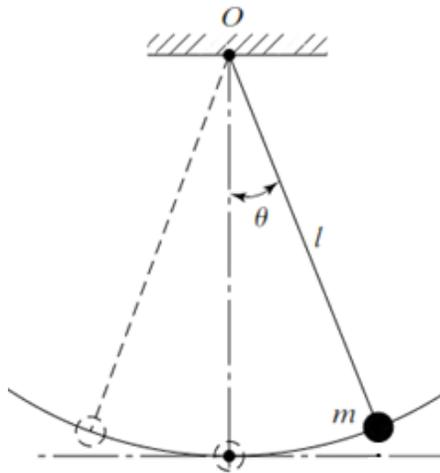


Fig.1.1 Péndulo simple.

Vibración determinística y vibración no determinística

Si el valor o magnitud de la excitación (fuerza o movimiento) que actúa en un sistema vibratorio se conoce en cualquier tiempo dado, la excitación se llama determinística. La vibración resultante se conoce como vibración determinística.

En algunos casos la excitación es no determinística o aleatoria; el valor de la excitación en un momento dado no se puede pronosticar. En estos casos, una recopilación de registros de la excitación puede presentar cierta regularidad estadística.

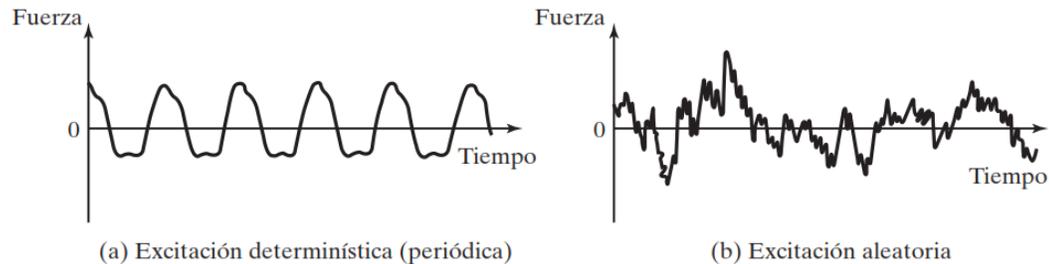


Fig. 1.2 Excitación determinística y aleatoria(Rao, 2012)

Es posible estimar promedios como los valores medios o medios al cuadrado de la excitación. Ejemplos de excitaciones aleatorias son la velocidad del viento, la aspereza del camino y el movimiento de tierra durante sismos. Si la excitación es aleatoria, la vibración resultante se llama vibración aleatoria. En este caso la respuesta vibratoria del sistema también es aleatoria; se puede describir sólo en función de cantidades estadísticas. La figura 1.2 muestra ejemplos de excitaciones determinísticas y aleatorias.(Rao, 2012)

Vibración lineal y no lineal

Si todos los componentes básicos de un sistema vibratorio, el resorte, la masa y el amortiguador, se comportan linealmente, la vibración resultante se conoce como vibración lineal. Pero si cualquiera de los componentes básicos se comporta de manera no lineal, la vibración se conoce como vibración no lineal.(Rao, 2012)

Vibración no amortiguada y amortiguada

Si no se pierde o disipa energía por fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración no amortiguada. Sin embargo, si se pierde energía se llama vibración amortiguada. En muchos sistemas físicos, la cantidad de amortiguamiento es tan pequeña que puede ser ignorada en la mayoría de las aplicaciones

de ingeniería. Sin embargo, la consideración del amortiguamiento se vuelve extremadamente importante al analizar sistemas vibratorios próximos a la resonancia.(Rao, 2012)

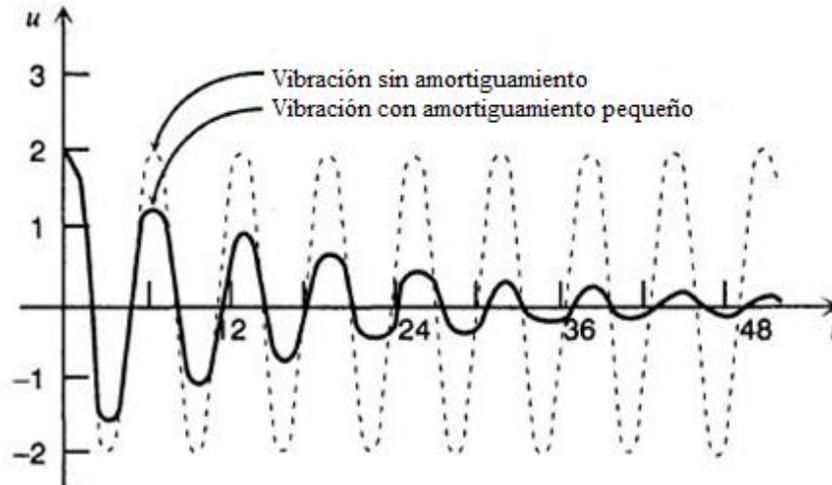


Fig.1.3 Amortiguamiento.

1.4. Elementos de amortiguamiento

En muchos sistemas prácticos, la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido. Debido a la reducción de energía, la respuesta, como el desplazamiento del sistema, se reduce gradualmente. El mecanismo mediante el cual la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido se conoce como amortiguamiento. Aun cuando la cantidad de energía convertida en calor o en sonido es relativamente pequeña, la consideración del amortiguamiento llega a ser importante para predecir con exactitud la respuesta a la vibración de un sistema. Se supone que un amortiguador no tiene masa ni elasticidad, y que la fuerza de amortiguamiento existe sólo si hay una velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador. Es difícil determinar las causas del amortiguamiento en sistemas prácticos. Por consiguiente, el amortiguamiento se modela como uno más de los siguientes tipos.(Rao, 2012)

Amortiguamiento viscoso: El amortiguamiento viscoso es el mecanismo de amortiguamiento de mayor uso en el análisis de vibración. Cuando un sistema mecánico vibra en un medio fluido como aire, gas, agua o aceite, la resistencia ofrecida por el

fluido en el cuerpo en movimiento hace que se disipe la energía. En este caso, la cantidad de energía disipada depende de muchos factores, como el tamaño y forma del cuerpo vibratorio, la viscosidad del fluido, la frecuencia de vibración e incluso la velocidad del cuerpo vibratorio. En el amortiguamiento viscoso, la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad del cuerpo vibratorio. Entre los ejemplos típicos de amortiguamiento viscoso están: (1) la película de fluido entre superficies deslizantes; (2) el flujo de fluido alrededor de un pistón en un cilindro; (3) el flujo de fluido a través de un orificio, y (4) la película de fluido alrededor de un muñón en una chumacera.(Rao, 2012)

Amortiguamiento de Coulomb o de fricción en seco: Aquí la fuerza de amortiguamiento es de magnitud constante pero de dirección opuesta a la del movimiento del cuerpo vibratorio. Es resultado de la fricción entre superficies que al frotarse están secas o no tienen una lubricación suficiente.

La ley de Coulomb de fricción seca establece que, cuando dos cuerpos están en contacto, la fuerza requerida para producir deslizamiento es proporcional a la fuerza normal que actúa en el plano de contacto. Por lo tanto, la fuerza de fricción F se expresa como $F = \mu N = \mu W = \mu mg$ donde N es la fuerza normal, igual al peso de la masa ($W = mg$) y μ es el coeficiente de deslizamiento o fricción cinética. El valor del coeficiente de fricción (μ) depende de los materiales en contacto y de la condición de las superficies en contacto. Por ejemplo, $\mu \approx 0.1$ para metal sobre metal (lubricado), 0.3 para metal sobre metal (no lubricado), casi 1.0 para caucho sobre metal. La fuerza de fricción actúa en una dirección opuesta a la dirección de la velocidad. En ocasiones al amortiguamiento de Coulomb se le conoce como amortiguamiento constante, puesto que la fuerza de amortiguamiento es independiente del desplazamiento y la velocidad; depende sólo de la fuerza normal N entre las superficies deslizantes.(Rao, 2012)

Amortiguamiento debido a un material o sólido o histerético: Cuando un material se deforma, absorbe o disipa energía. El efecto se debe a la fricción entre los planos internos, los cuales se resbalan o deslizan a medida que ocurren las deformaciones. Cuando un cuerpo que experimenta amortiguamiento producido por el material se somete

a vibración, el diagrama de esfuerzo-deformación muestra un bucle de histéresis como se muestra en la figura 1.4. El área de este bucle indica la pérdida de energía por unidad de volumen del cuerpo por ciclo debido al amortiguamiento.(Rao, 2012)

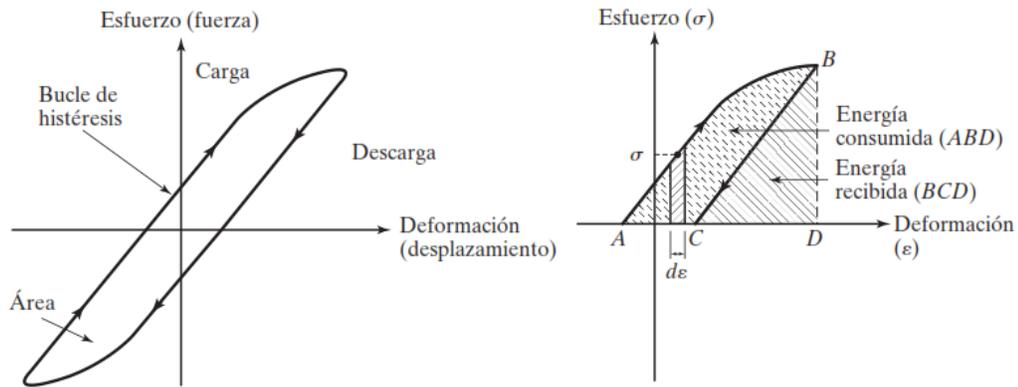


Fig. 1.4. Bucle de histéresis.(Rao, 2012)

1.5. Importancia del estudio de las vibraciones en las construcciones

Es necesario el estudio de las vibraciones ya que en todas las estructuras diseñadas para soportar máquinas centrífugas pesadas como motores y turbinas, o máquinas reciprocantes como motores de vapor y de gasolina, se ven sometidas a vibración. En todas estas situaciones, el componente de la estructura o máquina sometido a vibración puede fallar debido a fatiga del material producida por la variación cíclica del esfuerzo inducido.

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, 2012)

1.6. Grados de Libertad

Se entiende por grados de libertad dinámicos, al número de parámetros desconocidos, que determinan la ubicación de las masas del sistema ante todas las probables deformaciones elásticas de sus elementos. Este número puede ser determinado por la mínima cantidad de conexiones adicionales, que son necesarias ingresarlos al sistema para fijar todas las masas. (Lázaro, 2015)

1.6.1. Sistemas de un grado de libertad

Se dice que un sistema experimenta vibración libre cuando oscila sólo debido a una perturbación inicial sin que más adelante actúen fuerzas externas. Algunos ejemplos son las oscilaciones del péndulo de un reloj, el movimiento oscilatorio vertical percibido por un ciclista después de pasar por un tope y el movimiento de un niño en un columpio después de un empujón inicial.

En la figura 1.5 se muestra un sistema de resorte y masa que representa el sistema vibratorio más simple posible. Se llama sistema de un solo grado de libertad, ya que una coordenada (x) es suficiente para especificar la posición de la masa en cualquier momento. No existe ninguna fuerza externa aplicada a la masa, de ahí que el movimiento resultante de una perturbación inicial será una vibración libre.

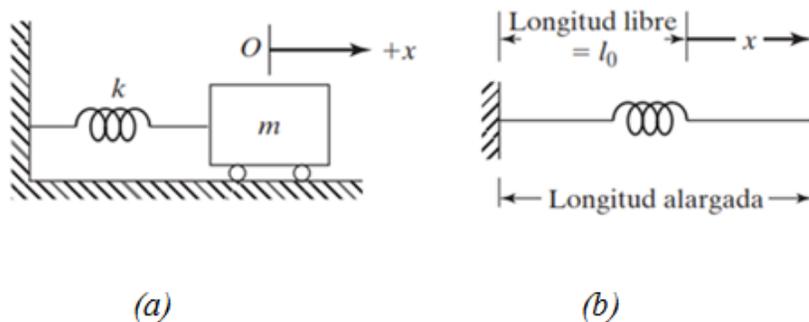


Fig. 1.5 Sistema de resorte y masa en posición horizontal (Rao, 2012)

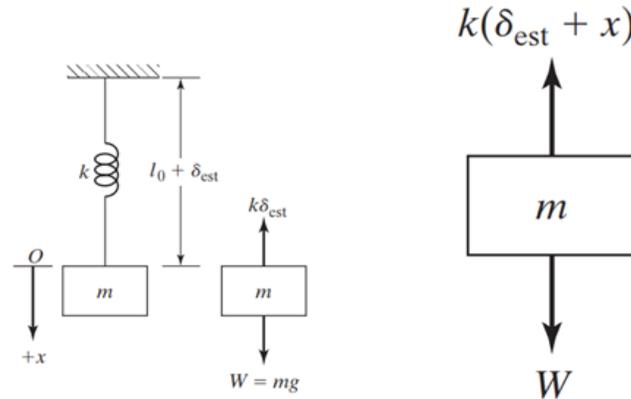


Fig. 1.6 Sistema de resorte y masa en posición vertical(Rao, 2012)

Considérese la configuración del sistema de resorte-masa que se muestra en la figura 1.6. La masa cuelga en el extremo inferior del resorte, el cual a su vez está fijo por su extremo superior a un soporte rígido. En reposo, la masa colgará en una posición llamada posición de equilibrio estático, en la cual la fuerza del resorte dirigida hacia arriba balancea con exactitud la fuerza de gravedad dirigida hacia abajo que actúa en la masa. En esta posición la longitud del resorte es $l_0 + \delta_{est}$, donde δ_{est} es la deflexión estática, el alargamiento producido por el peso de la masa m . Para el equilibrio estático,

$$W = mg = k\delta_{est} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde g es la aceleración de la gravedad. Si la masa se deflexiona una distancia $+x$ con respecto a su posición de equilibrio estático, entonces la fuerza del resorte es $-k(x + \delta_{est})$.(Rao, 2012)

Varios sistemas mecánicos y estructurales se pueden idealizar como sistemas de un solo grado de libertad. En muchos sistemas prácticos, la masa está distribuida, pero para un análisis simple se puede considerar como una sola masa puntual. Asimismo, la elasticidad del sistema, la cual puede estar distribuida por todo el sistema, también se puede idealizar como un solo resorte.(Rao, 2012)

1.6.2. Vibración armónicamente excitada

Se considera la respuesta dinámica de un sistema de un solo grado de libertad sujeto a excitaciones armónicas de la forma $F_{(t)} = F_0 e^{i(\omega t + \varphi)}$ o $F_{(t)} = F_0 \cos(\omega t + \varphi)$ o $F_{(t)} = F_0 \sin(\omega t + \varphi)$, donde φ es el ángulo de fase de la excitación armónica, ω es la frecuencia y F_0 es la amplitud, estos últimos constituyen características principales de la vibración y han sido estudiados por muchos científicos e investigadores, como: (Ferrández, 2016, Rao, 2012, Zetina, 2011), que al igual que el autor coinciden en que la frecuencia es el número de ciclos u oscilaciones completas repetidos en unidades de tiempo, y se expresa en ciclos por minuto (c.p.m.) y la amplitud de vibración describe la máxima extensión del movimiento producido, es decir, el máximo desplazamiento de la posición de reposo. Este movimiento es a veces predominantemente vertical u horizontal, o puede ser descompuesto en estos vectores.

Cada cuerpo en función de su geometría y composición presentan características propias una de estas es la frecuencia, y sobre esta característica (Zetina, 2011, Reyes, 2009, Rao, 2012), plantean que la frecuencia con la cual un cuerpo vibra naturalmente cuando está sujeto a la aplicación de una fuerza externa se llama frecuencia natural y sólo dependerán de la rigidez e inercia del sistema y la frecuencia de forzamiento o frecuencia excitante es la frecuencia de la fuerza la cual causa la excitación del sistema. La relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural de la estructuras se conoce como razón de frecuencias. La resonancia ocurre cuando la relación de frecuencias es 1, es decir cuando un sistema es accionado por una fuerza externa cuya frecuencia coincide con la frecuencia natural (w_n) del sistema, entonces teóricamente la amplitud de vibración aumentaría y continuaría incrementándose hasta el infinito. (Ver fig. 1.7)

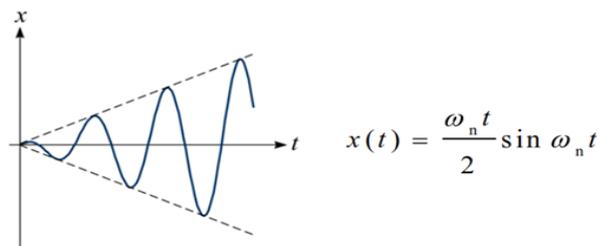


Fig. 1.7 Amplitud de vibración respecto al tiempo.

El valor de f depende del valor de $F(t)$ en $t = 0$ y suele considerársele cero. Bajo excitación armónica, la respuesta del sistema también será armónica. Si la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema, la respuesta será muy grande. Esta condición, se debe evitar para que no falle el sistema. La vibración producida por una máquina rotatoria desbalanceada, la oscilación de una alta chimenea producida por la formación de torbellino en un viento constante y el movimiento vertical de un automóvil sobre un carretera ondulada son ejemplos de vibración excitada.(Rao, 2012)

1.7. 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, 2012)

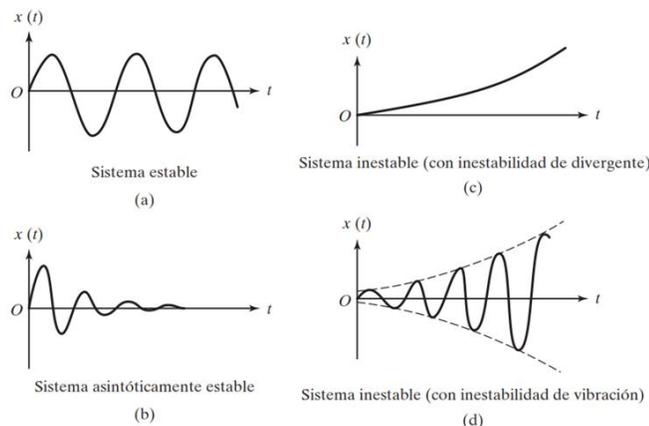


Fig.1.8 Tipos de estabilidad.(Rao, 2012)

La energía externa se puede suministrar ya sea mediante una fuerza aplicada o por una excitación de desplazamiento impuesta. La fuerza aplicada o la excitación de desplazamiento pueden ser armónica, no armónica pero periódica, no periódica, o aleatoria. La respuesta de un sistema a una excitación armónica se llama respuesta armónica.

La excitación no periódica puede ser de larga o de corta duración. La respuesta de un sistema dinámico a excitaciones no periódicas repentinamente aplicadas se llama respuesta transitoria.(Rao, 2012)

1.8. Análisis *steady state* o estado estable.

Este procedimiento también es un análisis de perturbación lineal, quiere decir que está dentro del rango elástico lineal, utilizado en este caso para una excitación armónica. El análisis *Steady State Dynamics Modal* obtiene las máximas amplitudes de la respuesta en el estado estacionario de la estructura para una carga dinámica aplicada y a diferentes frecuencias, es decir, realiza un barrido de frecuencias para una carga aplicada a diferentes frecuencias; para ello utiliza los valores de las frecuencias propias por ello se denomina Modal.(Lázaro, 2015)

1.9. Análisis modal

El Análisis Modal es el proceso de determinación de las características dinámicas inherentes a un sistema mecánico y es necesario para la posterior formulación de un modelo matemático del comportamiento dinámico de dicho sistema. Estos parámetros modales son propios del sistema y dependen de la distribución de sus características de masa, rigidez y amortiguamiento.(Reyes, 2009)

El Análisis Modal parte de la hipótesis lineal de considerar que la respuesta en vibración de un sistema puede ser expresada como una combinación de una serie de movimientos o modos naturales de vibración, intrínsecos al sistema y armónicos simples determinados por el valor y distribución de su masa, rigidez y amortiguamiento. Cada modo se define a partir de sus parámetros modales: frecuencia natural, amortiguamiento modal y forma característica de desplazamiento. El grado de participación de cada modo en el total de la

vibración viene determinado por las características de la excitación que actúa sobre el sistema y por las formas de los modos.(Reyes, 2009)

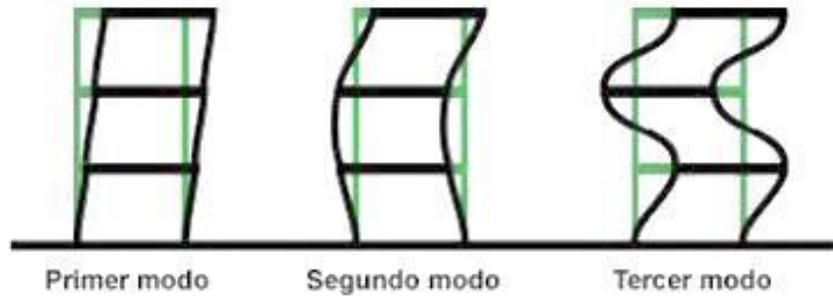


Fig.1.9. Modos de oscilación (Rodríguez, 1991)

El Análisis Modal incluye técnicas tanto de carácter teórico, como experimental. Desde el punto de vista teórico, se basa en el establecimiento de un modelo matemático del sistema dinámico a estudio que incluya sus propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento. Un modelo realista deberá incluir asimismo la distribución espacial de esas propiedades lo que da lugar a la definición de las llamadas matrices de inercia, rigidez y amortiguamiento; que deberán ser incorporadas al sistema de ecuaciones diferenciales del movimiento del sistema. La aplicación del Principio de Superposición permite transformar ese sistema de problema típico de valores y vectores propios, cuya ecuaciones diferenciales en una resolución proporcionará los parámetros modales del sistema.(Reyes, 2009)

Todo tipo de análisis dinámico requiere de la determinación de la frecuencia natural y de la configuración de los modos de vibración. La realización del análisis modal se hace en condiciones de vibraciones libres, o sea sin carga y sin amortiguamiento.(Reyes, 2009)

1.10. Tipos de cimentaciones para maquinarias.

Existen muchos tipos de máquinas y cada uno puede requerir un cierto tipo de cimentación. Los diferentes tipos de máquinas son excitados normalmente por cargas desbalanceadas; en general pueden clasificarse como:

1. Máquinas reciprocantes
2. Máquinas rotatorias
3. Máquinas de impacto
4. Equipos espaciales

Máquinas reciprocantes

Son probablemente las más antiguamente usadas y es un ejemplo clásico del mecanismo de manivela. Son aquellas en las que el movimiento, debido generalmente a la expansión violenta de un gas, se logra mediante la combinación de émbolos, bielas y manivelas. El movimiento alternante generalmente armónico simple, del émbolo, se transforma por la acción de la biela en un movimiento circular de la manivela. Generalmente son máquinas de baja velocidad. Ejemplo: máquinas de vapor, motores Diesel y de gasolina entre otras.(Rodriguez, 1991)

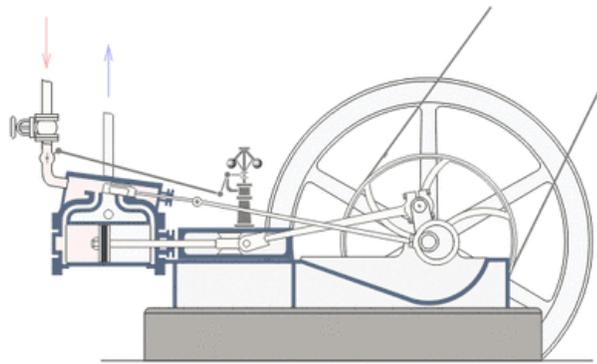


Fig. 1.10 Máquina de vapor (Rodriguez, 1991)

La cimentación usualmente consiste en un bloque de concreto rígido, que tiene preparaciones para montar la máquina. En algunas ocasiones se utilizan cimentaciones en bloque apoyadas sobre resorte.(Rodriguez, 1991)

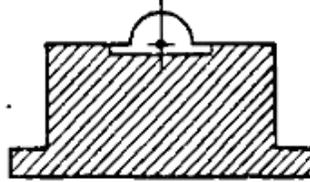


Fig. 1.11 Cimiento tipo bloque rígido (Rodríguez, 1991)

Máquinas rotatorias

El tipo de excitación que generalmente desarrollan las máquinas rotatorias es de tipo senoidal. En máquinas de éste tipo, el desplazamiento de casi todas las partes móviles describe una trayectoria circular. El movimiento generalmente obedece a la ley de la acción y reacción al desplazarse un fluido entre los álabes de una o más ruedas. En otros casos el movimiento se debe a la existencia de un conductor dentro de un campo magnético variable. Generalmente son máquinas de alta velocidad. Fundamentalmente las máquinas de este tipo son turbinas o motores eléctricos.(Rodríguez, 1991)



Fig.1.12 Motor eléctrico(Rodríguez, 1991)

Estas se clasifican de la siguiente manera:

- De baja velocidad: operan a menos de 1500 r.p.m.
- De alta velocidad: operan de 3000 r.p.m. o 3600 r.p.m. y pueden tener hasta 10000 r.p.m.

Para estas máquinas de baja velocidad, las cimentaciones usadas son: las de tipo bloque rígido y las de tipo marco. En algunos casos, si esto es necesario la cimentación deberá estar soportada por pilas.(Rodriguez, 1991)

Para las de alta velocidad son utilizadas generalmente las del tipo marco. Se prefiere este tipo de cimentación a la de tipo bloque rígido. Las de tipo marco se pueden construir con concreto reforzado o acero, siendo las primeras las más comunes.

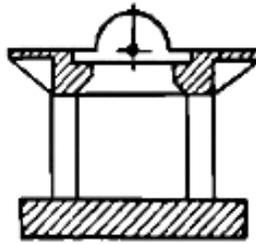


Fig. 1.13 Cimentación tipo marco(Rodriguez, 1991)

Máquinas de impacto

Las cargas transitorias o de impacto se generan por operaciones intermitentes de maquinaria. Las operaciones de prensas hidráulicas y neumáticas, de martillo por forja, de martinets y troqueladoras, por ejemplo, producen cargas de impacto que pueden ser consideradas como una pulsación simple ya que el efecto de un impacto termina antes de que ocurra el siguiente.(Rodriguez, 1991)



Fig. 1.14 Máquina troqueladora.(Rodriguez, 1991)

El diseño de la cimentación para este tipo de maquinaria deberá ser el adecuado para evitar cualquier efecto perjudicial en la cimentación, debido a la misma operación de la

maquinaria. Generalmente se basan en un bloque de concreto reforzado.(Rodriguez, 1991)

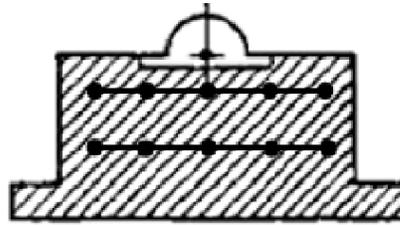


Fig. 1.15 Bloque de concreto reforzado(Rodriguez, 1991)

Equipos espaciales

Algunas máquinas o equipos especiales, que pueden originar vibraciones en sus soportes son por ejemplo, las antenas de radar. La cimentación no debe permitir grandes movimientos en toda la estructura.(Rodriguez, 1991)



Fig. 1.16 Antena de radar.(Rodriguez, 1991)

1.10.1. Clasificación de las máquinas según su frecuencia de operación

- Frecuencias de bajas a medias (0-500 r.p.m.)
- Frecuencias de medias a altas (300-1000 r.p.m.)
- Frecuencias muy altas (mayores a 1000 r.p.m.)

1.11. Concepción general de la modelación.

La modelación juega un papel fundamental como medio de solución de problemas existentes en el campo de la ingeniería. Por tal motivo, el desarrollo y utilización de los modelos para sistemas en general es una de las tareas científicas más importantes a desarrollar en la actualidad. Los modelos y los métodos de modelación se convierten por tanto en importantes herramientas de trabajo.

Se define la modelación como el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el que, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie. Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un “objeto”, no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el “objeto” modelado y está en condiciones de sustituir el “objeto” que se estudia en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener información susceptible de comprobaciones experimentales. (Recarey, 1999)

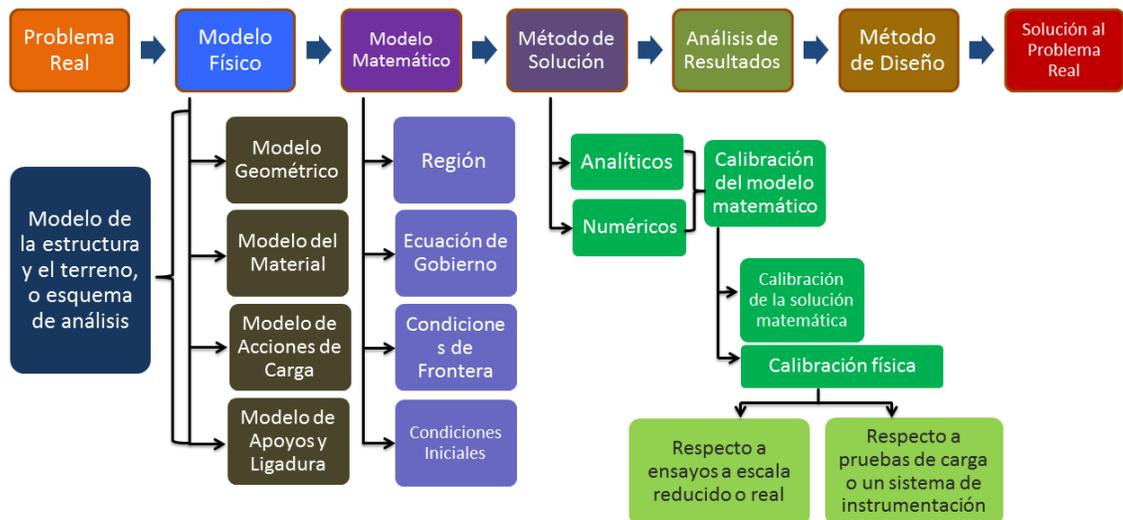


Fig. 1.17 Esquema de proceso de modelación. (García, 2015)

1.12. Programas para modelar.

La simulación numérica, en particular el Método de los Elementos Finitos (MEF) se origina por la necesidad de dar solución a problemas complejos del análisis estructural en la ingeniería civil, aeroespacial y mecánica. Durante las últimas décadas han surgido una gran variedad de productos computacionales que se basan en este método de solución y además dejan evidencia del desarrollo que se ha logrado en las esferas de la simulación y el análisis.

Actualmente algunos de los programas de mayor importancia son los que se muestran a continuación:

EverFe 2.25.

Es un software libre desarrollado conjuntamente por las universidades de Maine y de Washington, EEUU, las cuales contaron con la financiación de los departamentos de transporte de los Estados de Washington y de California. Permite modelar de forma fácil en 3D elementos finitos y simula la respuesta de sistemas de pavimentos en hormigón articulado sometidos a cargas axiales y a fenómenos ambientales, y a encogimientos.

ILLISLAB y WESLAYER

Primeros softwares para la modelación de losa empleando la teoría básica de láminas delgadas, demostrándose en investigaciones como las de (Tabatabaie and Barenberg, 1980, Huang and Wang, 1973), Estos softwares modelaban la losa como un elemento *Shell* lineal elástico en 2D. Solo se modelaba una losa de hormigón, sin evaluar el efecto que pudieran generar otras losas. La subrasante fue recreada como un medio lineal elástico empleando dos formas básicas de representarlo, como un medio discreto de Winckler y los semi-espacios infinitos (Continuos elásticos).

KENSLABS

Con la evolución en las formulaciones matemáticas del MEF, se empiezan a incluirse en los estudios los efectos referidos a las interacciones con las losas contiguas a partir de mecanismos de transferencia, el efecto de la temperatura, las no linealidades de los

materiales, efecto dinámico de las cargas y la modelación de la estructura en 3D, evidenciándose en trabajos como el de (Huang, 1985), desarrollando el modelo KENSLABS para incluir múltiples losas y varios mecanismos de transferencias como el ILLISLABS. La subrasante fue caracterizada como un medio semi-elástico. También fueron estudiados la pérdida del contacto con la subrasante y los efectos del refinamiento de las mallas.

DYNA-SLAB

(Chatti et al., 1994) Prolongaron el ILLI-SLAB 2D existente a un programa de elementos finitos dinámicos y lineal, llamado DYNA-SLAB, para estudiar los efectos de las cargas dinámicas. La losa de hormigón fue modelada con elementos de placa y la subrasante fue tratada como un macizo de Winckler o un medio visco-elástico en capas sobre uno rígido o un semi-espacio infinito.

ABAQUS

(Kuo et al., 1995). Desarrollaron un modelo de elementos finitos elástico 3D para investigar algunos de los factores que afectan el soporte de un pavimento rígido, incluyendo el espesor de la base y su rigidez, la adherencia en la interface, el calentamiento de la losa y efecto de combado debido a la temperatura y al gradiente de humedad, la transferencia de carga en las juntas y los anchos de carril. Determinar el óptimo refinamiento de la malla y el mejor tipo de elemento fueron tareas que requirieron esfuerzos significativos. Tanto elementos de placa 2D (4 nodos y 8 nodos) como *brick elements* 3D (8 nodos y 20 nodos) fueron considerados para modelar la losa. La base tratada con cemento fue modelada usando otra capa de elementos 3D, mientras que la subrasante fue tratada como un macizo de Winkler. Para representar la interface entre capas se empleó un elemento de membrana unido a otro elemento con interface especial. El modelo fue verificado comparando las predicciones del modelo con la solución analítica de Westergaard y con las predicciones del modelo de elementos finitos ILLI-SLAB 2D.

NIKE 3D

(Brill et al., 1997) Desarrollo este software. A diferencia de la mayoría de los modelos de elementos finitos 3D, la losa fue modelada con elementos de placa de 4 nodos mientras que la subrasante lo fue con elementos lineales hexaédricos de 8 nodos. Fueron considerados diferentes tipos de uniones entre las losas como trabazón de agregados y transferencia de cortante a través de pasadores, ambos modelados con elementos hexaédricos lineales y elásticos. Las tensiones calculadas fueron comparadas con las soluciones analíticas. En la mayoría de los casos las diferencias entre las dos soluciones observadas fueron significativas.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015.

Robusta aplicación de análisis estructural, con una poderosa interfaz intuitiva creada específicamente para el modelado, análisis y diseño de estructuras. Posee potentes técnicas de generación de mallas tanto manuales como de forma automática, que a la vez permiten refinarlas para la obtención de resultados más exactos. Permite a los ingenieros estructurales explorar alternativas de diseño e investigar el comportamiento lineal y no lineal auténtico de cualquier estructura. Cuenta con más de 60 bases de datos de secciones y materiales. Gran flexibilidad al obtener resultados de los análisis, pudiéndose ver por elementos individuales, por partes de la estructura o para todo el conjunto, en forma de diagramas y planos. Este programa utiliza la tecnología de modelo de objetos de componentes (COM), introducida por Microsoft, que proporciona arquitectura abierta y programable por cualquier ingeniero. Posee una integración abierta con programas como Microsoft Excel, Microsoft Word y AutoCAD. Los equipos de diseño multinacionales pueden utilizarlo en diversos idiomas, donde es posible realizar análisis estructural en un idioma y generar los resultados en otro.

SAFE.

Programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc. en Berkeley, California, EEUU. Es la última herramienta para el diseño de sistemas de pisos de concreto y fundaciones. La maquetación de modelos es rápida y eficiente con las

herramientas de dibujos sofisticadas, o utilizar una de las opciones de importación para traer los datos de CAD, hojas de cálculo o programas de bases de datos. Losas y cimentaciones pueden ser de cualquier forma, y pueden incluir bordes circulares y con curvas spline. Es un programa que automatiza el análisis y diseño de simple a complejas cimentaciones de concreto usando avanzados sistemas de modelación. El programa puede analizar y diseñar losas de formas arbitrarias y de espesor variable, de paneles desnivelados, con aberturas, vigas de bordes y discontinuidades. El enmallado es automático y está basado en parámetros especificados por el usuario. Las cimentaciones son modeladas como placas gruesas sobre cimentaciones elásticas, donde solamente la rigidez a la compresión del suelo es automáticamente discretizada basada en el módulo de la reacción de la sub-base que es especificada para la cimentación.

SAP2000.

Es un programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc. En Berkeley, California, EEUU. Desde hace más de 30 años ha estado en continuo desarrollo, para brindar al ingeniero una herramienta, confiable, sofisticada y fácil de usar sobre la base de una poderosa e intuitiva interfaz gráfica con procedimientos de modelaje, análisis y diseño estructural a la vanguardia a nivel mundial. Dicho software determina a través del método de elementos finitos la respuesta en términos de fuerza, esfuerzos y deformadas en los elementos de área y sólidos, presentando una salida gráfica y por tablas, haciéndolo una herramienta muy versátil para ingenieros estructurales dedicados a la investigación, desarrollo de proyectos y construcción.(García, 2016)

Para esta investigación se ha decidido modelar con el software SAP 2000, debido a su gran velocidad en cuanto al postprocesamiento de los resultados, disminuyéndose considerablemente el tiempo computacional, además este software ha sido utilizado por diferentes investigadores en el análisis de vibración en bases de concreto, Ricardo González Alcorta, Luis Manuel Aranda Márquez ambos profesores de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León han utilizado el SAP 2000 en su estudio “Análisis de la vibración de una losa de concreto ocasionada por la operación de una maquinaria” obteniendo resultados satisfactorios.

1.13. Método de elementos finitos

En muchos problemas del mundo real se presenta una alta complejidad de geometría de los elementos y el establecimiento de condiciones de fronteras para el análisis de los mismos lo cual impide obtener una solución exacta del análisis considerado, por lo que se recurre a técnicas numéricas de solución de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos físicos. El Método de los Elementos Finitos es una de estas técnicas numéricas, muy apropiada su implementación en computadoras.

En todos los modelos de elementos finitos el dominio o continuo se divide en un número finito de formas simples denominadas elementos. Las propiedades y las relaciones gobernantes del fenómeno estudiado se asumen sobre estos elementos, y se expresan matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos de los elementos denominados nodos. Estos nodos sirven de conexión entre los elementos. En los modelos sólidos, los desplazamientos en cada elemento están directamente relacionados con los desplazamientos nodales, y los desplazamientos nodales se relacionan a su vez con las deformaciones y los esfuerzos en los elementos. El método de los elementos finitos trata de seleccionar los desplazamientos nodales de forma que los esfuerzos estén en equilibrio (de forma aproximada) con las cargas aplicadas.(García, 2016)

Conclusiones parciales del capítulo.

- El análisis y el diseño de cualquier estructura trae inmerso un sin número de aspectos de los cuales no se conocen su incidencia con exactitud, lo cual ocurre también en el diseño de bases de concreto rígido para maquinarias
- La modelación de las bases de maquinarias en concreto rígido mediante software de elementos finitos nos permite valorar con mayor precisión la incidencia de la variación de distintos parámetros
- Los softwares más utilizados dependen de la información que son capaces de procesar y manejar, por lo que se decide modelar con el SAP 2000.

CAPÍTULO 2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN

El objetivo principal del presente capítulo es definir los parámetros que contribuyen a la modelación de la base de hormigón para el eje de cuchilla No.1 del central Mario Muñoz Monroy, a través del software SAP 2000. De manera general se tratan los aspectos a tener en cuenta en la modelación de bases de maquinarias, donde se detalla el caso de estudio tratado, definiendo aspectos como la geometría del modelo, las características de los materiales a utilizar, la modelación de los mismos y la modelación de las cargas y el suelo. Además se realiza la calibración del modelo para analizar con mejor precisión su comportamiento bajo el efecto de la carga dinámica.

2.1. Planteamiento del problema.

Los estudios que se han realizado acerca de la incidencia de vibraciones en bases para maquinarias han respondido a numerosas inquietudes, aun así en numerosos diseños no se tiene en cuenta el efecto de las mismas en la estructuras, trayendo consigo daños que pudieran estar asociados a estas acciones, lo que hace necesario la modelación numérica para determinar si los esfuerzos dinámicos inducidos en la cimentación por la operación de la máquina, en combinación con los esfuerzos debidos a otras fuentes, no excedan los límites permisibles para el material que constituye la cimentación.

2.2. Características de la maquinaria.

Las características necesarias para la modelación de la base son el peso y la velocidad angular en (r.p.m) de la maquinaria, valores que se obtienen del fabricante y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Características de la máquina.

Tipo de Máquina	Peso en (t / kN)	Velocidad angular en (r.p.m)
Eje de cuchilla No.1	11.6 / 116	600

2.3. Parámetros para modelar.

Para la modelación del cimiento es necesario tener en cuenta, la geometría del objeto, el material que lo compone, las condiciones de apoyo y las cargas actuantes. A continuación se abordaran de forma independiente cada uno de estos parámetros.

2.3.1. Modelo geométrico.

La base de concreto sobre el cual se apoya el equipo estudiado está estructurada por medio de un muro sólido de 4 x 2,42 x 2,16 metros. Para la concepción del modelo de la base, se utilizó el método de elementos finitos, incorporado en el software SAP2000. En la Figura 2.1 se muestra las dimensiones consideradas para el análisis del bloque.

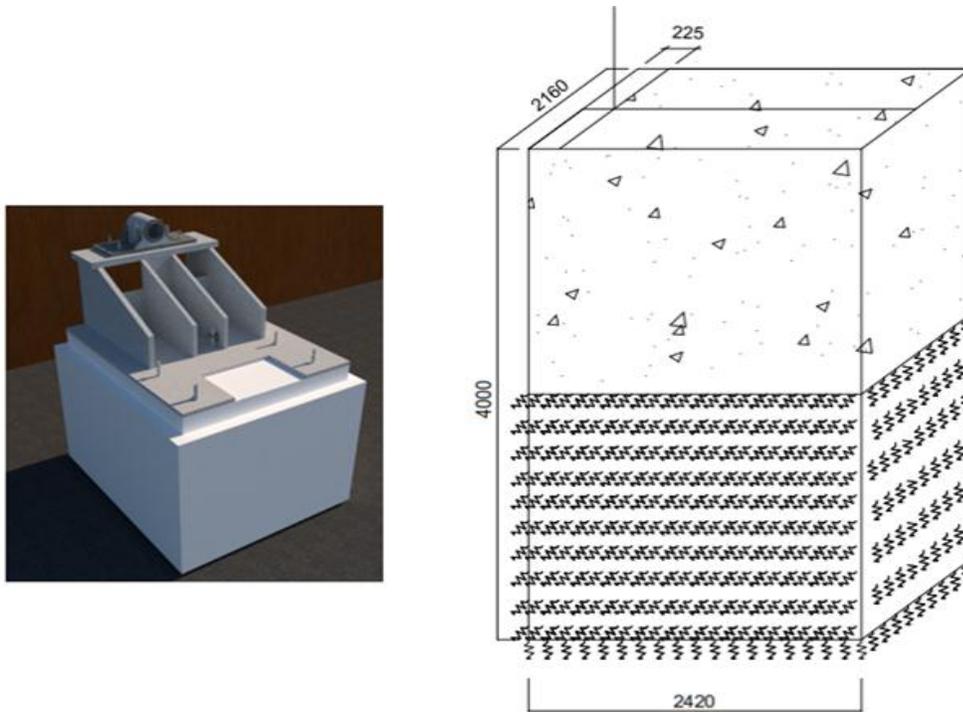


Fig. 2.1 Modelo geométrico de la base.

2.3.2. Modelo de material.

Los materiales utilizados en la modelación de cimentación para maquinarias son el hormigón, y el suelo. Para la modelación de dichos materiales se ha adoptado un modelo de comportamiento lineal-elástico. En los siguientes puntos serán abordadas las características de dichos materiales.

2.3.3. Modelo del hormigón.

Trabajos como (García, 2015, Hernández, 2014) han definido un modelo de daño plástico para este material, modelo que ha cobrado un gran auge en muchas investigaciones, describiendo de una forma más real el comportamiento de este material ante las incidencias de diferentes regímenes de cargas. En la presente investigación se adopta un modelo lineal-elástico para dicho material presente en las bases de maquinarias del central Mario Muñoz Monroy.

La resistencia a la compresión del hormigón puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como de la capacidad de resistencia mecánica.



Fig. 2.2 Extracción de testigos en la base de la maquinaria.

El ensayo consiste en realizar la rotura de las muestras de hormigón extraídas con el objetivo de conocer la resistencia a la compresión axial determinada de acuerdo a la carga de rotura. Los resultados están recogidos en la tabla siguiente:

Tabla 2.2 Resultados del ensayo a compresión axial en testigos de hormigón.

No. testigo	Ubicación	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	Densidad (Kg/m ³)
Izquierdo	Cimiento del eje	173.4	2285
Derecho		130.6	2204

2.3.4. Modelo del suelo.

Suelo: Para representar la rigidez del suelo será modelado sobre soportes elásticos definiendo el parámetro k (módulo de reacción del suelo) constante, definido por la teoría de Westergaard, basada en el modelo de Winkler.

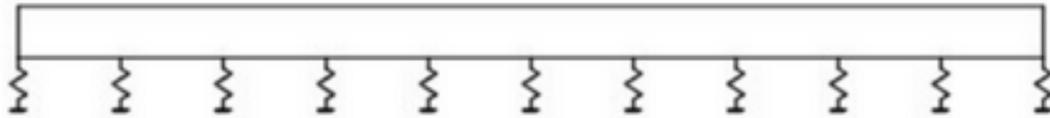


Figura 2.3 Representación del suelo(García, 2016)

Expuesto inicialmente, el suelo será modelado elásticamente, sobre un número infinito de resortes elásticos, que simulan la rigidez del suelo (modelo de Winkler), uno de los métodos más utilizados a nivel mundial, ganando una gran aceptación, permitiendo una fácil asimilación de la interacción suelo-estructura por los métodos matriciales de cálculo.

Se puede decir que el área de estudio lo componen diferentes capas o elementos ingeniero geológicos:

La capa # 1 está formada por gravas de origen calcáreo, deleznable y por arcillas de color carmelita. Esta es una capa de contacto, su espesor varía entre 0.15m y 1.70m.

La capa # 2 está formada por arcilla de origen calcáreo, con coloración blanca y betas amarillas y en algunos puntos vetas grises, presenta algunas gravas, su espesor varía desde 0.20m a 1.30m.

Tabla 2.3. Valores promedios de ensayos físicos y mecánicos para esta capa:

W %	γ_d kN/m ³	γ_f kN/m ³	Pe kN/m ³	e	S %	C Mpa	ϕ	E Mpa
28.60	13.99	18.00	27.00	0.90	88.22	4.85	14°	3.64

La capacidad soportante de esta capa varía entre 0.15 y 0.20 Mpa.

La capa # 3 está constituida por arcilla limosa de color amarillento, la cual posee intercalaciones de arcilla calcárea, su espesor esta por el orden de 2 a 3 metros y sus propiedades fisico-mecánicas son muy similares a la de la capa anterior. Dicha capa fue

la modelada en el software ya que es la que incide directamente sobre el objeto de estudio.

2.3.5. Cargas.

2.3.5.1. Cargas dinámicas

Las cargas presentes son de tipo oscilatorias originadas por la propia máquina. Se realizará un barrido de frecuencias para una carga aplicada a diferentes frecuencias; para ello se utilizan los valores de las frecuencias propias del equipo (600 r.p.m). Este análisis conocido como *steady state* busca la respuesta de la estructura en una o más frecuencias para cargar el formulario:

$$\bar{p}(w) = \sum_j s_j f_j(w) p_j e^{i\theta_j} = \sum_j s_j f_j(w) p_j (\cos \theta_j + i \sin \theta_j) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde: s_j es un factor de escala y θ_j es el ángulo de fase al que se aplica la carga p_j .

La función de frecuencia, $f_j(w)$ viene dada directamente por una función de *steady state* que se defina. Representa la magnitud de la carga antes de escalar por s_j . Como el interés radica en las características de respuesta de la estructura en sí se podría usar una función constante, es decir, $f_j(w) = 1$ y para la carga que es causada por la rotación de maquinaria, podría ser utilizado. $f_j(w) = w^2$.

2.3.5.2. Carga por peso propio.

Cuchilla picadora de caña:

Este equipo está constituido por un eje horizontal sobre el cual están montados unos soportes a los cuales se fijan las cuchillas o machetes. En el extremo del eje se fija el *coupling*, que recibe el movimiento del motor. El eje descansa sobre dos cojinetes de rolletes que se asientan sobre unas chapas gruesas de metal fijadas sobre bases sólidas de hormigón mediante pernos de anclaje.

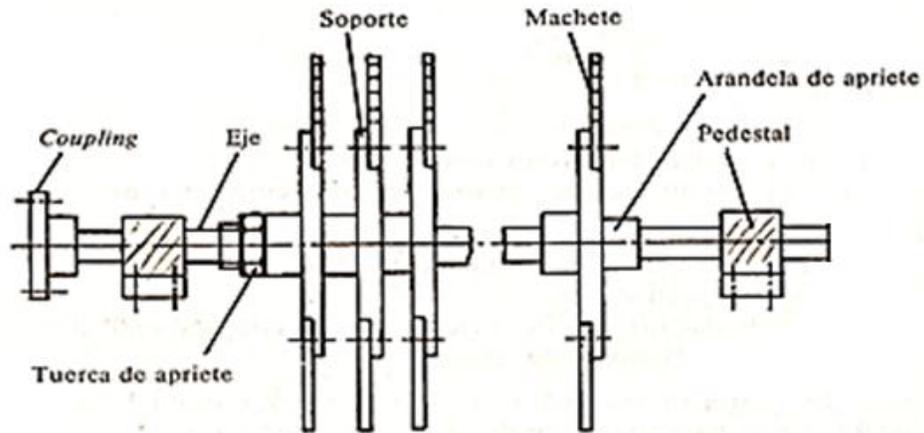


Fig. 2.4 Conjunto del eje de la cuchilla picadora de caña.

Sobre las cuchillas se colocan unos tapacetes que impiden que la caña sea lanzada fuera del conductor. Con el mismo objetivo se colocan compuertas oscilantes en la entrada y en la salida de los tapacetes.

Como medida de seguridad tanto el volante como los *couplings* están cubiertos con protectores que obligatoriamente deben estar fijados en su lugar antes de ser puesta la cuchilla en movimiento.

1. Tipo de cuchillas: varios

2. Peso por cuchilla:

47,5 lb (21,6 kg), con simple filo.

60,6 lb (27,5 kg), con doble filo.

Peso total del eje con 26 soportes: 11,6 t

2.4. Mallado.

2.4.1. Tipo de elemento.

Determinar el elemento finito a utilizar en los modelos es uno de los primeros pasos para comenzar con la corrección, en cada uno de los sistemas previamente definidos, se adoptó la utilización de un elemento tipo sólido con ocho nodos, de análisis tridimensional.

2.4.2. Densidad de mallado.

Modelo 1.

Cantidad de elementos 8.

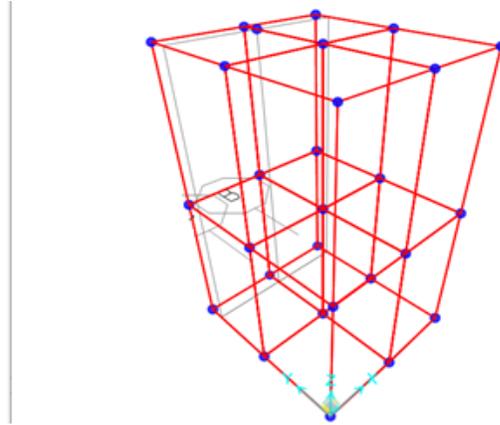
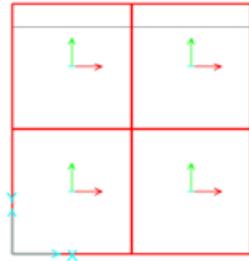


Fig. 2.5 Mallado 1.

Modelo 2.

Cantidad de elementos 16.

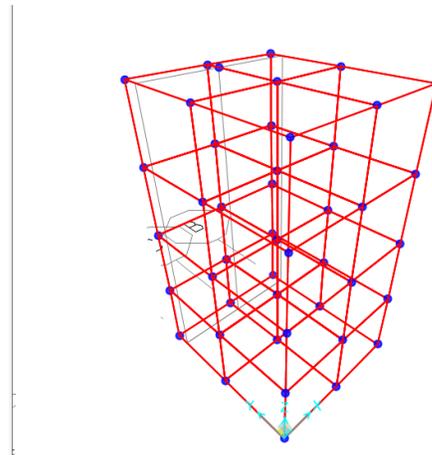
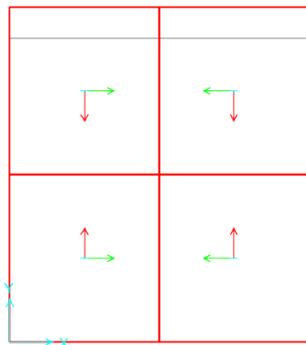


Fig. 2.6 Mallado 2.

Modelo 3.

Cantidad de elementos 32.

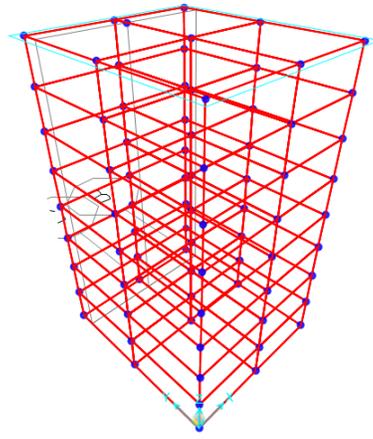
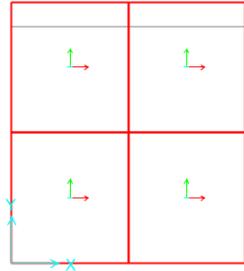


Fig. 2.7 Mallado 3.

Modelo 4.

Cantidad de elementos 64.

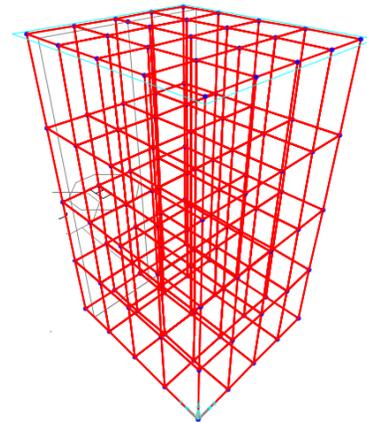
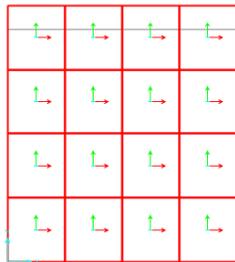


Fig. 2.8 Mallado 4.

Modelo 5.

Cantidad de elementos 128.

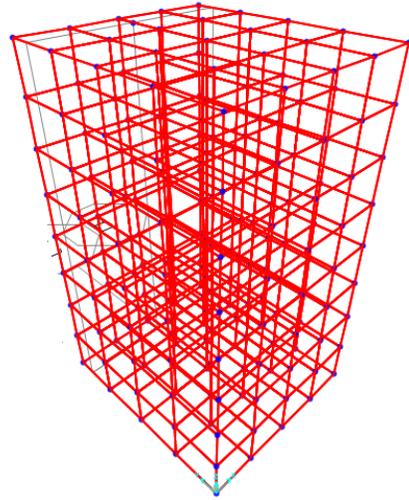
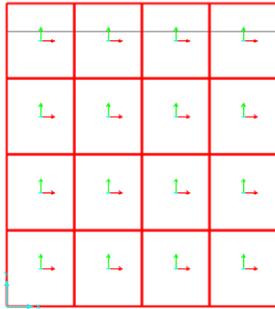


Fig. 2.9 Mallado 5.

Modelo 6

Cantidad de elementos 256.

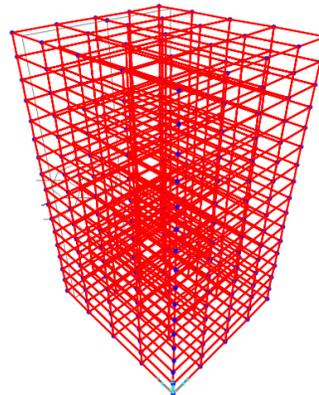
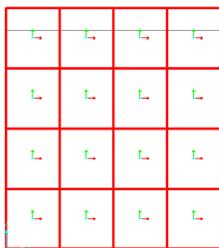


Fig. 2.10 Mallado 6.

Modelo 7

Cantidad de elementos 512.

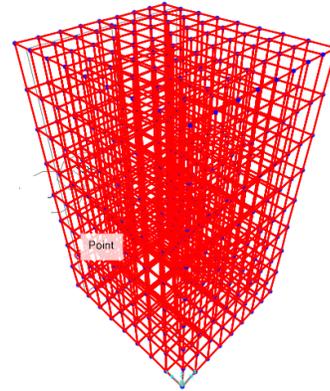
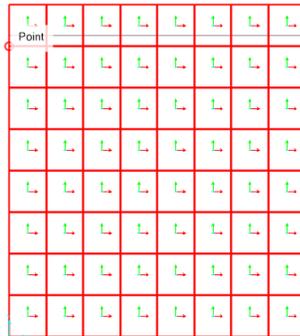


Fig. 2.11 Mallado 7.

Modelo 8

Cantidad de elementos 1024.

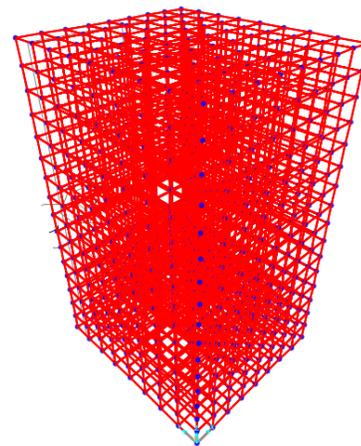
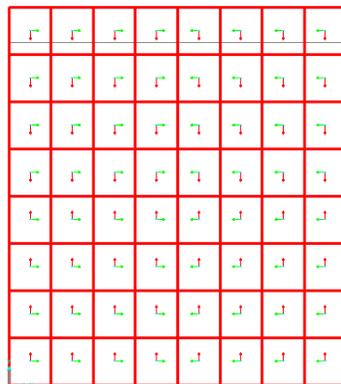


Fig. 2.12 Mallado 8.

Modelo 9

Cantidad de elementos 2048.

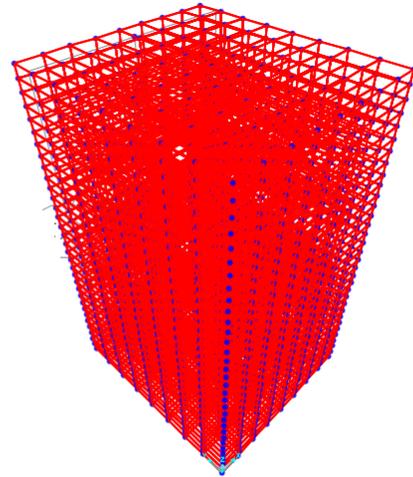
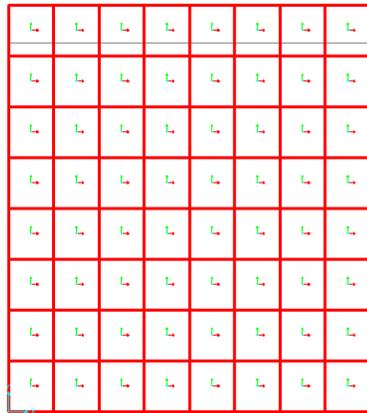


Fig. 2.13 Mallado 9.

Modelo 10

Cantidad de elementos 4098.

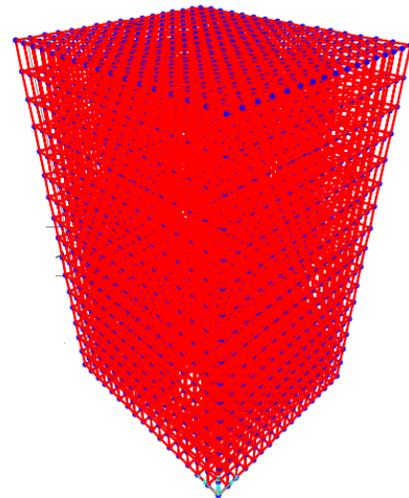
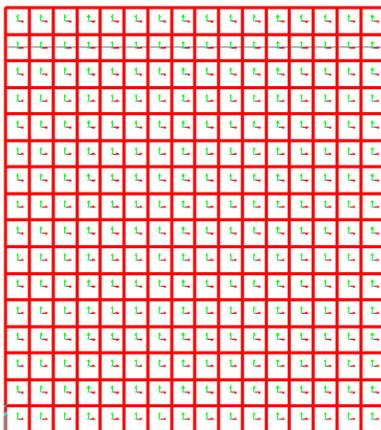


Fig. 2.14 Mallado 10.

2.5. Calibración.

El Método de los Elementos Finitos es una técnica numérica, que ofrece resultados aproximados al ser implementada para darle solución a cualquier problema ingenieril.

Por tal motivo los modelos numéricos son sometidos a un proceso de calibración, de los cuales se pueden decir que se dividen en dos partes: una calibración matemática y una calibración física. La calibración matemática garantiza una aproximación adecuada y estabilidad de la solución obtenida. La calibración garantiza que el modelo implementado, tenga correspondencia con el modelo físico que se estudia, es por ello que este tipo de calibración necesita disponer de ensayos previos a escala real o reducida del fenómeno estudiado. Todo modelo matemático debe someterse a proceso de calibración física para demostrar su fiabilidad y correspondencia con el fenómeno físico a analizar. Ante la carencia de pruebas experimentales, solo se limitará a calibrar el modelo matemático.

Para llevar a cabo el proceso de dicha calibración es preciso seleccionar la densidad de mallado adecuada o recomendable. Para la selección de la malla se tiene en cuenta la cantidad de elementos generados y el tiempo de corrida del modelo. Está claro que ante el aumento del número de nodos, trae consigo el aumento del número de ecuaciones a resolver por el software, y por consiguiente el aumento del costo computacional, uno de los puntos más importantes a tomar en consideración. Los nodos de estudios se ubicaron en los bordes y en el centro del bloque de forma tal que puedan extraerse varios valores de tensiones para llevar a cabo el proceso de calibración. Ver figura 2.15.

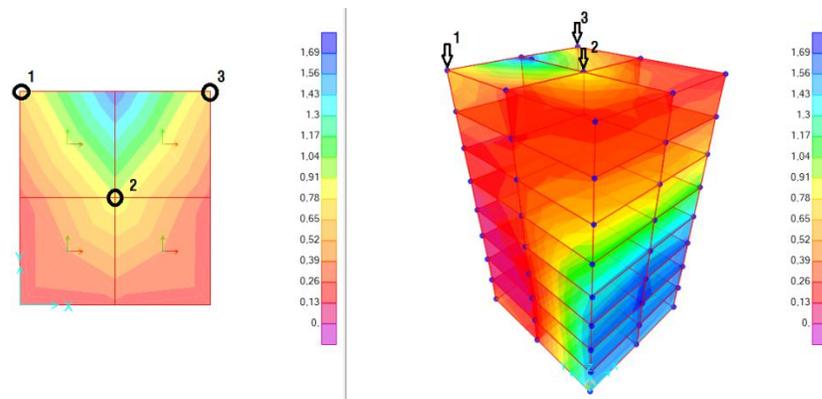


Fig. 2.15 Nodos de estudio

Para la calibración del modelo se define un módulo de reacción del suelo de $k = 100 \text{ psi}$ ($27\,144,71 \text{ kN/m}^3$) correspondiente a la capa de suelo donde se encuentra el bloque. La tabla que se muestra a continuación brinda el valor máximo de tensión en los nodos estudiados para el modo número uno de oscilación.

Tabla 2.4 Calibración del modelo

No. Elementos	Tensiones en los nodos de estudio (Mpa)			Tiempo (s)
	1	2	3	
8	3,3	8,52	3,3	1
16	2,7	7,52	2,7	1
32	4,56	6,14	4,56	1
64	-0,09	5,91	-0,09	1
128	0,69	5,81	0,69	1
256	2,1	0,85	2,1	2
512	-0,01	3,76	-0,01	8
1024	0,75	0,57	0,75	16
2048	0,62	0,47	0,62	95
4096	0,44	0,91	0,44	508

En los siguientes gráficos se muestran los valores de Tensión vs Cantidad de elementos. Con el objetivo de comparar el comportamiento de las tensiones en los nodos estudiados y de esta forma comprobar su estabilidad.

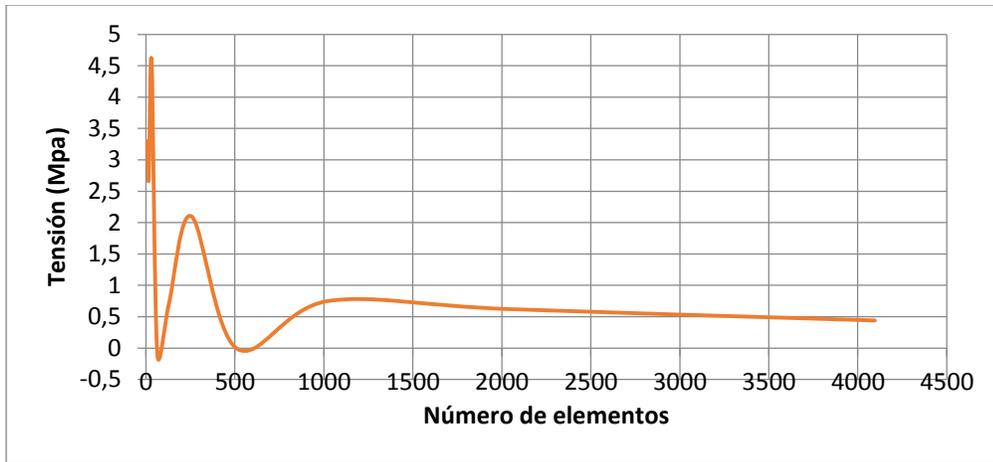


Fig. 2.16 Tensión vs Cantidad de elementos Nodo 1.

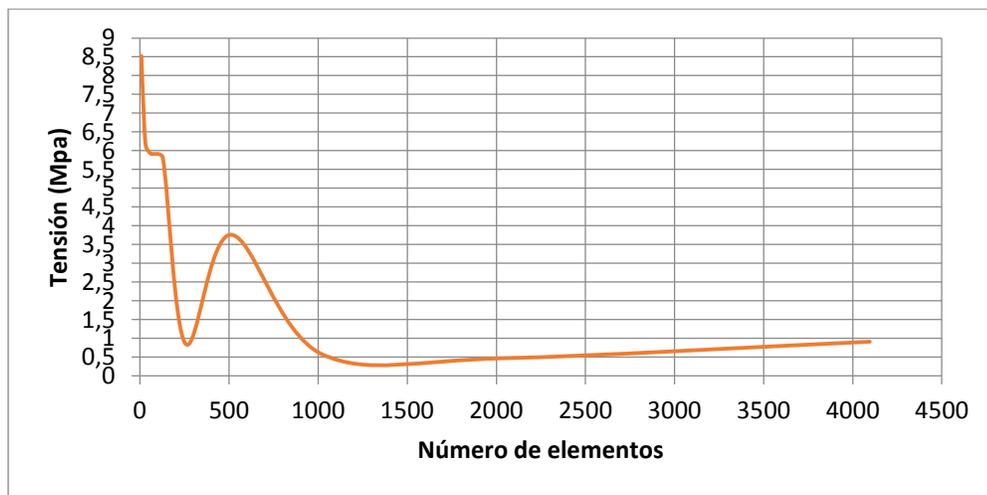


Fig. 2.17 Tensión vs Cantidad de elementos Nodo 2.



Fig. 2.18 Tensión vs Cantidad de elementos Nodo 3.

Como se puede observar a partir de que el número de elementos llega a 2048 la tensión se comporta prácticamente estable y el tiempo computacional empleado no es representativo por lo que se ha decidido tomar este modelo para el análisis del sistema.

Conclusiones parciales del capítulo.

- Para la modelación del suelo se decide emplear el modelo de winkler el cual permite una fácil asimilación de la interacción suelo-estructura por los métodos matriciales de cálculo
- Las cargas actuantes se definen como estáticas y dinámicas, las primeras producto del peso propio del equipo y las segundas producidas por el movimiento ondulatorio de la máquina
- Para la calibración del modelo se miden las tensiones en tres puntos especificados alrededor de la zona donde se encuentra la carga, donde la gráfica de Tensiones vs Número de elementos tiene un comportamiento invariable para un número de elementos de 2048.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Este capítulo tiene como objetivo principal el análisis de los resultados arrojados por el software SAP 2000, que contribuyen al estudio del comportamiento estructural de la base de hormigón que soporta el eje de la cuchilla número 1 del Central Mario Muñoz Monroy.

Para el análisis de tensiones del elemento se divide el bloque en una serie de planos paralelos entre sí con el objetivo de realizar un barrido de tensiones en la dirección del eje Z, paralelo al plano XY, espaciados a 0,20 m hasta alcanzar los 2,50 m ya que a partir de esta altura están espaciados a 0,1 m con el objetivo de obtener resultados más aproximados. De igual forma se divide en el sentido del eje Y paralelos al plano XZ aunque estos últimos están espaciados a 0,2 m en toda la longitud.

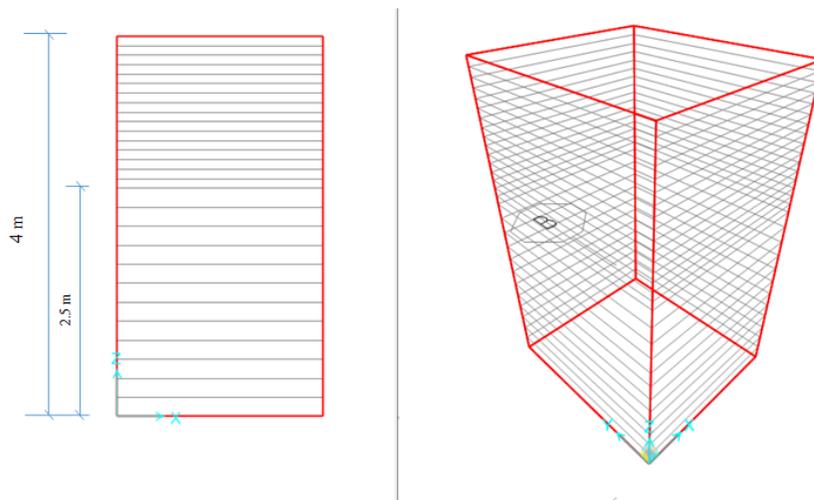


Fig. 3.1 División del bloque.

3.1. Análisis estático de tensiones.

En un primer análisis se comprueban las tensiones producto a las cargas estáticas cuyos datos de tensiones se muestran en la siguiente tabla y su comportamiento se aprecia en el gráfico correspondiente.

Tabla 3.1 Profundidad de tensiones por cargas estáticas.

Sobre el eje Z		Sobre el eje Y	
cota (m)	Tensión (Mpa)	cota (m)	Tensión (Mpa)
4	0,03	2,42	0,1
3,9	0,03	2,2	0,07
3,8	0,02	2	0,02
3,7	0,016	1,8	0,2
3,6	0,01	1,6	0,14
3,5	0,01	1,4	0,01
3,4	0,001	1,2	0,01

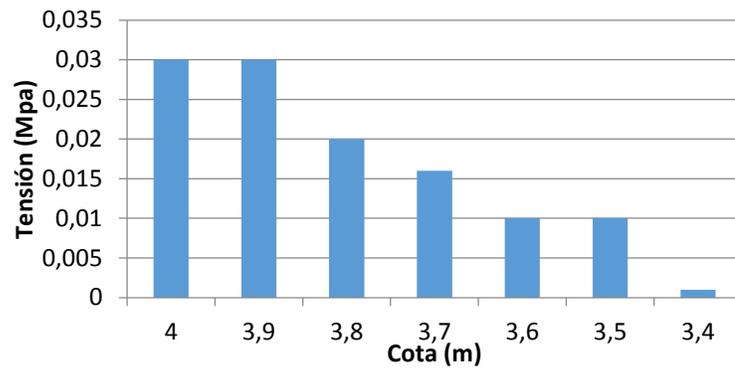


Fig. 3.2 Gráfico de tensiones eje Z.

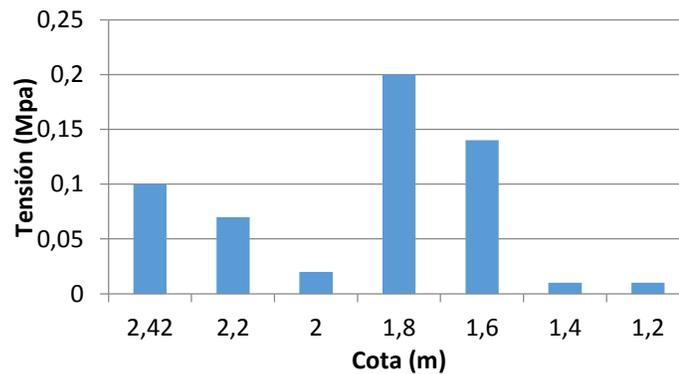


Fig. 3.3 Gráfico de tensiones eje Y.

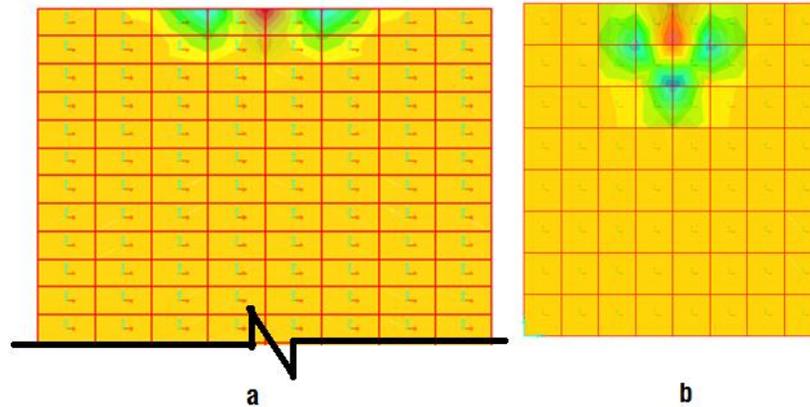


Fig. 3.4 Representación gráfica de las tensiones críticas producto a cargas estáticas.

En la figura 3.4 a se muestran los resultados extraídos para la zona más crítica en el plano XZ y en la figura 3.4 b se muestran los resultados para la zona más crítica en el plano XY.

3.2. Análisis dinámico de tensiones.

Una vez analizadas las tensiones críticas producto a las cargas estáticas se procede a analizar las tensiones producto a las cargas dinámicas cuyos datos de tensiones se muestran en la siguiente tabla y su comportamiento se aprecia en el gráfico correspondiente. Dicho análisis se realiza para valores diferentes de frecuencias.

- Para una frecuencia de 0,5 Hz

Tabla 3.2 Profundidad de tensiones por cargas estáticas para una frecuencia de 0.5 Hz.

Sobre el eje Z	
Cota (m)	Tensión (Mpa)
4	0,07
3,9	0,06
3,8	0,04
3,7	0,003
3,6	0,02
3,5	0,019
3,4	0,019
3,3	0,017
3,2	0,014
3,1	0,014

Sobre el eje Y	
Cota (m)	Tensión (Mpa)
2,42	0,08
2,2	0,08
2	0,29
1,8	0,29
1,6	0,06
1,4	0,06
1,2	0,01

3	0,01
2,9	0,01
2,8	0,01

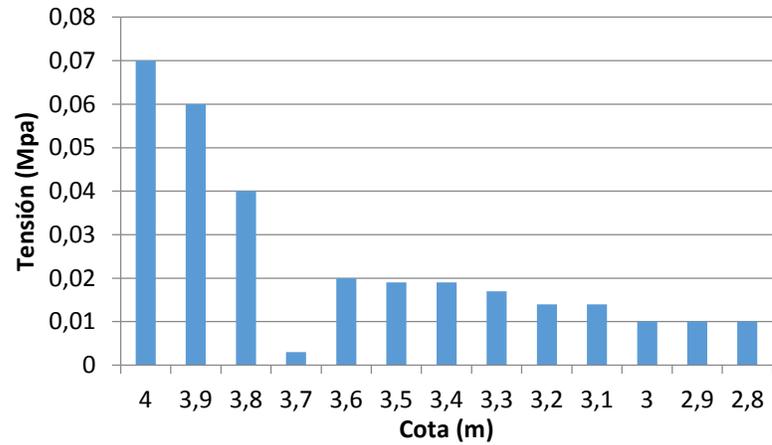


Fig. 3.5 Gráfico de tensiones eje Z.

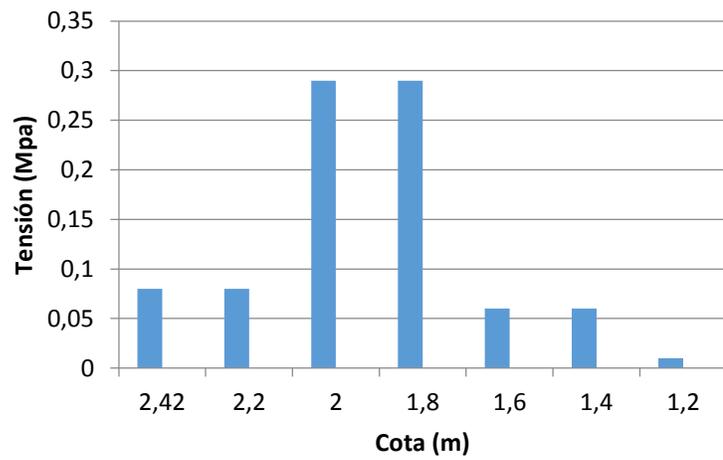


Fig. 3.6 Gráfico de tensiones eje Y.

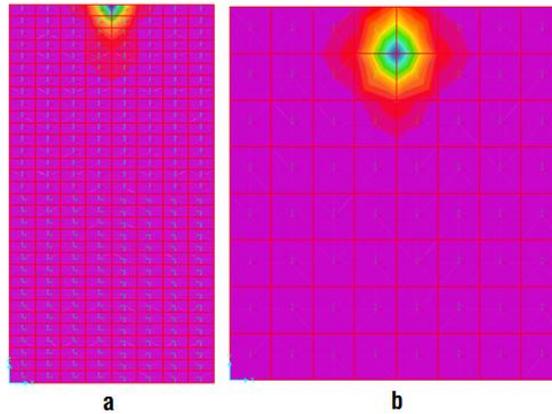


Fig. 3.7 Representación gráfica de las tensiones críticas producto a cargas dinámicas.

En la figura 3.7 a se muestran los resultados extraídos para la zona más crítica en el plano XZ y en la figura 3.7 b se muestran los resultados para la zona más crítica en el plano XY.

. Para una frecuencia de 1,5 Hz.

Tabla 3.3 Profundidad de tensiones por cargas estáticas para una frecuencia de 0.5 Hz.

Sobre el eje Z	
Cota (m)	Tensión (Mpa)
4	0,4
3,9	0,4
3,8	0,25
3,7	0,2
3,6	0,1
3,5	0,1
3,4	0,1
3,3	0,08
3,2	0,07
3,1	0,06
3	0,06

Sobre el eje Y	
Cota (m)	Tensión (Mpa)
2,42	0,46
2,2	0,47
2	1,6
1,8	1,67
1,6	0,36
1,4	0,36
1,2	0,1

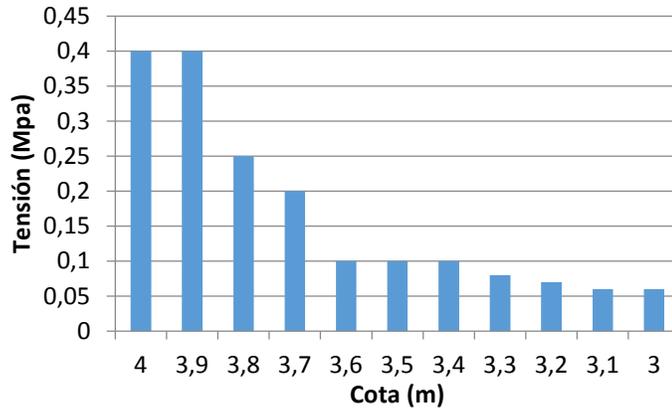


Fig. 3.8 Gráfico de tensiones eje Z.

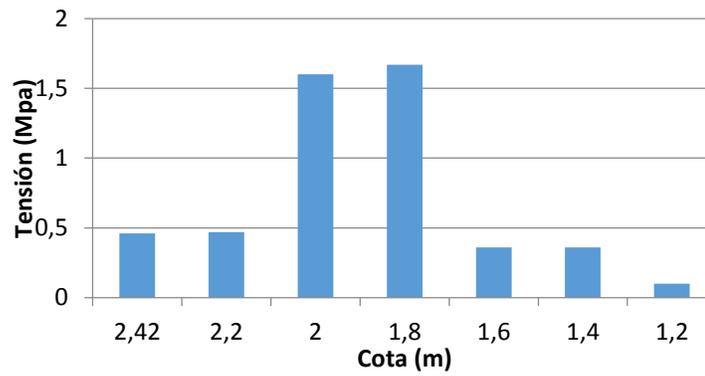


Fig. 3.9 Gráfico de tensiones eje Y.

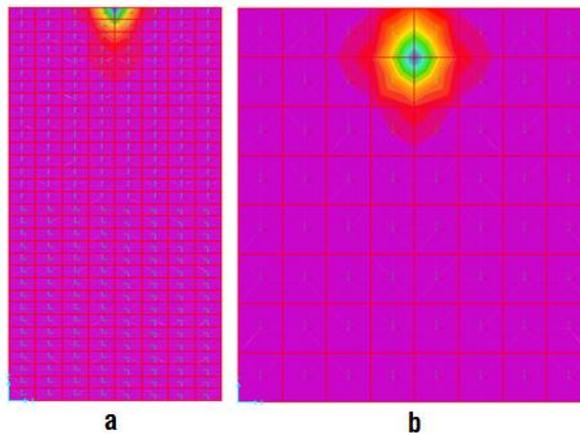


Fig. 3.10 Representación gráfica de las tensiones críticas producto a cargas dinámicas.

En la figura 3.10 a se muestran los resultados extraídos para la zona más crítica en el plano XZ y en la figura 3.10 b se muestran los resultados para la zona más crítica en el plano XY.

. Para una frecuencia de 2 Hz.

Tabla 3.4 Profundidad de tensiones por cargas estáticas para una frecuencia de 0.5 Hz.

Sobre el eje Z	
Cota (m)	Tensión (Mpa)
4	0,7
3,9	1,1
3,8	0,4
3,7	0,3
3,6	0,24
3,5	0,1
3,4	0,2
3,3	0,18
3,2	0,1
3,1	0,1
3	0,1

Sobre el eje Y	
Cota (m)	Tensión (Mpa)
2,42	0,08
2,2	0,082
2	2,9
1,8	2,9
1,6	0,6
1,4	0,6
1,2	0,1
1	0,02
0,8	0,02

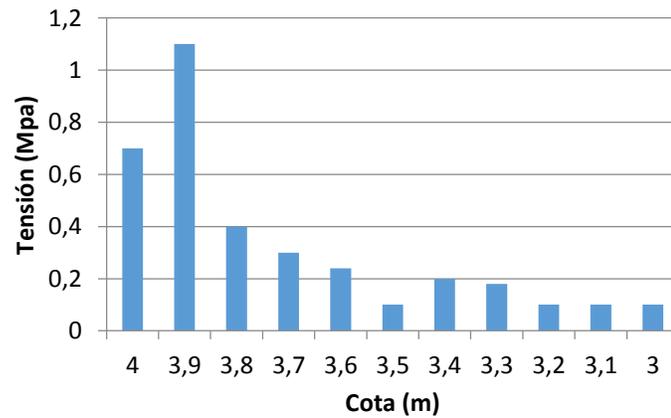


Fig. 3.11 Gráfico de tensiones eje Z.

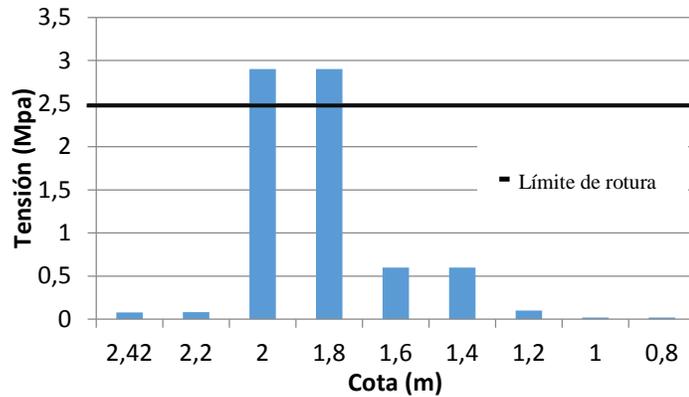


Fig. 3.12 Gráfico de tensiones eje Y.

Como se puede observar en la figura 3.12 las tensiones que se generan en el bloque a una distancia de 1.8 m en el sentido del eje Y superan la máxima establecida para el hormigón la cual ha sido determinada mediante la siguiente expresión.

Tensión de rotura del Hormigón

$$0.62\sqrt{f'_c}$$

Ecuación 3.1

Donde: f'_c es la resistencia a compresión del hormigón.

$$f'_c = 17\text{Mpa}$$

$$0.62\sqrt{f'_c} = 0.62\sqrt{17} = 2.55\text{ Mpa}$$

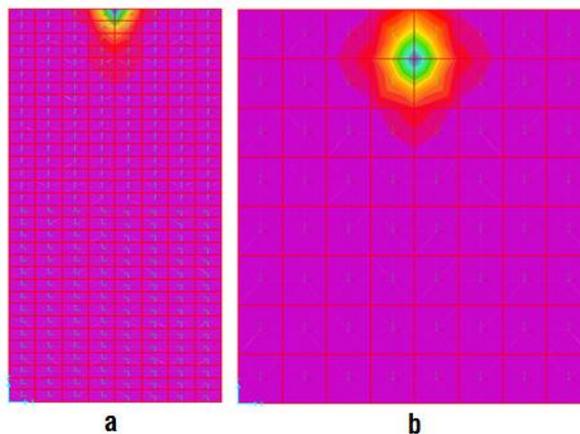


Fig. 3.13 Representación gráfica de las tensiones críticas producto a cargas dinámicas.

En la figura 3.13 a se muestran los resultados extraídos para la zona más crítica en el plano XZ y en la figura 3.13 b se muestran los resultados para la zona más crítica en el plano XY.

. Para una frecuencia de 4 Hz.

Tabla 3.5 Profundidad de tensiones por cargas estáticas para una frecuencia de 0.5 Hz.

Sobre el eje Z		Sobre el eje Y	
Cota (m)	Tensión (Mpa)	Cota (m)	Tensión (Mpa)
4	2,8	2,42	3,2
3,9	4,4	2,2	3,2
3,8	1,7	2	11,4
3,7	1,2	1,8	11,4
3,6	0,9	1,6	2,47
3,5	0,76	1,4	2,4
3,4	0,76	1,2	0,5
3,3	0,66	1	0,7
3,2	0,58		
3,1	0,5		
3	0,48		
2,8	0,4		

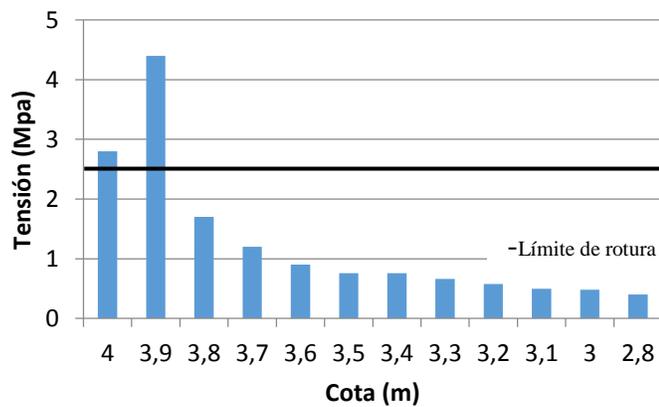


Fig. 3.14 Gráfico de tensiones eje Z.

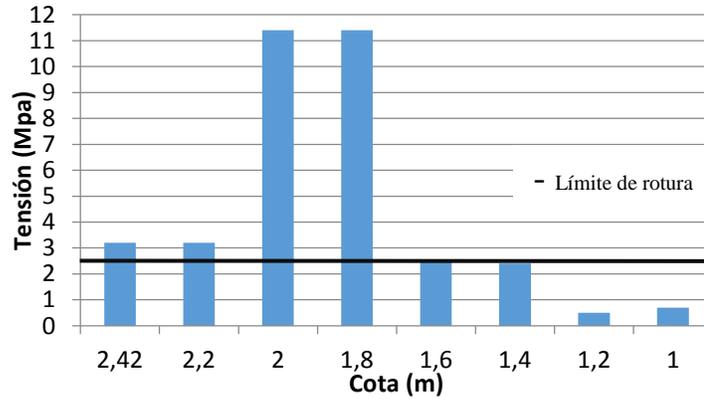


Fig. 3.15 Gráfico de tensiones eje Y.

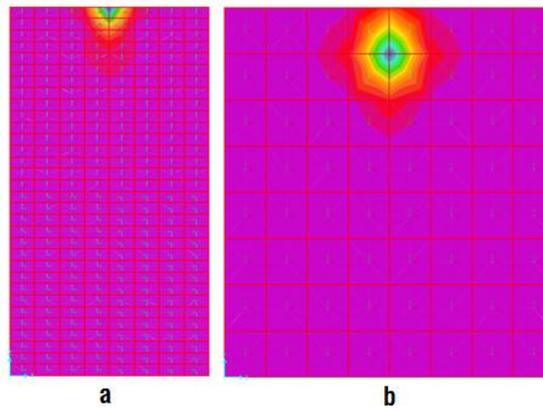


Fig. 3.16 Representación gráfica de las tensiones críticas producto a cargas dinámicas.

En la figura 3.16 a se muestran los resultados extraídos para la zona más crítica en el plano XZ y en la figura 3.16 b se muestran los resultados para la zona más crítica en el plano XY.

3.3. Análisis de frecuencias.

A continuación se muestran los valores de frecuencia natural de la estructura donde en el modo 1 se acerca considerablemente a la frecuencia de excitación (10 Hz) y por tanto al fenómeno de resonancia lo que trae consigo daños considerables a la estructura.

Tabla 3.6. Análisis de frecuencia.

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,075077	13,31966481	83,68992226	7004,003088
MODAL	Mode	2	0,074321	13,45509568	84,54085951	7147,156926
MODAL	Mode	3	0,039061	25,60092894	160,8553806	25874,45347
MODAL	Mode	4	0,029011	34,47009582	216,5819996	46907,76255
MODAL	Mode	5	0,022442	44,56017599	279,979843	78388,71251
MODAL	Mode	6	0,02084	47,98498315	301,4985411	90901,37027

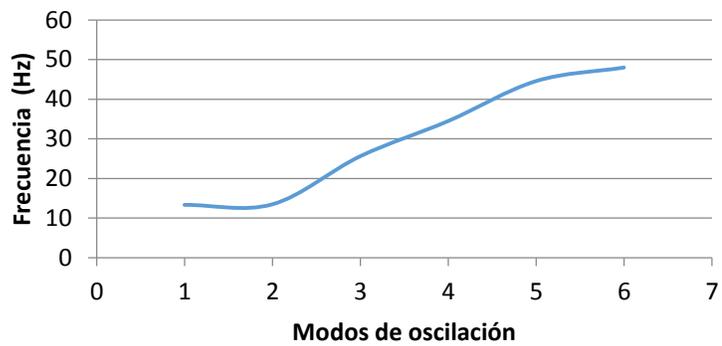


Fig. 3.17 Frecuencia de oscilación.

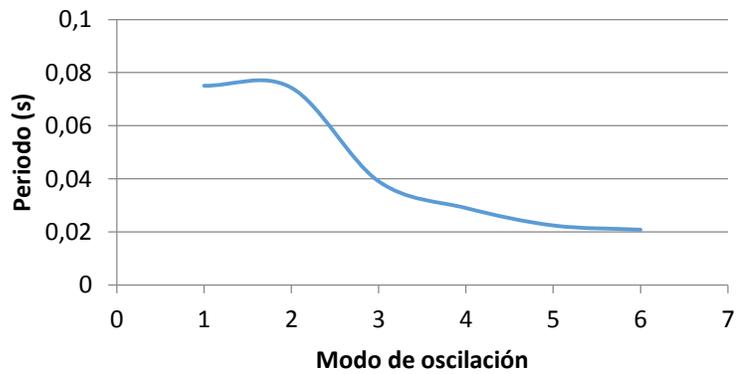


Fig. 3.18 Periodo de oscilación.

Conclusiones parciales.

- Los esfuerzos generados por las cargas estáticas no provocan grandes sollicitaciones en la estructura
- Las cargas dinámicas generan valores críticos de tensiones lo que las hace desfavorable para este tipo de estructura, de aquí la importancia de tenerlas en cuenta a la hora del diseño
- A partir de que la operación del motor llega a 120 rpm (2 Hz) la base comienza a presentar problemas producto a que las tensiones que se generan supera el límite de rotura del hormigón.

CONCLUSIONES

1. Investigaciones realizadas demuestran que en los últimos años se ha profundizado en el estudio de la incidencia de las vibraciones provocadas por maquinarias en las bases de hormigón
2. El empleo de modelos numéricos es una potente herramienta para el desarrollo de investigaciones relacionadas con el diseño y evaluación de las bases para maquinarias, demostrándose que el software SAP2000 es una herramienta útil para el análisis y entendimiento del comportamiento estructural de dichos elementos, gracias a su versatilidad, variación de parámetros y su fácil simulación
3. El empleo de la modelación a nivel empresarial trae consigo notorias ventajas, además de brindar tanto a proyectistas como ingenieros información del comportamiento de objetos de forma complicada bajo la acción de cargas inimaginables, permite identificar y previamente erradicar problemas de diseño antes de fabricar un prototipo
4. A partir de la modelación realizada se define que el análisis dinámico genera sollicitaciones más desfavorables para este tipo de estructura que el análisis estático
5. A partir de 120 rpm (2 Hz) las tensiones comienzan a superar las tensiones de rotura del hormigón pero solo superficialmente, no es hasta que la frecuencia llega a 240 rpm (4 Hz) que las tensiones superan los límites a profundidades mayores por tanto se concluye que las bases no están aptas para soportar frecuencias mayores.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a la directiva del central Mario Muñoz Monroy la colocación de elementos amortiguadores entre la base y la máquina con el objetivo de disipar energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRILL, D., HAYBOE, G. & LEE, X. 1997. *Three-Dimensional Finite Element Modeling of Rigid Pavement Structures, Aircraft Pavement Technology*.
- CHATTI, K., LYSMER, J. & MONISMITH, C. 1994. *Dynamic Finite-Element Analysis of Jointed Concrete Pavements*.
- FERRÁNDEZ, M. D. 2016. *Estudio de la transmisión de vibraciones por impacto en las losas de hormigón y mortero*. Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid.
- GARCÍA, I. J. 2016 *Modelación numérica de pisos industriales en concreto rígido*., Universidad de Matanzas sede Camilo Cienfuegos.
- GARCÍA, J. 2015. *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba*. doctor, Universidad José Antonio Hecheverría.
- HERNÁNDEZ, L. 2014. *Enfoque mecanicista para determinar el número de repeticiones que conducen al fallo por fatiga en pavimentos de hormigón simple*. Master, Universidad Marta Abreu.
- HUANG, Y. & WANG, T. 1973. *Finite Element Analysis of Concrete Slab and its implication for rigid pavement design*, Washington D.C.
- HUANG, Y. H. 1985. *A Computer Package for Structural Analysis of Concrete Pavements, Proceedings*.
- ISYUMOV, N. 2012. Alan G. Davenport's mark on wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106, 12-24.
- KUO, C., HALL, K. & DARTER, M. 1995. *Three-Dimensional Finite Element Model for Analysis of Concrete Pavement Support*. Washington, D.C.
- LÁZARO, I. L. 2015. *Ensayo a escala de edificio de dos alturas sometido a desplazamientos horizontales*. Máster.
- RAO, S. S. 2012. *Vibraciones Mecánicas*, México.
- RE CAREY, C. 1999. *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo*. Doctor, Universidad Marta Abreu.
- REYES, I. M. 2009. *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”

- RODRIGUEZ, A. 1991. *Análisis de vibraciones en cimentaciones para maquinarias.* , Colombia.
- TABATABAIE, A. & BARENBERG, E. 1980. Structural analysis of concrete pavement systems. 106.
- ZETINA, I. J. 2011. *Diseño práctico de cimentaciones sujetas a vibración producida por maquinaria.*

ANEXOS

Anexo 1 bases de hormigón para eje de cuchilla No 1.



Anexo 2 Conjunto del eje de la cuchilla picadora de caña sin los machetes.



Anexo 3 Machetes.

