

MANUAL PARA DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS VIBRATORIOS

FREDY ALFONSO HERRERA CASTIBLANCO



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2017

MANUAL PARA DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS VIBRATORIOS

Presentado por:

FREDY ALFONSO HERRERA CASTIBLANCO

PROYECTO DE GRADO

Directora y Coautora:

Ing. NANCY TORRES CASTELLANOS

Codirector:

Ing. PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA**

2017

Bogotá D.C., febrero 14 de 2017

Señor:

Ing. GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

Director Programa de Maestría en Ingeniería civil

Escuela Colombiana de Ingeniería

Ciudad

Ref.: Proyecto de Grado

Apreciado Ingeniero:

Por medio del siguiente documento me permito presentar el informe final del Proyecto de Grado del aspirante al título de Magíster en Estructuras, Fredy Alfonso Herrera Castiblanco con C.C. 1.014.182.479 de Bogotá, D.C., denominado "MANUAL PARA DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS VIBRATORIOS", que fue dirigido por la Ing. Nancy Torres Castellanos.

Atentamente,

Ing. Fredy Alfonso Herrera Castiblanco

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El Proyecto de Grado denominado “MANUAL PARA DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS VIBRATORIOS” presentado por el Ing. Fredy Alfonso Herrera Castiblanco para optar al Título de Magíster en Ingeniería Civil con Énfasis en Estructuras otorgado por la Escuela Colombiana de Ingeniería, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Ing. Nancy Torres Castellanos
Directora de Proyecto

Ing. Germán Ricardo Santos Granados
Director de Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá D.C., febrero 14 de 2017.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi novia Julianie, mis padres Clara y José, mi hermana Nelly, que se ha adelantado a la aventura más maravillosa de todas, y mis sobrinos Karen e Isaac, porque dan razón de ser no solo a este proyecto personal, sino a todos y cada uno de los retos que emprendo día a día. Gracias por formar mi carácter y creer en mis sueños; no los defraudaré.

Gracias a FH Ingeniería S.A.S., HL Ingenieros S.A. y Pedelta Colombia S.A.S. por permitirme evolucionar tanto laboral como académicamente y apoyarme en este proceso.

Gracias a Fercho y los muchachos por los buenos momentos. Gracias también a todos aquellos magníficos seres humanos que han aportado a mi crecimiento profesional y personal, y que directa o indirectamente hacen parte de este producto. Quisiera nombrarlos a todos, pero sé que el aprecio y el cariño mutuo hablan por sí solos.

Gracias en especial a la Ingeniera Nancy y al Ingeniero Pedro Nel por sus acertados comentarios y por la persistencia para el desarrollo conjunto de este trabajo. Gracias también a los ingenieros Andrés Muñoz y Andrés Espitia por su colaboración en la edición del documento. Ha sido muy agradable trabajar junto a grandes profesionales como lo son todos ustedes.

CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
GENERALIDADES	9
Introducción.....	9
Estado del arte	10
OBJETIVOS	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
ALCANCE.....	16
CONTENIDO	17
Capítulo 1. Generalidades	17
Capítulo 2. Tipos De Equipos Dinámicos, Información Y Requerimientos.....	17
Capítulo 3. Tipos De Fundaciones Para Equipos Dinámicos	19
Capítulo 4. Fundamentos Teóricos	21
Capítulo 5. Parámetros De Diseño	22
Capítulo 6. Consideraciones De Análisis y Diseño.....	22
Capítulo 7. Ejemplos De Diseño	23
Capítulo 8. Recomendaciones De Construcción Y Reparación	23
Capítulo 9. Documentos De Referencia	24
Capítulo 10. Trabajos citados	24

MANUAL PARA DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS VIBRATORIOS

FREDY ALFONSO HERRERA CASTIBLANCO

RESUMEN

Dado que los equipos vibratorios son de uso común en los complejos industriales en general, el conocimiento del diseño de fundaciones o estructuras que permitan soportar este tipo de máquinas es clave para el desempeño profesional del ingeniero estructural. Considerando que dentro del plan básico de estudios del diseñador estructural no se incluye la enseñanza de fundaciones que actúan bajo cargas dinámicas de estas características, se han elaborado las recomendaciones presentes en este libro con el fin de que, al aplicarlas, el ingeniero minimice fallas que pueden ser costosas e incluso lamentables.

A lo largo del documento se presentan criterios generales de aplicación y cálculos específicos para cada situación, los cuales permitirán al ingeniero obtener como resultado cimientos seguros y eficientes, cuyos comportamientos se mantengan dentro de los límites consignados en numerosos y reconocidos documentos especializados. Dichos criterios se complementan con una serie de ejemplos de aplicación presentados de manera clara y ordenada, que permitirán al lector entender fácilmente el proceso de análisis realizado.

Palabras clave:

Amortiguamiento, Amplitud, Cimentaciones, Equipos, Resonancia, Vibraciones.

ABSTRACT

Since vibratory equipment is commonly used in industrial complexes in general, knowledge of the design of foundations or structures that support these types of machines is key to the professional performance of the structural engineer. Considering that within the basic plan of studies of the structural designer does not include the teaching of foundations acting under dynamic loads of these characteristics, the recommendations presented in this book have been elaborated so that, when applied, the engineer minimizes faults that can be costly and even regrettable.

Throughout the document resulting from this work, general criteria of application and specific calculations for each situation are presented, which will allow the engineer to obtain as a result safe and efficient foundations, whose behaviors are kept within the limits recorded in numerous and recognized specialized documents. These criteria are complemented by a series of application examples presented in a clear and orderly manner, which will allow the reader to easily understand the process of analysis performed.

Key words:

Amplitude, Damping, Equipment, Foundations, Resonance, Vibrations.

GENERALIDADES

Introducción

Gran parte de los efectos en las fundaciones producidos por las vibraciones de equipos que se apoyan directamente sobre ellas son indeseables por el incremento de los esfuerzos en el suelo, la cimentación misma y los elementos cercanos, siendo necesario eliminarlas o al menos reducirlas con base en un dimensionamiento adecuado. Esto cobra importancia si se considera que con el paso del tiempo las industrias requerirán máquinas de mayor velocidad y soluciones de fundación igualmente adecuadas.

La dificultad para comprender la dinámica del sistema equipo-fundación-suelo, motivó a que en el pasado se usaran métodos simples de cálculo para diseñar la cimentación, como el de amplificación de la carga estática por un valor usualmente alto obtenido empíricamente, pero esto imposibilitaba conocer el factor de seguridad real al que se encontraba trabajando la estructura. Lamentablemente, incluso usando amplificaciones excesivas para las cargas verticales estáticas, se encontraron deformaciones perjudiciales en las fundaciones que paulatinamente llevaron a que se estudiara el tema de manera más detallada, más aún cuando se desarrollaron equipos con velocidades y capacidades cada vez más grandes, que causaron por supuesto esfuerzos mayores y por consiguiente dificultades en relación con el desempeño y la seguridad (Bhatia, 2008). Esto llevó a que también se ampliaran los conocimientos de la mecánica de suelos.

Con base en resultados de numerosas investigaciones, se ha logrado demostrar por qué no es suficiente basar el dimensionamiento y diseño del cimiento solo en cargas verticales amplificadas por un factor dinámico. Esto es importante, dado que las cargas horizontales generadas son de gran magnitud y no proporcionales a las verticales, de manera que debe realizarse un análisis de las vibraciones atendiendo los criterios anteriores, donde se analice el mecanismo de transferencia de carga del equipo a la cimentación, las fuerzas dinámicas y las frecuencias relacionadas. El diseño de fundaciones para equipos vibratorios requiere entonces un balance adecuado entre numerosos factores. Se debe hacer uso de una teoría que permita considerarlos y que impida que se generen sobreesfuerzos en cualquiera de los elementos presentes en el sistema constituido por la cimentación, el equipo dispuesto sobre ella y el suelo de fundación, a través de los lineamientos básicos del análisis dinámico, de manera tal que no se produzca resonancia o que la amplitud de la vibración del cimiento no sobrepase los límites definidos por el fabricante de la máquina. Los mencionados criterios son abordados en este documento, con el fin de proporcionar herramientas prácticas para su análisis y diseño.

La experiencia ha permitido desarrollar fundaciones con geometrías típicas para soportar diferentes tipos de equipos, las cuales se definen en el Capítulo 3. Sin embargo, se recomienda considerar con atención los puntos de vista de fabricantes, instaladores y

operarios del equipo, así como de constructores y otros diseñadores del proyecto, quienes por su experiencia pueden sugerir alternativas, llevando al diseñador a basarse en la teoría presentada en este documento para usar su ingenio en una nueva solución. Todo tipo de cimentaciones para equipos vibratorios, sea cual sea el tamaño y tipo de máquina, debe analizarse como un problema de ingeniería, considerando siempre las prácticas actuales.

El presente trabajo se divide en diez capítulos. En el primer capítulo se da una pequeña introducción y estado del arte del diseño de cimentaciones para equipos vibratorios, repasando los principales documentos que han permitido alcanzar el nivel técnico actual. También se definen los términos de uso más general que se consignan a lo largo del documento. En los Capítulos 2 y 3 se ilustran los distintos tipos de equipos a cimentar y las principales soluciones de fundación planteadas a través de la experiencia de las distintas industrias, lo que conlleva a que en el Capítulo 5 se expongan los parámetros de dimensionamiento y diseño más importantes para la adaptación de dichas soluciones. En los Capítulos 4 y 6 se desarrolla la teoría matemática desde el punto de vista de la dinámica estructural, y se resuelve la problemática generada por la vibración de los equipos estudiados. En el Capítulo 7 se presentan ejemplos de aplicación que permiten resolver una amplia gama de dudas típicas del dimensionamiento y diseño de este tipo de fundaciones. En este capítulo también se presentan ejemplos para los casos en los que se hace más práctico realizar el dimensionamiento y diseño a partir de una cadena de formulaciones, sin que sea necesaria la modelación matemática. Como resumen de la experiencia de numerosos autores en lo que a la construcción de cimentaciones para equipos vibratorios se refiere, en el Capítulo 8 se sugieren procesos y consideraciones constructivas que han resultado exitosas en trabajos realizados. En el Capítulo 9 se enlistan los documentos institucionales usados como referencia del presente trabajo, mientras que en el Capítulo 10 se indican los ensayos, artículos, libros y trabajos de numerosos autores que se citaron a lo largo de este documento.

Estado del arte

Con base en los completos trabajos de Bhatia (2008) y Roesset (2009), se establece el estado del arte y panorama actual del estudio del diseño de fundaciones para máquinas vibratorias.

Desde alrededor de 1920 ya se conocía la problemática generada por el diseño de cimentaciones para equipos con cargas vibratorias. Geiger (1927) adelantó investigaciones para determinar la frecuencia natural de las fundaciones, mientras que se dio un gran adelanto de la ciencia tanto en la teoría como en la práctica por medio del trabajo de Rausch, quien investigó los cimientos para máquinas (1926) y turbinas (1924). Por su parte, Timoshenko (1928) y Den Hartog (1934) trataron con gran cantidad de problemas prácticos.

Ya en los años treinta del siglo veinte, Eric Reissner (1936) logró derivar la primera solución de carácter analítico para el desplazamiento vertical en la superficie de un espacio semi-infinito homogéneo, isotrópico y elástico sometido a un esfuerzo normal armónico, uniformemente distribuido sobre un área circular, para lo que obtuvo como resultado desplazamientos variables en dicha área, tomando como valor representativo el obtenido en el centro del área cargada. Posteriormente a la solución para el caso vertical, de manera casi inmediata, se dio la solución para el caso de vibraciones torsionales.

En los años siguientes, Reissner y Sagoci (1944) y Shekhter (1948) continuaron en esta misma línea de trabajo y usaron el promedio de los desplazamientos tanto en el centro como en los bordes del área cargada para obtener las curvas de la amplificación dinámica como una función de la frecuencia y la relación de masas adimensionales.

Cerca de los años cincuenta se incrementaron las publicaciones relacionadas por un gran número de autores, dentro de los que se desatacan Wilson (1942), Sung (1953), Quinlan (1953), Pauw (1953), Arnold & Warburton (1955) y Bycroft (1956; 1959), con valiosos aportes. Con el fin de evaluar los efectos de la simplificación como fundación circular, Quinlan y Sung consideraron distribuciones de esfuerzos distintas. Bycroft por su parte representó el amortiguamiento interno del suelo y así mismo estudió otros tipos de movimientos. Warburton trabajó bajo la consideración de la respuesta para un caso de gran importancia práctica, como el de una cimentación rígida sobre un estrato de suelo isotrópico, homogéneo y elástico de ancho finito, que a su vez se apoya en una roca mucho más rígida (en contraste con el caso del semi-espacio), encontrando diferencias marcadas en la solución, ya que no solo la rigidez estática del cimiento debería ser mayor, sino que también la capa de suelo tendría su propia frecuencia natural, conllevando a variaciones de la rigidez con la frecuencia (la rigidez puede llegar a ser cero en la frecuencia de resonancia sin amortiguamiento interno) y a una falta de radiación por debajo de una frecuencia umbral.

Ya en los años sesenta Jacobsen (1958), Norris (1959), Harris & Crede (1961), Borodatchev (1964), Lysmer (1966), Sigalov (1966), Whitman (1967; 1969; 1969) y Elourdy (1969), realizaron estudios adicionales, destacándose el trabajo en inglés de Barkan (1962), *Dynamics of Bases and Foundations*, que hasta el momento había sido publicado en alemán y en ruso desde 1948. Otro gran aporte al estudio de cimentaciones para máquinas vibratorias fue el Alexander Major (1962), con su libro, escrito originalmente en húngaro, *Vibrations analysis and design of foundations for machines and turbines*.

En 1964 Borodatchev dirigió un estudio para hallar la solución al caso vertical del problema condición de frontera mixta, donde se fijan los esfuerzos a lo largo de la superficie de suelo, fuera del área de la fundación (superficie libre de esfuerzo) mientras que los desplazamientos son impuestos en la base de un cuerpo rígido sin masa. Grootenhuis y Awojobi (1965) presentaron una alternativa de solución gráfica a este problema, mientras que Lysmer aportó la solución numérica. Sigalov continuó el trabajo de Borodatchev para

vibraciones rotacionales. Robertson (1966) usó una formulación basándose en un desarrollo en serie que luego extendió Gladwell (1968). Veletsos y Wei (1971) desarrollaron en forma tanto gráfica como tabular para un gran rango de frecuencias, la solución rigurosa de la rigidez dinámica de una cimentación circular rígida sin masa sobre una superficie de un semi-espacio isotrópico, homogéneo y lineal elástico. Esta solución se dio a lugar casi al mismo tiempo con la solución independiente publicada por Luco y Westmann (1971). Veletsos y Verbič (1973) presentaron posteriormente los resultados adicionales para las vibraciones verticales y torsionales de un medio viscoelástico o histerético. Este amplio espectro de soluciones ha contribuido enormemente con el entendimiento del comportamiento de fundaciones sometidas a cargas dinámicas para casos en los que la vibración tiene una amplitud baja.

En la actualidad, son pocos los suelos que pueden ser considerados como semi-espacios homogéneos e isotrópicos, dado que el módulo elástico del suelo varía generalmente con la profundidad, y existen rocas muy rígidas a poca profundidad. Progresivamente se dieron de manera inmediata soluciones para fundaciones apoyadas directamente sobre la superficie o embebidas en un suelo estratificado en capas horizontales, gracias tanto al uso de computadores como al desarrollo de nuevas formulaciones discretas (diferencias finitas, elementos finitos y elementos de borde). Waas (1972), Chang-Liang (1974), Kausel (1974), Luco (1983) y Domínguez (1978) fueron quienes desarrollaron estas teorías. Novak y Beredugo (1972), Kausel (1974) y Elsabee (1977) estudiaron el caso de cimentaciones circulares parcialmente embebidas en un suelo estratificado, asumiendo unión perfecta entre las paredes laterales y el suelo circundante, y sugirieron fórmulas aproximadas para este caso. Novak (1974), Novak & Nogami (1977), Blaney (1976), Kaynia & Kausel (1982) y Gómez (1984) continuaron con el estudio de la rigidez dinámica de pilotes simples y grupos de pilotes (asumiendo nuevamente comportamiento del suelo lineal elástico y unión perfecta entre el pilote y el suelo). Dadas estas circunstancias, a finales de los 70 del siglo pasado se logró calcular la rigidez dinámica de cimientos de diversas geometrías, apoyados sobre depósitos de suelos estratificados horizontalmente, con un grado de exactitud tan grande como lo permitían las suposiciones de comportamiento lineal elástico del suelo y contacto perfecto entre la fundación y el suelo circundante (para vibraciones con bajas amplitudes, como podría esperarse de cimentaciones de máquinas diseñadas correctamente). Por otra parte, las zapatas han recibido mucha menos atención, y los pocos estudios desarrollados han dejado de lado la interacción a través del suelo entre éstas y las fundaciones para equipos vibratorios, haciendo que los resultados sean inciertos, incluso a pesar de que Warburton, Richardson y González (1977) realizaron estudios para la interacción entre dos cimientos vecinos, a finales de los sesenta y setenta.

Mientras desarrollaba sus formulaciones analíticas, Reissner exploró la posibilidad de reproducir sus resultados con un modelo de lo que se conoce como parámetros agrupados, que consistía básicamente en una masa, un resorte y un amortiguador, concluyendo que sus valores tendrían que ser funciones de la frecuencia, pero no encontró expresiones

simples para ellos. Otros investigadores llegaron a las mismas conclusiones intentando igualar sus datos experimentales con modelos simples. Shekhter por su parte, encontró que los resultados para las funciones de amplificación en términos de una relación de masas y una frecuencia adimensional, podrían ser razonablemente aproximados por un sistema masa-resorte-amortiguador. Merritt & Housner (1954) sustituyeron la fundación por un resorte rotacional en su estudio de interacción suelo estructura, y Lycan & Newmark (1961) reemplazaron la cimentación por una masa libre. Fleming, Screwvala & Kodner (1965) usaron resortes horizontales y rotacionales para simular los efectos de interacción en los casos en los que el suelo se mueve y en los que no. Lysmer & Richart (1966), Whitman y Richart (1967), Hall (1968) y Whitman (1969), usaron nuevamente modelos de parámetros agrupados con resortes, masas y amortiguadores.

La variación de los términos de la rigidez, para frecuencias adimensionales pequeñas, parecía reproducirse razonablemente por medio de una masa constante, un resorte y un amortiguador, lo que llevó al concepto de una masa adicionada de suelo vibrando en fase con la fundación. A pesar de que este concepto fue ampliamente usado, Meek y Veletsos (1973) lograron demostrar que esto no es correcto, ya que, al obtener las características dinámicas de los suelos por medio de un cono truncado, notaron que los modelos de parámetros agrupados deben tener términos dependientes de la frecuencia. Posteriormente, Veletsos y Wei y Veletsos y Verbič desarrollaron expresiones aproximadas y muy precisas para los términos de la rigidez de la cimentación de una base circular rígida sobre la superficie de un semi-espacio isotrópico, homogéneo y elástico, como una función de la frecuencia adimensional. Estas últimas formulaciones son usadas aún hoy en día para el análisis de cimientos de equipos vibratorios.

Al día de hoy, todas las teorías usadas trabajan con la hipótesis de que el suelo es un espacio semi-infinito homogéneo, isotrópico y elástico, llamado simplemente semi-espacio elástico, que para determinar sus propiedades mecánicas será estudiado a la luz de las ecuaciones deducidas. Como se indicó en la introducción, investigaciones científicas demuestran que no es suficiente multiplicar las cargas verticales por un factor dinámico, incluso si este factor genera un valor de carga dinámica varias veces más grande que la original; igualmente debe tenerse en cuenta que la operación de las máquinas no sólo produce fuerzas verticales, sino también fuerzas que actúan en dirección perpendicular a los ejes.

La geometría de la fundación depende de las fuerzas dinámicas actuantes, las cuales varían con la velocidad de la máquina y a vez dependen de la frecuencia natural de la base. Lo anterior hace imprescindible un completo análisis de vibraciones, a través del cual se asegure un comportamiento adecuado del equipo y sus componentes. Para la evaluación del comportamiento del equipo se debe tener un conocimiento muy preciso del mecanismo de transferencia de carga de éste hacia la cimentación, así como de las fuerzas de vibración y las frecuencias asociadas.

Sumado a la evolución de la formulación teórica del problema de la interacción suelo-estructura, el dimensionamiento y diseño de las fundaciones de equipos vibratorios ha progresado gracias a los constantes avances en la tecnología del concreto, lo cual ha permitido que volúmenes de concreto equivalente a los usados en el pasado, tengan ahora un mejor comportamiento debido al aumento de su rigidez. También, con el fin de reducir las vibraciones actuantes en la base, en la actualidad se han desarrollado sistemas de aislamiento que permiten disipar la respuesta dinámica de la cimentación, reduciendo la transmisibilidad hacia y desde ella. Por otra parte, a pesar de los rangos de variación inherentes a los resultados de los análisis sobre los ensayos a los materiales de los suelos de fundación, éstos son muy sofisticados, lo que aumenta la confiabilidad en los resultados consignados en el estudio geotécnico.

Dada la presencia actual en el mercado de numerosos softwares, es posible acudir al análisis por medio de elementos finitos para realizar el diseño de fundaciones de equipos vibratorios. La modelación puede llevarse a cabo para un sistema en dos o tres dimensiones, con la cantidad de grados de libertad, criterios y variables generales de análisis que representen lo más precisamente posible las condiciones de la estructura. Todas las distintas variables a considerar deben ser conocidas, cuidadosamente calculadas o evaluadas por los ensayos de los materiales involucrados en el diseño.

Este documento pretende reunir los principales criterios que se manejan en la actualidad para el dimensionamiento y diseño de cimentaciones para equipos vibratorios, de manera que se hará uso de la documentación actual de carácter público, y de la información privada a la cual se tendrá acceso, facilitando al lector el conocimiento de dichas fuentes, según sea el caso.

OBJETIVOS

Objetivo general

Presentar sintéticamente los criterios y formulación teórica desarrollados a la fecha para el diseño y construcción de distintos tipos de cimentaciones para equipos vibratorios, con base en estudios adelantados en todo el mundo.

Objetivos específicos

- Indicar los principales tipos de fundaciones usados para cimentar máquinas vibratorias, así como los tipos de equipos para los que se realizan este tipo de análisis y diseños (Capítulos 2 y 3).
- Explicar las bases teóricas de las vibraciones libres y forzadas (Capítulo 4), las cuales son el fundamento del cálculo de las acciones de los equipos dinámicos sobre las fundaciones (Capítulo 5).
- Enseñar los principales métodos de dimensionamiento y diseño de cimentaciones para equipos vibratorios, con base en la teoría de vibración libre y forzada (Capítulo 6).
- Mostrar el cálculo detallado de fundaciones para equipos vibratorios para casos reales (Capítulo 7).
- Exponer las características constructivas más importantes a tener en cuenta durante la etapa de construcción de las cimentaciones para equipos vibratorios (Capítulo 8).
- Presentar la bibliografía relacionada con el tema de estudio (Capítulos 9 y 10), de carácter nacional e internacional.
- Establecer el espectro de aplicación de los diseños expuestos en las normas ACI 351 y API 686 en Colombia.

ALCANCE

Este documento presenta las principales recomendaciones para análisis y diseño de cimentaciones para equipos vibratorios, dentro de los que se encuentran equipos centrífugos o rotatorios, reciprocantes y de generación o de impacto. Se presenta una implementación práctica de diseño de estas fundaciones enfocada a oficinas de diseño, por medio del uso de uso de hojas de cálculo. Se prioriza que tanto la terminología como los criterios mostrados faciliten la total aplicabilidad de este documento en el territorio colombiano, basándose a su vez en el *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente*, NSR-10, según corresponda.

CONTENIDO

El documento se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Generalidades

Este capítulo presenta los siguientes temas de ámbito general:

- Introducción: Visión general del estudio de cimentaciones de equipos vibratorios, y presentación de los distintos capítulos del documento.
- Estado del arte: Resumen de los adelantos más representativos en relación con el diseño de fundaciones para equipos vibratorios.
- Nomenclatura: Listado de todas las variables usadas a lo largo del documento.
- Definiciones: Se especifican todos los conceptos clave del documento.

Capítulo 2. Tipos De Equipos Dinámicos, Información Y Requerimientos

En este capítulo se muestran los equipos de acuerdo con la manera en la que ejercen las fuerzas actuantes. Dentro de los principales equipos trabajados, se encuentran los siguientes (los consecutivos de las Figuras corresponden a los usados en el documento de tesis):

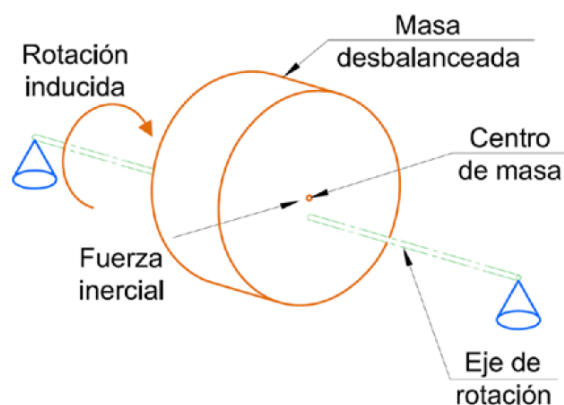


Figura 2-1 — Fuerza desbalanceada de equipos centrífugos

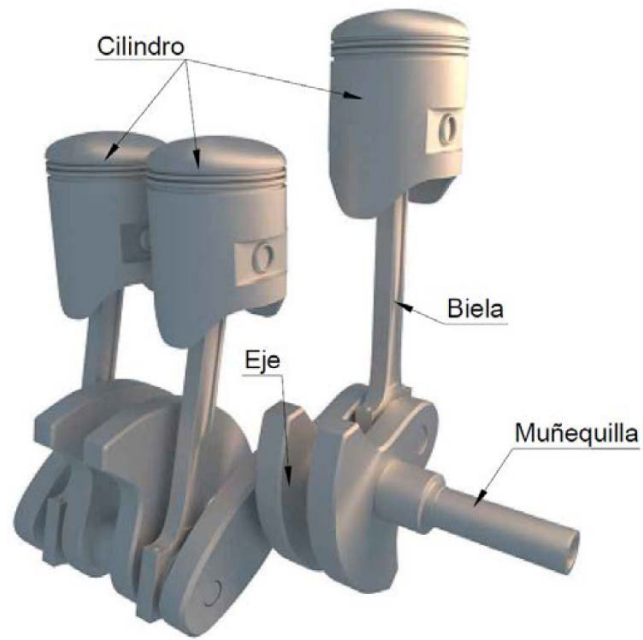


Figura 2-3 — Cigüeñal típico de equipos recíprocos

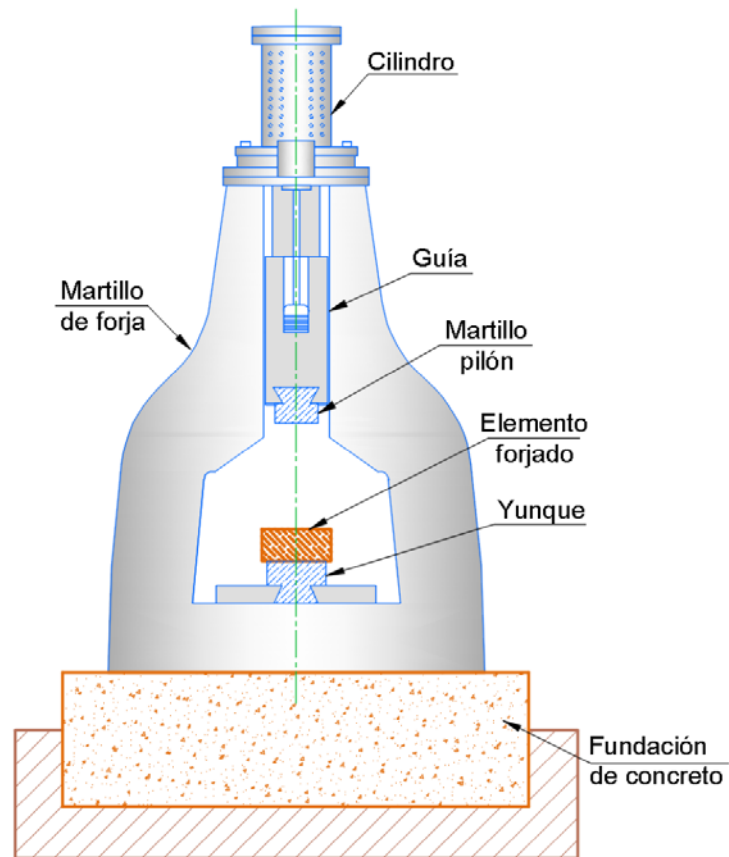


Figura 2-5 — Efecto de equipo de impacto

Capítulo 3. Tipos De Fundaciones Para Equipos Dinámicos

Se detallan las características principales de los distintos tipos de fundaciones existentes:

- Fundación tipo bloque.
- Fundación tipo bloque combinado.
- Fundación tipo pórtico.
- Fundación sobre pilotes.
- Fundaciones de concreto presforzado.

A continuación, se muestran algunas Figuras de ejemplo:

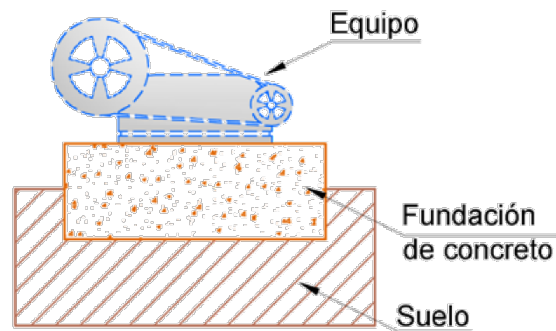


Figura 3-1 — Fundación tipo bloque

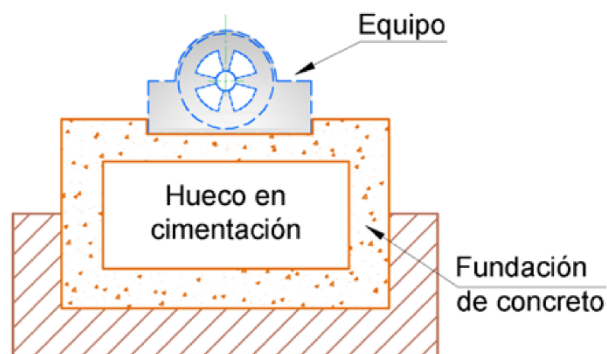


Figura 3-2 — Fundación tipo bloque en forma de cajón

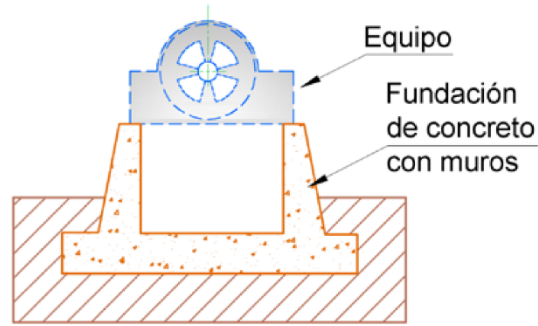


Figura 3-3 — Fundación tipo bloque con muros

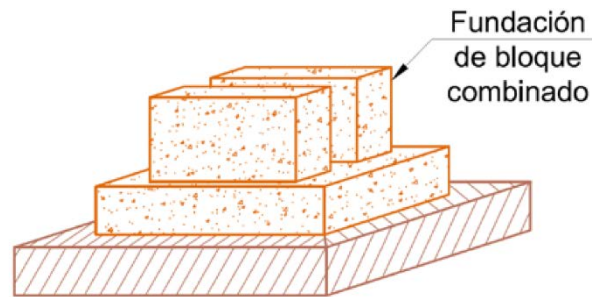


Figura 3-4 — Fundación tipo bloque combinado

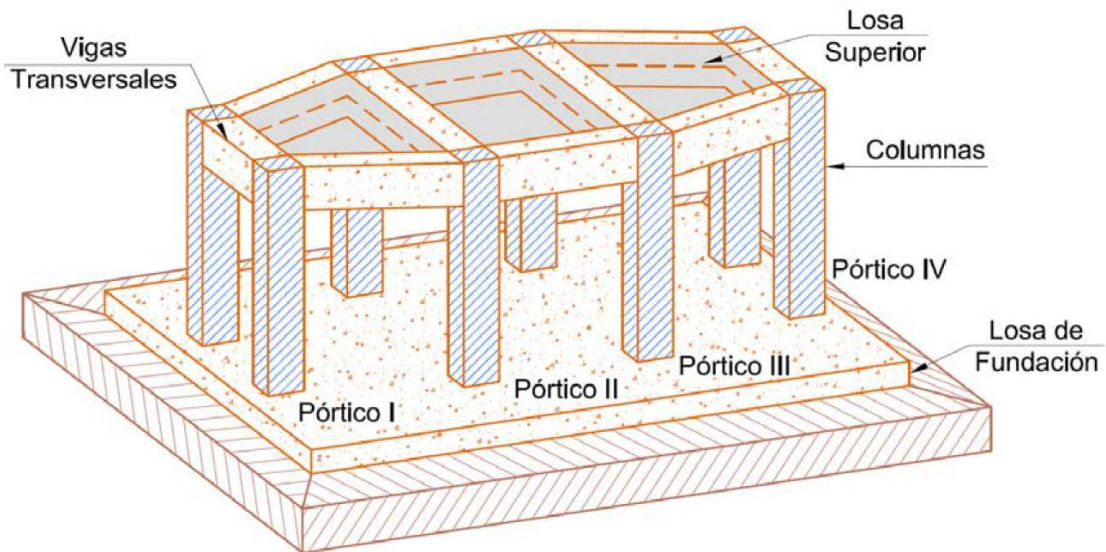


Figura 3-5 — Fundación tipo pórtico

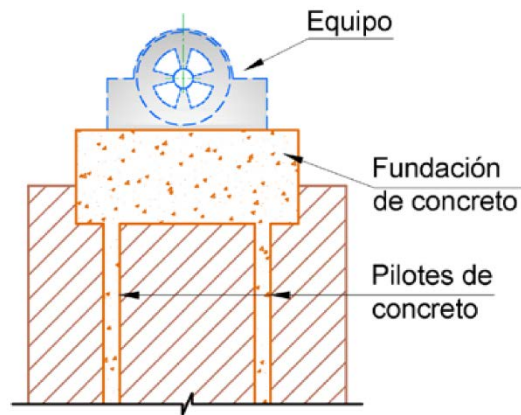


Figura 3-8 — Fundación tipo bloque apoyada sobre pilotes

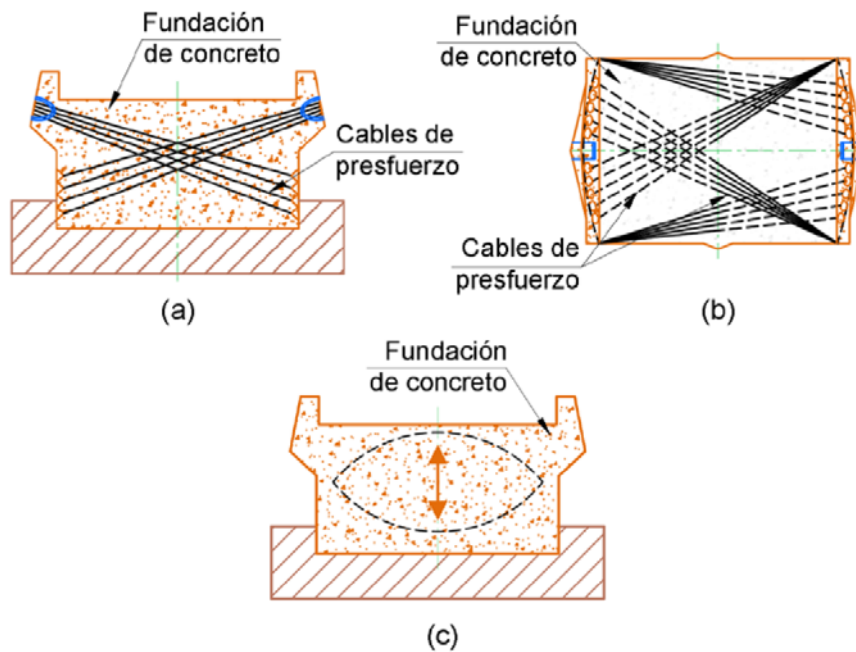


Figura 3-9 — Concreto presfuerzo (a) alzado con disposición de cables (b) planta con disposición de cables (c) esfuerzos internos de compresión resultantes en la fundación

Capítulo 4. Fundamentos Teóricos

Se presentan los fundamentos de dinámica estructural aplicables posteriormente al cálculo de los parámetros de análisis de las fundaciones. Se subdivide así:

- Dinámica.
- Grados de libertad.

- Vibración mecánica.
- Rigidez.
- Amortiguamiento.
- Momentos de inercia de formas comunes.
- Sistemas de un grado de libertad.
- Sistemas de varios grados de libertad.

Capítulo 5. Parámetros De Diseño

En este capítulo se consideran las características principales de diversos factores como cargas, materiales y suelo:

- Requisitos generales.
- Cargas actuantes.
- Condiciones y combinaciones de carga.
- Materiales y características de los elementos de la fundación.
- Parámetros dinámicos del suelo.
- Excentricidad de la fundación.
- Sintonización de la fundación.
- Separación a estructuras adyacentes.
- Efectos adicionales a considerar.

Capítulo 6. Consideraciones De Análisis y Diseño

Este capítulo muestra los requerimientos generales de diseño de las cimentaciones, y la formulación principal a usar:

- Métodos de análisis.

- Impedancia del medio de soporte.
- Análisis dinámico de fundaciones.
- Límites de vibración en el análisis de fundaciones de equipos vibratorios.
- Diseño estructural de fundaciones.

Capítulo 7. Ejemplos De Diseño

Se presentan los ejemplos realizados por medio de hoja de cálculo de Microsoft Excel. Los ejemplos trabajados son los siguientes:

- Cálculo de rigidez y constante de amortiguamiento usando los modelos de Veletsos y Richart-Whitman.
- Fundación tipo bloque para equipo rotatorio.
- Fundación tipo pórtico para equipo rotatorio.
- Fundación tipo pórtico para compresor recíprocante.
- Fundación tipo bloque para martillo de forja.
- Fundación tipo bloque para equipo que produce cargas de impulso aplicadas a intervalos repetitivos.
- Fundación tipo bloque para equipo que produce carga impulsiva rectangular de larga duración.
- Fundación tipo bloque para equipo que produce carga impulsiva de seno medio de larga duración.
- Fundación tipo bloque para equipo que produce carga impulsiva triangular de larga duración.

Capítulo 8. Recomendaciones De Construcción Y Reparación

Se dan recomendaciones constructivas que abarcan desde el terreno de fundación de la estructura hasta la puesta en marcha del equipo:

- Recomendaciones generales.

- Preparación y mejoramiento del terreno.
- Formaletas y apuntalamientos.
- Detallado del concreto.
- Particularidades de los concretos masivos.
- Detallado del refuerzo.
- Juntas de construcción.
- Juntas de dilatación.
- Protección de bordes y unión con elementos no estructurales aledaños.
- Placa de fijación y pernos de anclaje.
- Grouting.
- Instalación y ajuste del equipo.
- Consideraciones para sintonización de fundaciones en operación.
- Reparación de fundaciones.
- Control de calidad.

Capítulo 9. Documentos De Referencia

Esta sección indica los documentos más relacionados, emitidos por reconocidas entidades de carácter nacional e internacional, como ACI, AISC, API, ASTM, AIS, DIN, FEMA, ISO, entre otros.

Capítulo 10. Trabajos citados

Esta sección resume los trabajos citados a lo largo del documento. Principalmente se trata de bibliografía internacional, abarcando desde comienzos del siglo XX hasta la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, R. N., Bycroft, G. N., & Warburton, G. B. (1955). Forced vibrations of a body on an infinite elastic solid. *Journal of Applied Mechanics*, 391-401.
- Awojobi, A. O., & Grootenhuis, P. (1965). Vibration of rigid bodies on semiinfinite elastic media. *Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 27-63.
- Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of bases and foundations*. Nueva York, Estados Unidos de América: McGraw Hill.
- Bhatia, K. G. (2008). *Foundations for Industrial Machines: Handbook for Practising Engineers*. Nueva Delhi, República de la India: D-CAD Publishers.
- Blaney, G. W., Kausel, E., & Roesset, J. M. (1976). Dynamic Stiffness of Piles. *2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, ASCE*. Blacksburg, Virginia.
- Borodatchev, N. M. (1964). Dynamic Contact Problem for a Rigid Body with a Flat Circular Base Resting on Elastic Half-Space. *USSR Academy of Science, OTN, Mekhanika i mashinostroenie*. Moscú.
- Bycroft, G. N. (1956). *Forced vibrations of a rigid circular plate on a semiinfinite elastic space and on an elastic stratum*. Londres, Inglaterra.
- Bycroft, G. N. (1959). Machine Foundation Vibration. *Civil Engineering, Vol. 173 No. 18*, 469.
- Chang-Liang, V. (1974). *Dynamic response of Structures in Layered Soils*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos de América: Massachusetts Institute of Technology.
- Den Hartog, J. P. (1934). *Mechanical Vibrations*. Nueva York, Estados Unidos de América: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Dominguez, J. (1978). Dynamic Stiffness of Rectangular Foundations. *Research Report R78-20, MIT Dept. of Civil Engineering*.
- Elorduy, J. (1969). Responses of linear systems to certain transient disturbances. *Fourth World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago de Chile.
- Elsabee, F., & Morray, J. P. (1977). Dynamic Behavior of Embedded Foundations. *Research Report R77-33. MIT, Dept. of Civil Engineering*.
- Fleming, J. F., Screwvala, F. N., & Kondner, R. L. (1965). Foundation Superstructure Interaction under Earthquake Motion. *World Conference of Earthquake Engineering*, (págs. 1-22).
- Geiger, J. (1927). *Messung mechanischer Schwingungen*. Berlín, Imperio Alemán.
- Gladwell, G. M. (1968). Forced tangential and rotary vibration of a rigid circular disk on a semiinfinite solid. *International Journal of Engineering Science, Vol 6.*, 591-607.
- Gómez, R. (1984). *Rigidez dinámica de grupos de pilotes bajo cargas laterales armónicas*. México D. F., Estados Unidos Mexicanos: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Gonzalez, J. J. (1977). *Structure-Soil-Structure Interaction*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos de América: Massachusetts Institute of Technology.

- Hall, R. (1968). Coupled Rocking and Sliding Oscillations of Rigid Circular Footings. *Symposium on Wave Propagation and Dynamic Props. Of Earth Materials*. Nuevo México: University of New Mexico.
- Harris, C. M., & Crede, C. E. (1961). *Shock and Vibration Handbook Vol. I, Basic Theory and Measurement*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Jacobsen, L. S., & Ayre, R. S. (1958). *Engineering vibrations: with applications to structures and machinery*. Nueva York, Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- Kausel, E. (1974). *Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos de América: Massachusetts Institute of Technology.
- Kaynia, A. M., & Kausel, E. (1982). Dynamic Behavior of Pile Groups. *2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*. Austin, Texas.
- Luco, J. E., & Apsel, R. J. (1983). On the Green's Functions for a Layered Half Space. *Bulletin of the Seismological Society of America, parts I and II*.
- Luco, J. E., & Westmann, R. (1971). Dynamic response of circular footings. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol 97*.
- Lycan, D., & Newmark, N. M. (1961). Effect of Structure and Foundation Interaction. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 87, 1-32*.
- Lysmer, J., & Richart, F. E. (1966). Dynamic Response of Footing to Vertical Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*.
- Major, A. (1962). *Vibration analysis and design of foundations for machines and turbines: dynamical problems in civil engineering*. Londres, Inglaterra: Collect's Holdings.
- Meek, J. W., & Veletsos, A. S. (1973). Simple Models for Foundations in Lateral and Rocking Motion. *5th World Conference on Earthquake Engineering*. Roma.
- Merritt, R. G., & Housner, G. W. (1954). Effect of Foundation Compliance on Earthquake Stress in Multi-story Buildings. *Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 44, N° 4, 551 – 570*.
- Norris, N. C. (1959). *Structural Design for Dynamic Loads*. Nueva York, Estados Unidos de América: McGraw-Hill Book Co.
- Novak, M. (1974). Dynamic Stiffness and Damping of Piles. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Novak, M., & Beredugo, Y. O. (1972). Vertical vibration of embedded footings. *Journal Of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*.
- Novak, M., & Nogami, T. (1977). Soil Pile Interaction in Horizontal Vibration. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 5, No. 3*.
- Pauw, A. (1953). A Dynamic Analogy for Foundation-Soil Systems. *ASTM Special Technical Publication No.156. Symposiumon Soil Dynamics*, 90-112.
- Quinlan, P. M. (1953). The elastic theory of Soil Dynamic. *Symposium on Dynamic Testing of Soils, ASTM, Sp. Techn. Publicación No. 156*.
- Rausch, E. (1924). *Dampfturbinefundamente. Bauingenieur*. Berlín, Imperio Alemán.

- Rausch, E. (1926). *Maschinenfundamente. Bauingenieur*. Berlín, Imperio Alemán.
- Reissner, E. (1936). *Stationare, axialsymmetrische, durch schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes*. República Federal de Alemania.
- Reissner, E., & Sagoci, H. F. (1944). Forced Torsional Oscillations of an elastic halfspace. *Journal of Applied Physics*, Vol. 15, 652-662.
- Robertson, I. A. (1966). Forced vertical vibration of a rigid circular disk on a semiinfinite elastic solid. *Cambridge Philosophical Society*, Vol. 62, (págs. 547-553). Cambridge, Cambridgeshire.
- Roesset, J. M. (2009). *Some applications of soil dynamics. The seventeenth Buchanan Lecture*. Texas, Estados Unidos de América: College Station Hilton.
- Shekhter, O. Y. (1948). Consideration of Inertial Properties of Soil in the Computation of Vertical Forced Vibrations of Massive Foundations. *III, Symposium 12, Vibratsii Osnovaniy I Fundamentov*. Moscú.
- Sigalov, L. S. (1966). Rocking of a Rigid Body with a flat Circular Base on an Elastic Semi-Infinite Medium. *Trans. VUZ, Stroitelstvo i Arkhitektura*, No. 6.
- Sung, T. Y. (1953). Vibrations on Semi-Infinite Solids due to Periodic Surface Loading. "Symposium On Dynamic Testing of Soils", ASTM, (págs. 35-63).
- Timoshenko, S. (1928). *Vibration problems in engineering*. Nueva York, Estados Unidos de América: D. Van Nostrand Company, Inc.
- Veletsos, A. S., & Verbič, B. (1973). Vibration of Viscoelastic Foundations. *Journal Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol. 2. No. 1, 87-102.
- Veletsos, A. S., & Wei, Y. (1971). Lateral and rocking vibration of footings. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol 97, No. SM9, 1227-1248.
- Waas, G. (1972). *Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layer media*. Berkeley, California, Estados Unidos de América: University of California, Berkeley.
- Whitman, R. V. (1969). Equivalent Lumped System for Structure Founded Upon Stratum of Soil. *4th World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago de Chile.
- Whitman, R. V. (1969). *Soil-Structure Interaction*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos de América: Robert J. Hanson, The M.I.T. Press.
- Whitman, R. V., & Richart, F. E. (1967). Design procedures for Dynamically Loaded Foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol 93, 169-193.
- Wilson, W. K. (1942). *Practical Solution of Torsional Vibration Problems*. Londres: Chapman & Hall.