

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **PROPUESTA DE MANUAL PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS DE EQUIPOS ROTATIVOS BASADO EN LA NORMA ACI 351.3R-18**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por los Brs.:  
Delgado, José Enrique  
Flora González, Roberto Alessandro  
para optar al Título de Ingeniero Civil

Ciudad Universitaria de Caracas, 01 de noviembre del 2023

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **PROPUESTA DE MANUAL PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS DE EQUIPOS ROTATIVOS BASADO EN LA NORMA ACI 351.3R-18**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Manuel Velásquez

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por los Brs.:  
Delgado, José Enrique  
Flora González, Roberto Alessandro  
para optar al Título de Ingeniero Civil

Ciudad Universitaria de Caracas, 01 de noviembre del 2023



N02

ACTA

El día miércoles primero de noviembre de 2023, los profesores seleccionados por el Consejo de Escuela de ingeniería civil para atender a la presente defensa, designan como jurado evaluador a:

**JOSE MANUEL VELASQUEZ**  
**RONALD TORRES**  
**VICENTE LUGO**

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: "PROPUESTA DE MANUAL PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS DE EQUIPOS ROTATIVOS BASADO EN LA NORMA ACI 351.3R-18", Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar por el Título de INGENIERO CIVIL.

Una vez oída la defensa oral de los bachilleres, de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió otorgarle la siguiente calificación:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Número	Letras
Br. Roberto Alessandro Flora González C.I.27.715.020	20	Veinte
Br. José Enrique Delgado C.I.24.215.816	20	Veinte

Recomendaciones:

*Mención Honorífica*

  
Prof. JOSE MANUEL VELASQUEZ  
Tutor

  
Prof. RONALD TORRES  
Jurado

  
Prof. VICENTE LUGO  
Jurado

"Ciudad Universitaria de Caracas – Patrimonio Mundial de la Humanidad"

*A la Universidad Central de Venezuela,  
como respaldo de uno de sus propósitos.*

*A la Academia y la ingeniería venezolana,  
como lumbre en un punto de sombra.*

## AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por haber hecho posible este hito de mi vida, en el que estoy a punto de entregar mi Trabajo Especial de Grado para obtener mi título universitario de Ingeniero Civil.

Agradezco a mis padres por todo el apoyo en mi carrera universitaria, y en general, porque gracias a ellos soy quien soy hoy en día, con mis defectos y virtudes.

Agradezco a mi nonna, que, sin duda alguna, es la fuente de mi energía y de todas las cosas buenas que soy, a quien le debo una parte importante de mi vida, y quien tuvo, tiene y tendrá siempre, un papel fundamental en ella.

A mi abuela, porque estoy seguro de que sus oraciones llenas de fe tienen que ver con esto.

Al profesor José Manuel Velásquez, tutor de esta investigación, quien me ha otorgado conocimientos invaluable en mi formación profesional; es ejemplo de pasión por su profesión y por lo que se hace, y es muestra viviente de los frutos de la dedicación.

A todos los profesores que aportaron a mi formación como ingeniero civil, sobre todo a los que lo hicieron con verdadero gusto, que disfrutaban compartir sus conocimientos por la pura satisfacción de enseñar y formar a los profesionales del futuro, teniendo la convicción de que su labor será retribuida en un mañana que quizá no observen.

A mis compañeros de la universidad, por acompañarme y apoyarme en actividades académicas, fin principal de esta etapa de mi vida; sobre todo a mi compañero y amigo José Delgado, por ser parte especial de esta travesía llamada vida universitaria, en la que estuvimos juntos desde el inicio hasta el fin.

A Inelectra S.A.C.A. y su gente, por abrir sus puertas y brazos, permitirme hacer vida con ellos, y brindar el apoyo necesario a esta investigación.

A todas las personas que me apoyaron de una u otra manera: dándome un lugar para dormir, un desayuno, un café, compañía, un abrazo o las palabras correctas cuando más lo necesitaba.

Y, sobre todo, le doy las gracias a la ilustre UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, mi casa de estudios, mi alma máter, por permitirme acceder a una buena educación y ser la mejor universidad de mi mundo; por ser escenario de esta etapa crucial de mi vida, y con la que me comprometo a devolverle, durante toda mi vida, aunque no sea suficiente, una minúscula parte de lo que me dio.

Alessandro Flora

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi madre, quien con su esfuerzo, amor y apoyo me ha otorgado las posibilidades de alcanzar una nueva meta. Solo hay una frase con la que puedo expresar todo mi agradecimiento hacia ti. ¡Te amo!

Agradezco a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, por otorgarme salud y permitirme estudiar en la Universidad Central de Venezuela, solo él sabe cuánto lo soñé.

Al profesor José Manuel Velásquez por haber aceptado ser tutor de este trabajo especial de grado, por haber sido una fuente infinita de conocimiento durante todo el proceso. Quedaré eternamente en deuda.

A todos los profesores con los que compartí un aula de clase, porque cada uno de ellos marcó y fue influyente en mi formación académica.

Agradezco a mis amigos de la universidad por haber hecho de estos años de carrera más llevaderos.

A INELECTRA S.A.CA. especialmente a la Ing. Anny Villegas, por habernos otorgado las herramientas y licencias para llevar a cabo el presente trabajo.

Agradezco a todas las personas que de una forma u otra me han brindado una mano, consejo o palabras de aliento.

A mi amigo, compañero y socio que conocí desde primer semestre Alessandro Flora por cada uno de los momentos que vivimos durante nuestros estudios. Gracias.

Finalmente, a la Universidad Central de Venezuela, quien siempre será mi casa, porque me permitió tener una formación de calidad. Siempre te tendré presente y trabajaré para verte cada día mejor.

José Delgado

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	3
Contextualización y Delimitación del Problema .....	3
Objetivos de la Investigación.....	5
Objetivo General .....	5
Objetivos Específicos.....	6
Justificación y Aportes.....	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	9
Antecedentes de la Investigación.....	9
En el ámbito internacional .....	10
En el ámbito nacional.....	11
Bases Teóricas .....	12
Dinámica de estructuras .....	12
Dinámica de suelos .....	20
Fundaciones como sistema estructural.....	23
Fundaciones sometidas a cargas dinámicas .....	26
Tipos de fundaciones sometidas a cargas dinámicas .....	27
Tipos de equipos que generan cargas dinámicas.....	31
Diseño de Fundaciones Sometidas a Cargas Dinámicas.....	35
Referencias en el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas .....	37

Principio básico para el estudio de las vibraciones de una fundación .....	39
Predimensionado de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.....	44
Análisis dinámico.....	49
Diseño del acero de refuerzo.....	73
Caso común: fundaciones aporticadas .....	76
Los manuales como herramientas de agilización de procesos .....	78
 <b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>81</b>
Enfoque de la Investigación.....	81
Nivel de Investigación .....	82
Tipo de Investigación.....	82
Diseño de la investigación .....	83
Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	83
Método de la investigación .....	84
Planificación de la ejecución del Trabajo Especial de Grado .....	85
Revisión de la literatura .....	85
Elaboración del procedimiento para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.....	86
Diseño de una fundación superficial sometida a cargas dinámicas .....	87
Establecimiento de la estructura técnica del manual.....	95
Cronograma de actividades.....	97
 <b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>98</b>
Identificación y elaboración del procedimiento de diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas .....	98

Comparación del procedimiento estructurado para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas con otras fuentes de resultados .....	99
Estructura técnica y elaboración de la propuesta de manual para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas .....	103
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>118</b>
Conclusiones .....	118
Recomendaciones .....	119
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>126</b>
Anexo 1. Cálculos de cimentación de bomba de alta presión en complejo de generación de potencia.....	126
Datos generales .....	126
Predimensionado .....	127
Análisis dinámico.....	134
Diseño del acero de refuerzo.....	158

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 1 .....	100
Tabla 2: Parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 1 .....	101
Tabla 3: Parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 2 .....	102
Tabla 4: Comparación de parámetro dinámicos obtenidos en el ejemplo 2 (bibliografía vs. programa digital) .....	103
Tabla 5. Coordenadas del centro de rigidez .....	130
Tabla 6: Ubicación del CM y peso de componentes del equipo .....	131
Tabla 7: Coordenadas del CM del conjunto equipo-fundación .....	132
Tabla 8: Coordenadas del centro de rigidez del sistema .....	132
Tabla 9: Excentricidad del CM del equipo .....	133
Tabla 10: Coordenadas del CM del conjunto equipo-fundación .....	133
Tabla 11: Coeficientes de fundación rectangular .....	136
Tabla 12: Coeficientes de fundación rectangular .....	138
Tabla 13: Cómputos del acero de refuerzo .....	161

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Grados de libertad de sistemas vibratorios .....	14
Figura 2: Pórtico de un grado de libertad sometido a una carga dinámica .....	15
Figura 3. Gráfica de un movimiento armónico sin amortiguamiento .....	17
Figura 4: Gráfica de vibración libre con amortiguamiento viscoso .....	19
Figura 5: Gráfica de vibración libre con amortiguamiento Coulomb .....	19
Figura 6: Gráfica de vibración libre con amortiguamiento negativo .....	20
Figura 7: Fuerza dinámica puntual actuando en un semi-espacio elástico .....	22

Figura 8: Fundación directa.....	25
Figura 9: Fundación indirecta.....	25
Figura 10: Fundación tipo bloque.....	28
Figura 11: Fundación tipo bloque combinado.....	28
Figura 12: Fundación tipo mesa .....	29
Figura 13: Fundación tipo mesa con aisladores .....	29
Figura 14: Equipo suspendido sobre fundación tipo bloque .....	30
Figura 15: Bloque de inercia .....	30
Figura 16: Fundación profunda .....	31
Tipos de equipos que generan cargas dinámicas .....	
	31
Figura 17: Gráfica de carga armónica periódica vs. tiempo.....	32
Figura 18: Gráficas de cargas periódicas en función del tiempo.....	32
Figura 19: Gráficas de cargas aperiódicas en función del tiempo.....	33
Figura 20: Diagrama de una máquina rotativa .....	34
Figura 21: Diagrama de una máquina reciprocante.....	34
Figura 22: Modelo de bloque apoyado en espacio elástico .....	40
Figura 23: Diagrama de cuerpo libre de sistema vibratorio .....	41
Figura 24: Representación vectorial de un movimiento armónico.....	42
Figura 25: Representación vectorial de desplazamiento, velocidad y aceleración de un movimiento armónico.....	42
Figura 26: Detalle típico de perno de anclaje.....	46
Figura 27: Dimensiones preliminares propuestas según la regla del pulgar .....	47
Figura 28. Estructuras Típicas con Fundaciones Superficiales .....	50
Figura 29: Notación para Cálculo del Radio Equivalente de Bases Rectangulares .....	51
Figura 30. Coeficientes para fundaciones rectangulares .....	58

Figura 31. Tabla de coeficientes $\alpha_1, \beta_j, \gamma_j$ .....	61
Figura 32. Parámetros de rigidez y amortiguamiento ( $S_{i1}$ y $S_{i2}$ ) .....	64
Figura 33: Esquema de una fundación embebida.....	65
Figura 34: Grados de calidad de balance para algunos rotores rígidos .....	66
Figura 35: Gráfico de percepción humana de vibraciones .....	69
Figura 36. Gráfico de fallas por desplazamiento horizontal en máquinas rotativas.....	70
Figura 37: Gráfico de severidad vibratoria de maquinaria.....	70
Figura 38: Estándares de vibración para máquinas de alta frecuencia .....	71
Figura 39: Gráfico de límites en vibraciones para turbo maquinas rotativas .....	71
Figura 40: Espectro de respuesta para vibraciones límite .....	72
Figura 41: Cuantía mínima de acero de refuerzo .....	74
Figura 42: Fundación aporticada con aberturas en la losa superior .....	76
Figura 43: Reglas del pulgar para fundaciones aporticadas .....	78
Figura 44: Bomba de alta presión.....	88
Figura 45: Interfaz del programa de análisis de dinámico.....	89
Figura 46: Sección “Data” .....	89
Figura 47: Título del proyecto .....	90
Figura 48: Selección del tipo de fundación .....	90
Figura 49: Dimensiones de la fundación .....	91
Figura 50: Coordenadas del centro de la base de la fundación .....	91
Figura 51: Información del sistema equipo-fundación.....	92
Figura 52: Cálculo de propiedades físicas y geométricas del sistema equipo-fundación .....	92
Figura 53: Propiedades dinámicas del suelo bajo la fundación.....	93
Figura 54: Estrato de suelo .....	93
Figura 55: Fuerza y momentos resultantes sobre la fundación .....	94

Figura 56: Esquema de máquina centrífuga .....	95
Figura 57: Cubierta del manual .....	104
Figura 58: Hojas de respeto .....	105
Figura 59: Portada del manual.....	105
Figura 60: Dedicatoria.....	106
Figura 61: Agradecimientos .....	107
Figura 62: Índice del manual .....	107
Figura 63: Prólogo.....	108
Figura 64: Prefacio .....	108
Figura 65: Nota de los autores.....	109
Figura 66: Etapa introductoria.....	110
Figura 67: Referencias.....	111
Figura 68: Capítulo 1. Notaciones y Definiciones .....	112
Figura 69. Capítulo 2. Fundamento Teórico.....	113
Figura 70: Capítulo 3. Procedimiento de Diseño .....	114
Figura 71: Capítulo 4. Ejemplos Prácticos .....	115
Figura 72: Capítulo 5. Guía para uso de hojas de cálculo .....	116
Figura 74: Sistema de coordenadas del bloque de fundación.....	130
Figura 75: Ubicación de skid sobre fundación .....	131
Figura 76: Diseño del acero de refuerzo en dirección “a” .....	163
Figura 77: Diseño del acero de refuerzo en dirección “b” .....	164

## PROYECTO DE TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

# PROPUESTA DE MANUAL PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS DE EQUIPOS ROTATIVOS BASADO EN LA NORMA ACI 351.3R-18

**Autores:** Br. José E. Delgado  
Br. Roberto Alessandro Flora G.

**Tutor:** Prof. Ing. José Manuel Velásquez

**Fecha:** octubre del 2023

### RESUMEN

Dada la importancia actual de la dinámica de estructuras y suelos en la ingeniería a nivel mundial, y la escasa información reglamentaria existente hoy en día en Venezuela respecto al diseño de cimentaciones cargadas dinámicamente, surge esta investigación, cuyo propósito fue proponer un manual para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos basado en la norma ACI 351.3R-18, que estructure un procedimiento de predimensionado, análisis dinámico y armado de este tipo de fundaciones, buscando facilitar su proceso de diseño; todo esto a través de una investigación de tipo documental, ya que se hizo una revisión de diferentes normativas y guías técnicas internacionales relacionadas con el tema, encontrando apoyo en programas tecnológicos; y que sigue, a su vez, un modelo de proyecto factible, porque sus resultados fueron aplicados una vez culminada.

Finalmente, se concluyó que el manual, junto con su complemento digital (hoja de cálculo), representan una guía y herramienta que simplifica el trabajo de profesionales y estudiantes de ingeniería que guarden algún interés en el tema, y mejoran la efectividad de procedimientos asociados con proyectos de ingeniería; asimismo, se destacó la importancia de definir el método de análisis dinámico que se empleará en el diseño de estas estructuras, y de estar conscientes de las implicaciones, condiciones y criterios que toma en cuenta. Este trabajo sirve como fundamento de futuras investigaciones, siendo parte del inicio de un campo de investigación basado en las fundaciones sometidas a cargas dinámicas generadas por maquinarias, área poco desarrollada en la academia a nivel nacional, de interés para la ingeniería estructural y geotécnica a nivel mundial.

**Palabras clave:** fundaciones de máquinas, dinámica estructural, dinámica de suelos, proyecto factible, manual técnico.

## INTRODUCCIÓN

Las fundaciones sometidas a cargas dinámicas son soluciones estructurales ampliamente utilizadas a nivel mundial en una diversa gama de proyectos ejecutados por grandes empresas, que representan el encuentro de dos áreas relevantemente complejas de la ingeniería civil: la dinámica estructural y la dinámica de suelos. Hasta la fecha, numerosas investigaciones realizadas en estos campos por científicos e ingenieros, no han sido suficientes para describir completamente algunas incógnitas, debido a la naturaleza del objeto de estudio, como lo es el suelo y su interacción con las estructuras.

Esto, junto con la ausencia de una normativa nacional venezolana que rijan el análisis y diseño de estos cimientos, ha causado que el tema de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas sea poco conocido y desarrollado en el contexto actual de la ingeniería en el país, incluso por experimentados profesionales de la ingeniería civil que, en ocasiones, se ven obligados a hacer una revisión documental extensa para entender los fundamentos de estas estructuras y su proceso de diseño, e incluso a aprender a utilizar programas de análisis dinámico estructural, cuyo funcionamiento puede llegar a ser complejo.

El presente trabajo busca ofrecer información concisa y detallada del tema, junto con la estructuración de un procedimiento para el análisis y diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas, recopilando información contenida en numerosas bibliografías y documentos oficiales internacionales, que facilite tanto la comprensión de los fundamentos teóricos, como del proceso práctico de desarrollo de estas estructuras.

Por motivos metodológicos que facilitan la comprensión del lector, se estructuró el desarrollo de la investigación bajo el siguiente esquema:

**Capítulo I. “Planteamiento del Problema”:** contiene el núcleo central de la investigación, exponiendo el estado del arte del tema principal que trata. De igual

manera, se presenta la interrogante que guía el estudio y que da base a su objetivo general y objetivos específicos, junto con las razones que dan relevancia y justifican la realización del mismo.

**Capítulo II. “Marco Teórico”:** que presenta trabajos e investigaciones (tanto nacionales como internacionales) relacionados de alguna manera con este estudio, y las bases teóricas que le otorgan un fundamento sólido, basado en estudios y conocimientos mundialmente aceptados.

**Capítulo III. “Marco Metodológico”:** comprendido por el fundamento metodológico sobre el cual se apoya este trabajo para su desarrollo, describiendo el enfoque, nivel, tipo y diseño de la investigación, las técnicas e instrumentos utilizados, y la estructuración del método convenido para alcanzar los objetivos planteados.

**Capítulo IV. “Análisis de Resultados”:** en este capítulo se expone un resumen general de la propuesta de manual para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos, dándole un sentido lógico que muestre cómo atiende a la respuesta de la interrogante de la investigación, y cómo representa el alcance de los objetivos planteados.

**Capítulo V. “Conclusiones y Recomendaciones”:** finalmente, se presentan las consideraciones finales del estudio realizado, señalando los puntos de llegada derivados del cumplimiento de los objetivos y el análisis de resultados previamente realizado, junto con las recomendaciones para el lector y futuros trabajos interesados en contribuir con el estudio de la dinámica estructural, dinámica de suelos, y fundaciones sometidas a cargas dinámicas.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **Contextualización y Delimitación del Problema**

En la industria de la construcción, es común el uso de equipos que se mantienen en constante movimiento, generando ciertas cargas que varían en función del tiempo; cuando dichas cargas actúan fuera del centro de gravedad del equipo, son llamadas cargas dinámicas, que son transmitidas y soportadas por la fundación en la que dichos equipos se apoyan, debiendo tolerar los períodos de fatiga asociados a ellas.

La particularidad de estas soluciones geotécnicas está en las consideraciones adicionales y criterios especializados que requiere su diseño, y el análisis del comportamiento y deformaciones del suelo, dado que las fuerzas de inercia adquieren relevancia con relación a las estáticas, ya que el suelo se somete a cargas de carácter dinámico (Fratelli, 1993).

Por esto, el análisis y diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas ha sido considerado un estudio complejo, igualmente por la interacción de diferentes disciplinas, como la ingeniería estructural y geotécnica (Arya, O'Neill y Pincus, 1979).

El estudio de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas se basa fundamentalmente en el análisis de las vibraciones, a través del estudio de amplitudes de desplazamiento y frecuencias, considerando al elemento estructural como un bloque sólido que reposa en otro sólido de elasticidad semi-infinita, haciendo referencia al suelo. Sin embargo, la solución a este problema no ha sido encontrada, y por lo tanto son necesarias múltiples suposiciones respecto a las vibraciones de los bloques sólidos colocados en el suelo (Barkan, 1962).

En tal sentido, se destaca que este tipo de fundaciones cuenta con cierto grado de particularidad, por lo que frecuentemente en las empresas se desconoce, y no se cuenta con personal especializado en el tema. Esto puede constituir una limitante y/o dificultad para el desarrollo de proyectos que incluyan estas cimentaciones, traduciéndose en errores y falta de efectividad en su proceso de diseño por carencia de experticia, ya que, en algunos casos, dicho proceso puede darse de manera simultánea con el estudio y familiarización del ingeniero con esta tipología estructural.

Otra de las posibles limitantes, es la necesidad de utilizar un programa de cálculo estructural para diseñar una fundación sometida a cargas dinámicas; esta necesidad debe evaluarse de acuerdo con el tipo de cimentación y al tipo de equipo que soportará que, según la norma ACI 351.3R-18, se clasifican en equipos rotativos, reciprocantes y de impacto. En general, los equipos rotativos representan un caso simple y frecuente; estos son definidos por la misma norma, como aquellos que contienen un eje que gira sobre su centro y transmite la rotación a un efector final, tal es el caso de motores, bombas, turbinas de vapor o gas, compresores, entre otros.

En Venezuela, esta situación se ve acentuada, dado que el campo de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas cuenta con escasos estudios (por ejemplo, Alcalá y Vidal, 2017); no existen normativas, y no son comunes las guías y textos de orientación relacionados con este tema, incluso para casos simples de fundaciones destinadas a soportar pequeñas bombas, turbinas, motores u otros equipos rotativos, en los que el seguimiento de un proceso estructurado podría llegar a ser sencillo.

Generalmente, los ingenieros involucrados en el diseño de este tipo de cimentaciones deben recurrir a normativas extranjeras, como la mencionada norma ACI 351.3R-18 que, si bien sirve como base gracias a la información que ofrece respecto a estas soluciones estructurales, puede tornarse complicada su comprensión cuando no se está familiarizado con el tema, obligando al profesional a invertir tiempo en su estudio para evitar incurrir en errores y que el proceso de diseño se vuelva inconsistente, incluso cuando el caso en cuestión pueda resultar bastante sencillo de tratar, una vez visualizada su solución.

La inconsistencia de procesos asociados al desarrollo de proyectos de ingeniería, ha constituido una problemática para las empresas del rubro, ya que repercute en el desempeño de la misma por disminución de su efectividad, al no ser eficaz por no cumplir los objetivos planteados en el tiempo estipulado, y al ser ineficiente, por invertir mayor cantidad de recursos (personal, tiempo, dinero, otros) en llegar a un mismo fin; todo esto conduce a resultados de baja calidad, pérdida de tiempo por repeticiones y por lo tanto aumento de costos asociados a dichas pérdidas.

Estas inconsistencias muchas veces no son atendidas por los gerentes de proyectos, quienes deberían ocuparse de estudiar los beneficios que trae la estandarización y estructuración de ciertos procesos que componen el desarrollo de dichos proyectos de ingeniería; de este estudio se define la conveniencia de normalizarlos, puesto que, en ocasiones se hace imposible establecer un estándar, o bien los beneficios de la estandarización son poco relevantes con relación al esfuerzo que implica establecerla.

Por todo lo anteriormente expuesto, existe la necesidad de elaborar una herramienta de consulta que sirva de guía para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos, con el fin de agilizar el trabajo que implica el dimensionamiento, análisis y armado de las mismas, y por lo tanto hacer más sencillo el desarrollo de proyectos de ingeniería en las empresa que incluyan a estas estructuras, surgiendo la interrogante: **¿Cómo se puede facilitar el proceso de diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos?**

### **Objetivos de la Investigación**

A continuación, se presentan los objetivos del trabajo de investigación, que establecen lo que se quiere alcanzar con su realización, trazando ejes claros y definidos que marcan la pauta del contenido siguiente.

#### ***Objetivo General***

Proponer un manual para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos basado en la norma ACI 351.3R-18.

### ***Objetivos Específicos***

- Identificar el procedimiento para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas.
- Elaborar el procedimiento para el predimensionado, análisis dinámico y armado de fundaciones superficiales, mediante fórmulas empíricas.
- Diseñar una fundación superficial a través del procedimiento establecido.
- Comparar los resultados del procedimiento estructurado en la propuesta con los resultados de un programa de análisis dinámico.
- Establecer la estructura técnica del manual para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos.
- Elaborar la propuesta de manual para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos.

### **Justificación y Aportes**

El diseño de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas es un proceso complejo que necesita ser desarrollado en Venezuela, ya que, actualmente, son escasos los profesionales pertenecientes a empresas de ingeniería que han tratado con este tipo de estructuras, y que se dedican al campo de la dinámica estructural.

Entre los diferentes tipos de equipos, primordialmente clasificados en rotativos, reciprocantes y de impacto, los rotativos, dadas sus características, constituyen un caso frecuente que posee la ventaja de requerir un estudio menos complejo que el de los otros equipos; además, en ocasiones, presentan la oportunidad de realizar un estudio en el cual no es necesario el uso de programas avanzados para el análisis de su fundación, reduciendo los requerimientos técnicos para llevar a cabo esta tarea.

Por lo tanto, identificar y estructurar sistemáticamente un procedimiento que agrupe las consideraciones presentadas en distintas normas, textos y guías técnicas, relacionados con el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas de equipos

rotativos, que permita calcular sus dimensiones, ejecutar un análisis dinámico y diseñar el acero de refuerzo, proporcionaría mayor efectividad a las empresas que desarrollan proyectos asociados a esta área.

En muchos casos, la estructuración escrita y definida de los procesos relacionados con el desarrollo de un proyecto, resulta en el aumento de la efectividad, al obtenerse mejores resultados (en cantidad y calidad), ya que se minimizan los errores y dudas, se asegura el cumplimiento de normativas, se mitigan los riesgos, entre otros beneficios, gracias al aumento de las dos componentes de este concepto: eficacia y eficiencia, al poder lograr los objetivos planteados en el tiempo estipulado e invirtiendo la menor cantidad de recursos, expresados no solamente en términos de tiempo, sino también en términos económicos y humanos.

Esta estructuración puede lograrse a través de un manual, herramienta que en diversos ámbitos permite plasmar y transmitir información concisa, simplificándola de tal manera que pueda ser consultada rápidamente y entenderse sin mayor esfuerzo. En la ingeniería civil esto es común, pues es el caso de numerosos procedimientos, soluciones y tecnologías, cuya ejecución, uso y/o aplicaciones se encuentran organizadas sistemáticamente en manuales y guías.

Por tales motivos, se propone un manual para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos, tomando como base la norma ACI 351.3R-18, que sirva como guía para el predimensionado, análisis dinámico y armado de las mismas; esto puede suponer una facilidad y mejora en los procesos asociados al desarrollo de proyectos, al mejorar la efectividad por reducción de tiempos y costos en el diseño de estas soluciones.

La consecución de los objetivos planteados resultaría en el desarrollo de una herramienta que puede ser de impacto positivo para las empresas y profesionales de la ingeniería que desarrollan proyectos que involucran fundaciones de equipos rotativos; tal es el caso de las grandes empresas del sector de la energía, en cuyos proyectos de desarrollo de plantas y complejos industriales es fundamental el uso de estos equipos.

Desde el punto de vista académico, el trabajo que se realiza plantea una oportunidad de ampliar las referencias nacionales de la investigación en el área de la dinámica de estructuras y de suelos, como posible fuente de conocimientos e instrucción en el tema que aborda dentro de la ingeniería civil estructural y geotécnica, e incluso dentro de otras disciplinas como la ingeniería mecánica, al tener relación con equipos y procedimientos que entran en el campo de su objeto de estudio; esto de acuerdo con la meta 9.5 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que tributa al ODS 9, que trata del aumento de la investigación en el campo de la infraestructura y la industria nacional de países en desarrollo, como vía hacia un desarrollo sostenible.

De igual manera, la investigación podría fungir como antecedente y base para futuros investigadores y estudios relacionados a las fundaciones para equipos rotativos, dinámica estructural y de suelos, así como a la estructuración de procedimientos a través de un manual como herramienta de organización y sistematización escrita de procesos de ingeniería.

Todo lo anteriormente expuesto, resume la relevancia de llevar a cabo la presente investigación, siendo de interés y utilidad para las empresas, universidades, profesionales y estudiantes de ingeniería.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

El presente capítulo tiene como finalidad presentar los antecedentes de la investigación, desarrollar los fundamentos teóricos de las cimentaciones sometidas a cargas dinámicas, así como su proceso de diseño. Todo esto, con el fin de otorgar un marco de referencia al trabajo que se presenta, ya que, como señala Balestrini (2006):

El marco teórico, a un nivel más específico y concreto, contiene la ubicación contextual del problema en una determinada situación histórico social, sus relaciones con otros hechos o problemas, las vinculaciones de los resultados por obtener con otros ya conseguidos; pero, además, las definiciones de nuevos conceptos, reformulaciones de otros, clasificaciones, tipologías por usar, etc. (p. 92).

De esta manera, se establece una relación entre esta investigación con la literatura existente y los estudios previos, para enriquecer su contenido y dar un punto de vista que puede trascender a lo expresado en estas páginas.

#### **Antecedentes de la Investigación**

Esta sección, como bien señala, contiene investigaciones realizadas anteriormente y que guardan alguna vinculación con el proyecto en cuestión, entiéndase trabajos y tesis de grado, trabajos de ascenso, artículos e informes científicos (Arias, 2006).

Algunos de los antecedentes documentados y analizados para el desarrollo de la investigación son:

### *En el ámbito internacional*

Se hace referencia al trabajo de Díaz (2011), titulado “Comportamiento de un sistema suelo-fundación sometido a cargas dinámicas”, presentado en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile) para la obtención del título de Ingeniero Civil, en el que definió el comportamiento de dicho sistema y analizó su inestabilidad a frecuencias cercanas a la resonancia, de acuerdo con la deformación y esfuerzos, al estar bajo la influencia de distintos tipos de cargas dinámicas producidas por una máquina vibratoria, haciendo variar dichas cargas en su magnitud y frecuencia.

Trabajando a través del método de elementos finitos, concluyó que los desplazamientos obtenidos del modelo son semejantes a los resultantes del método pseudo-estático de Arya et al. (1979), además, que este último representa una ventaja, ya que, a diferencia del primero, evidencia la frecuencia natural del sistema, haciendo posible verificar el fenómeno de resonancia.

Monachello y Moreno (2013) a través de su trabajo titulado “Diseño de bloques de cimentación para máquinas dinámicas” llevado a cabo en la Universidad de Los Andes (Colombia) para optar a la titulación de Ingeniero Civil, diseñaron una guía técnica para el diseño de bloques de cimentación de máquinas dinámicas, sin ahondar en el análisis de la condición estática del sistema máquina-cimentación. También desarrollaron un programa que sirviera como apoyo a dicha guía.

Igualmente, el trabajo realizado por Herrera (2017), que lleva el título de “Manual para diseño de cimentaciones para equipos vibratorios” presentado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para optar al título de Ingeniero Civil, presentó los criterios y formulación teórica para el diseño y construcción de cimentaciones sometidas a cargas dinámicas para equipos vibratorios, describiendo la evolución del estudio de estas estructuras, y destacando, a su vez, la importancia de tomar en cuenta no solo un factor dinámico para amplificar las cargas estáticas verticales, sino también la existencia de cargas horizontales y torsionales.

Núñez (2020), en su investigación “Diseño de cimentación para un sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente sometida a fuerzas dinámicas para la empresa Novacero S.A. en Planta Lasso” presentado en la Universidad Politécnica Salesiana (Quito, Ecuador) para la titulación de Ingeniero Civil, constituyó un proyecto de diseño de una fundación tomando en cuenta criterios de las guías técnicas NEC-2015 y ACI 351, a través de un hoja de cálculo y programas de análisis estructural, para la verificación de ciertos parámetros como rigidez y amplitudes de desplazamiento.

Por otra parte, Ferrero y Turino (2021) estudiaron el diseño de una cimentación sometida a cargas dinámicas causadas por una prensa mecánica de 250 toneladas para una empresa metalúrgica, localizada en la ciudad de San Francisco, Córdoba, Argentina, a través de su investigación titulada “Diseño de una cimentación sometida a cargas dinámicas causadas por prensa mecánica” en la Universidad Tecnológica Nacional para optar al título de Ingeniero Civil.

Para tal fin, se empleó el método de análisis dinámico, el cual modela una cimentación rígida en un semi-espacio a través de un sistema de parámetros agrupados. Además, se efectuaron consideraciones adicionales, como el modo de funcionamiento de la máquina y su anclaje a la base, verificaciones de capacidad de carga del suelo y dimensionamiento de acero de refuerzo. Como resultado, se obtuvo una base con un valor de frecuencia satisfactorio, ya que la frecuencia natural del sistema resultó estar alejada de la frecuencia del equipo, evitando así el fenómeno de resonancia.

### ***En el ámbito nacional***

Alcalá y Vidal (2017), en su investigación titulada “Manual para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas”, realizada en la Universidad Católica Andrés Bello para optar al título de Ingeniero Civil, presentaron un manual que estableciera un procedimiento para el diseño de estas cimentaciones. Guarda una relación con el presente trabajo principalmente por el tema que trata, basándose en la

estructuración de un procedimiento para el análisis y diseño de una fundación superficial sometida a cargas dinámicas.

Recurrieron a programas de análisis estructural para ingresar datos de un ejemplo propuesto y resuelto con el procedimiento estructurado; al coincidir los resultados, dieron validez al mismo.

Además, se sustenta la efectividad de un manual como herramienta para el cálculo estructural, prescindiendo de programas de análisis de estructuras en caso de no poseer licencias, no tener experiencia en su uso, o en materia de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.

### **Bases Teóricas**

Las bases teóricas constituyen todas aquellas premisas que tienen relación con el tema de investigación y que consolidan los cimientos para realizar el análisis documental que implica el proceso metodológico dentro de la investigación; según Arias (2006) “implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado”.

En este sentido, los referentes que sustentan este trabajo de grado se refieren a la teoría de la dinámica estructural, dinámica de suelos y su combinación como disciplinas para el estudio, análisis y diseño de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos.

### ***Dinámica de estructuras***

Con el pasar del tiempo, el avance tecnológico ha permitido que se tenga mayor claridad del comportamiento de las estructuras, lo que ha permitido y provocado que sean cada vez más ambiciosas, con el fin de satisfacer ciertas necesidades que requieren de estos sistemas complejos, pero también por motivos que van fuera de las necesidades básicas y fundamentales de la sociedad, como lo son los fines arquitectónicos. Estas

razones han dado motivos a los profesionales para seguir investigando en las diversas ramas de la ingeniería civil.

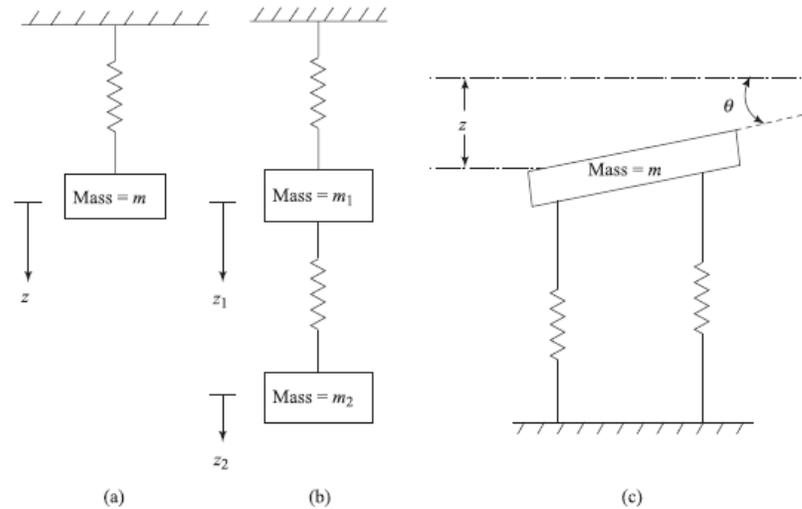
Cuando se diseñan estructuras, generalmente se toman en cuenta las cargas estáticas que actúan sobre ellas, pero por las razones expuestas anteriormente, se hizo necesario ampliar este estudio, e incluir el efecto de cargas que no permanecen estáticas, es decir, que varían en el tiempo, llamadas cargas dinámicas, como, por ejemplo, aquellas producidas por terremotos, vientos, o las que provoca el tráfico o un tren sobre un puente por el que transita.

Por lo tanto, la dinámica estructural estudia el efecto de cargas que varían en el tiempo sobre las estructuras, sea cual sea el material, con el objetivo de que sea posible construirla, sin comprometer su funcionalidad y confiabilidad.

Como en diversas oportunidades no es posible conseguir una solución matemática y físicamente posible a problemas de la ingeniería (sobre todo en problemas complejos como los relacionados con la dinámica estructural), los profesionales de esta disciplina han debido hacer suposiciones e idealizaciones para que el problema sea manejable sin alejarse de la realidad, y obtener soluciones que sean satisfactorias a criterios de funcionalidad, seguridad y economía, valiéndose de los modelos matemáticos obtenidos mediante simplificaciones al problema inicial, permitiendo así su trabajabilidad, y que sirven de “puente” entre las suposiciones realizadas y las soluciones reales al problema estructural.

Cuando se está analizando un caso de dinámica estructural, es necesario conocer los grados de libertad de la estructura, definidos por Das y Ramana (2011) como “el número de coordenadas independientes requeridas para describir la solución de un sistema vibratorio” (p. 9). Por ejemplo, en la figura que se muestra a continuación, observamos que para el caso (a) la vibración de la masa “ $m$ ” puede ser descrita con la coordenada “ $z$ ” únicamente, mientras que para el caso (b) se necesita la coordenada “ $z_1$ ” de la masa “ $m_1$ ” y la coordenada “ $z_2$ ” de la “ $m_2$ ” si queremos describir el

movimiento del sistema; lo mismo pasa con el ejemplo (c) en el que para describir el movimiento del cuerpo rígido se necesitan las coordenadas “ $z$ ” y “ $\theta$ ”.

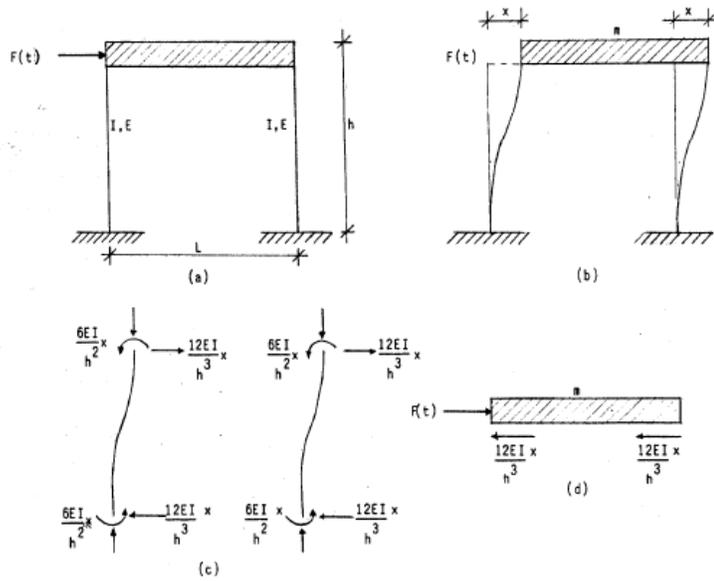


**Figura 1: Grados de libertad de sistemas vibratorios**

Fuente: Das y Ramana (2011)

Para ilustrar un ejemplo de obtención de un modelo matemático que representa un sistema de un grado de libertad, observemos la figura 2, en la que se ilustra un pórtico de un nivel compuesto por dos columnas de rigidez “ $EI$ ” y una losa de masa “ $m$ ” a la que se aplica una fuerza horizontal “ $F(t)$ ” que varía en el tiempo, tal como se muestra en (a), que genera un desplazamiento “ $x$ ” mostrado en (b). De acuerdo con lo explicado en el párrafo anterior, se puede concluir que el sistema posee un grado de libertad.

Para encontrar solución al problema, se asume que no existe amortiguamiento, que las juntas son infinitamente rígidas en comparación con las columnas y la masa de las columnas es despreciable comparada con la de la losa. En el despiece realizado en (c) se obtiene el diagrama de cuerpo libre de la losa, mostrado en (d), y como en la dinámica estructural son válidas las tres leyes de Newton, resulta la ecuación que describe el movimiento de la losa haciendo una sumatoria de fuerzas horizontales.



**Figura 2: Pórtico de un grado de libertad sometido a una carga dinámica**

Fuente: Curso de Dinámica estructural (s.f.)

$$F(t) - \frac{12EI}{h^3}x - \frac{12EI}{h^3}x = m\ddot{x}$$

$$F(t) - \frac{24EI}{h^3}x = m\ddot{x}$$

Llamando “k” a la rigidez del sistema y despejando la fuerza dinámica, se tiene:

$$k = \frac{24EI}{h^3}x$$

$$F(t) - kx = m\ddot{x}$$

$$F(t) = m\ddot{x} + kx$$

Para este caso, según la teoría de ecuaciones diferenciales, la solución está dada por:

$$x(t) = A_1 \text{sen}(\omega t) + A_2 \text{cos}(\omega t)$$

$$\dot{x}(t) = \omega A_1 \text{cos}(\omega t) - \omega A_2 \text{sen}(\omega t)$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 A_1 \text{sen}(\omega t) - \omega^2 A_2 \text{cos}(\omega t)$$

En donde:

$A_1, A_2$ : coeficientes de amplitud de la vibración natural [m]

$\omega$ : frecuencia angular [rad/s]

$\dot{x}$ : velocidad [m/s]

$\ddot{x}$ : aceleración [m/s<sup>2</sup>]

Los valores de  $A_1$  y  $A_2$  dependen de las condiciones iniciales en cuanto a posición y velocidad medidos en un instante “ $t_0$ ” que se considera el momento en el que comienza el movimiento (Barkan, 1962); calculándolos, podremos conseguir el valor de la posición para cualquier tiempo, y por consiguiente el valor de la fuerza en el instante requerido.

$$x(t = 0) = x_0 = A_2$$

$$\dot{x}(t = 0) = v_0 = \omega A_1 \rightarrow A_1 = \frac{v_0}{\omega}$$

Es importante entender que la frecuencia angular es “la tasa de variación en el tiempo del desplazamiento angular dada en unidades de radianes por segundo” (Arya et al., 1979, p. 18). Esta se relaciona con la frecuencia natural, un concepto muy parecido, ya que representa el número de oscilaciones que realiza el sistema en un segundo (Barkan, 1969), y a su vez, con el período, que es el tiempo en que tarda dicho sistema en realizar una oscilación, por lo puede definirse como el inverso de la frecuencia. Estos parámetros están dados por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

En donde:

$\omega$ : frecuencia angular natural [rad/s]

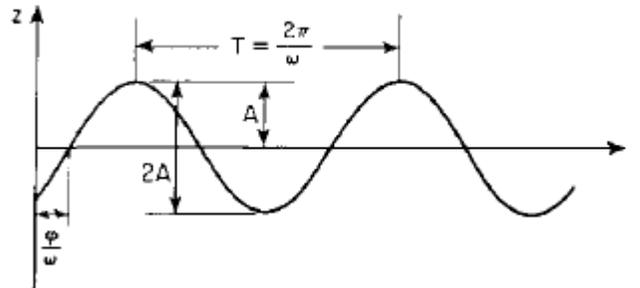
$m$ : masa del sistema [kg]

$k$ : constante de elasticidad [N/m]

$f$ : frecuencia natural [Hz=1/s]

$T$ : período [s]

En la siguiente figura se muestra la gráfica de un movimiento armónico sin amortiguamiento, señalando algunos de los parámetros que intervienen en el mismo.



**Figura 3. Gráfica de un movimiento armónico sin amortiguamiento**

Fuente: Richart Jr., Hall Jr. y Woods (1970).

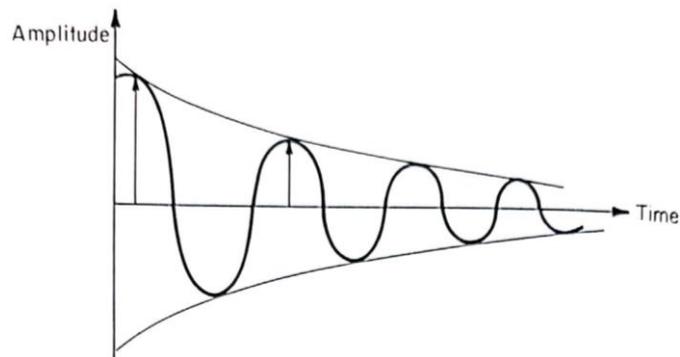
La constante de elasticidad (llamada también constante del resorte) está definida como una relación de proporcionalidad lineal entre la fuerza y la deformación relativa que produce la misma en la dirección en la que actúa, sobre un elemento estructural supuesto sin masa (Arya et al., 1979).

Todo esto es posible aplicarlo, ya que las estructuras sometidas a movimientos vibratorios son un ejemplo de sistemas físicos con movimientos oscilatorios que, además, poseen masa y elasticidad, por lo que son capaces de vibrar a su propia frecuencia natural, que es conocida como una propiedad dinámica (Arya et al., 1979).

La formulación presentada representa un caso simple de un sistema que experimenta un movimiento armónico (vibración forzada sin amortiguamiento), entendiendo que cada movimiento puede tratarse de una vibración libre o forzada, en presencia o no de amortiguamiento. Cada combinación de estos dos factores origina un caso distinto (en total son cuatro casos), que se resuelven de manera similar, aplicando el mismo razonamiento basado en la implementación de los principios de ecuaciones diferenciales sobre las ecuaciones establecidas por la Segunda Ley de Newton; de esta manera se halla la solución que permite describir el movimiento de cada sistema.

Se hace necesario definir al amortiguamiento como un parámetro que no solo depende de las características inherentes al sistema oscilatorio (a diferencia de la masa y la rigidez), sino también de las características exteriores al mismo (Hurty y Rubinstein, 1964). Estos autores, señalan que habitualmente se clasifica el amortiguamiento según su naturaleza de la siguiente manera:

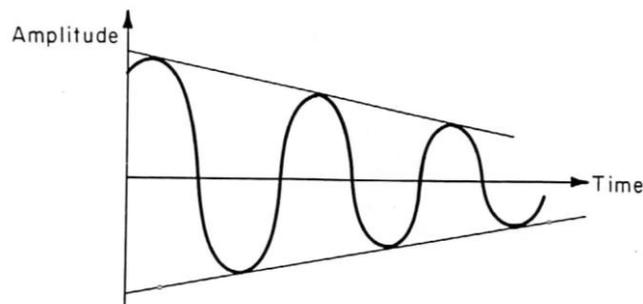
- Amortiguamiento estructural: se debe a la fricción interna del material o a conexiones entre elementos de un sistema estructural, resultando un amortiguamiento que depende de las deflexiones y deformaciones de la estructura.
- Amortiguamiento viscoso: resulta cuando un sistema vibra en un fluido, como aire, agua, aceite, etc.



**Figura 4: Gráfica de vibración libre con amortiguamiento viscoso**

Fuente: Hurty y Rubinstein (1964)

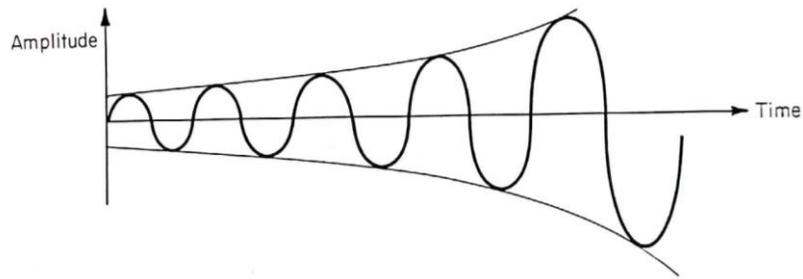
- Amortiguamiento Coulomb o fricción seca: se da por el deslizamiento del sistema sobre una superficie seca. La fuerza amortiguadora depende de la fuerza normal entre el cuerpo y la superficie, y del coeficiente de fricción dinámico entre ambos.



**Figura 5: Gráfica de vibración libre con amortiguamiento Coulomb**

Fuente: Hurty y Rubinstein (1964)

- Amortiguamiento negativo: resulta cuando la naturaleza del amortiguamiento es tal, que en vez de disipar energía del sistema oscilador, se la añade.



**Figura 6: Gráfica de vibración libre con amortiguamiento negativo**

Fuente: Hurty y Rubinstein (1964)

### *Dinámica de suelos*

Como es bien sabido, el suelo es uno de los elementos más importantes en el campo de la ingeniería civil, ya que es el medio en el que se apoyan o que constituye las obras de construcción como edificios, galpones, puentes, vialidades, taludes, entre otras. Por esta razón, ha sido estudiado desde tiempo atrás en cuanto a sus características y propiedades a la hora de relacionarse con la acción humana, sobre todo por la influencia que posee sobre las obras de ingeniería y viceversa, para que estas puedan ser ejecutadas atendiendo a requerimientos que giran en torno al cumplimiento de sus funciones sin poner en riesgo el bienestar de la sociedad.

Por esto, nace la mecánica de suelos, rama de la ingeniería civil que estudia y trabaja con las propiedades ingenieriles y comportamiento del suelo sometido a esfuerzos (Das y Ramana, 2011). Estos esfuerzos históricamente fueron tomados como producidos por cargas estáticas, pero realmente se debe incluir la acción de las cargas dinámicas para realizar un estudio más amplio. Esto se tuvo en cuenta muchos años después de haber desarrollado numerosas investigaciones relacionadas con el comportamiento del suelo bajo cargas estáticas.

Lo que hizo que la mecánica de suelos se especializara en cierta parte, dando lugar a la dinámica de suelos, que es la subrama de la mecánica de suelos que estudia específicamente el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas, y el efecto de

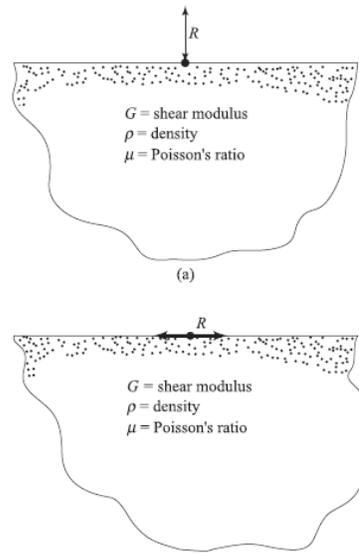
cualquier fuerza que genere o tienda a provocar algún movimiento en el suelo, así como su relación dinámica mutua con las fundaciones de estructuras (Jumikis, 1969).

De ahí la importancia que posee esta área, ya que ha constituido la solución de problemas a los que se enfrenta la humanidad en el desarrollo de obras de ingeniería, tales como el efecto de sismos sobre las estructuras, problemas de deformación, asentamiento y licuefacción del suelo, exploración de suelos, diseño de fundaciones para equipos que están en constante movimiento, como bombas, turbinas, motores reciprocantes, etc.

Además, la relevancia de este campo de estudio se hace más notoria tomando en cuenta las aplicaciones más importantes de la dinámica de suelos en diseño de estructuras como fundaciones y vialidades que, según Jumikis (1969), son: la transferencia al suelo de energía desde cualquier tipo de maquinaria, fuerzas sísmicas y otras fuentes de vibración, y la determinación de las propiedades dinámicas de dicho suelo que se tomarán en cuenta en el diseño de estructuras sujetas a cargas dinámicas.

En el caso de los suelos sometidos a movimientos vibratorios, “usualmente es suficiente aplicar la teoría general de vibración mecánica lineal, libre o forzada, con o sin amortiguamiento de un sistema compuesto por una masa puntual de un grado de libertad” (Jumikis, 1969, p. 369).

Este problema fue estudiado por Lamb en 1904 (mencionado por Das y Ramana, 2011), asumiendo un punto único sobre la superficie de un semi-espacio elástico, sobre el cual actúa una carga dinámica vertical u horizontal.



**Figura 7: Fuerza dinámica puntual actuando en un semi-espacio elástico**

Fuente: Das y Ramana (2011).

Luego, en 1936, Reissner analizó el problema de la vibración de un área circular flexible uniformemente cargada, apoyada sobre un semi-espacio elástico, encontrando la solución en la integración de la ecuación de Lamb para una carga puntual, resultando:

$$z = \frac{Q_0 e^{i\omega t}}{Gr_0} (f_1 + if_2)$$

En donde:

$z$ : desplazamiento periódico del centro del área cargada [m]

$Q_0$ : amplitud de la fuerza dinámica [N]

$\omega$ : frecuencia angular de la fuerza aplicada [rad/s].

$t$ : instante de tiempo correspondiente al desplazamiento “ $z$ ” [s]

$r_0$ : radio del área cargada [m]

$G$ : módulo de corte dinámico del semi-espacio (suelo) [N/m<sup>2</sup>]

$f_1, f_2$ : funciones de desplazamiento de Reissner [adim.]

Muchos modelos se han desarrollado para estudiar el comportamiento del suelo bajo la influencia de cargas dinámicas, pero el más aceptado (como se puede observar, de acuerdo con las asunciones de los estudios mencionados) es el “modelo del semi-espacio elástico”, que asume al suelo como un medio con superficie, constituido por un material elástico, homogéneo e isotrópico que se extiende hasta una profundidad infinita, cuyas propiedades de esfuerzo-deformación pueden ser definidas por dos constantes elásticas: el módulo de corte y el módulo de Poisson (Arya et al., 1979).

Predecir la respuesta del suelo cuando es sometido a cargas dinámicas, permite al ingeniero estructural incluir los efectos de las deformaciones en las fundaciones dentro de un análisis estructural global, pudiendo, igualmente, predecir la respuesta de las cimentaciones a la acción de fuerzas armónicas verticales, horizontales, momentos torsores y de volcamiento, e incluso a la acción de una combinación de tales cargas.

### *Fundaciones como sistema estructural*

Las fundaciones son la parte de las estructuras que han marcado la necesidad de investigaciones y estudios en el campo que resulta de la unión entre la dinámica estructural y la dinámica de suelos. En un sentido general, se puede destacar que todas las edificaciones deben estar conectadas al suelo mediante una fundación; esta tiene la finalidad de soportar las cargas de la estructura y transmitir las adecuadamente sobre el terreno a la profundidad necesaria para su correcto funcionamiento.

Según Calavera (2000) la fundación “es aquella parte de la estructura encargada de transmitir las cargas actuantes sobre la totalidad de la construcción al terreno” (p. 16). Para que una fundación se diseñe correctamente, Rodríguez (1995), señala que esta debe cumplir con cuatro requisitos:

1. Transmitir las cargas de la edificación al terreno, con deformaciones tolerables, de manera que se garantice la seguridad suficiente frente a la rotura o hundimiento.
2. Poseer suficiente resistencia como elemento estructural.
3. No resultar afectada por agresividad del terreno.

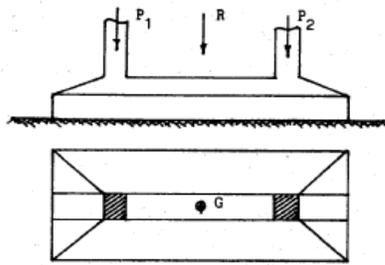
4. Estar protegida frente a modificaciones naturales o artificiales del entorno.

Como las cargas propias y externas de las edificaciones suelen ser mayores que la resistencia del suelo, las fundaciones requieren de un área en planta considerable para distribuir la carga y asegurar que los esfuerzos resultantes puedan ser soportados por el suelo sobre el que reposan; esto hace que, generalmente, las fundaciones sean piezas de volumen importante respecto a los demás elementos y miembros estructurales.

Por esta razón, para las cimentaciones, es común el uso de concreto con resistencia media (alrededor de  $250 \text{ kgf/cm}^2$ ), de manera que se aproveche al máximo la capacidad del concreto evitando altos costos; sin embargo, en casos especiales de construcciones de gran envergadura o muy baja capacidad portante del suelo, se puede emplear un concreto de mayor resistencia.

Como se observa, el diseño de una fundación está estrechamente relacionado con las características del suelo sobre el cual se construirá la edificación, principalmente en la elección del tipo de fundación que debe emplearse, entre los que están las fundaciones directas y las indirectas. Calavera (2000) expresa que las cimentaciones directas (también llamadas superficiales por algunos autores) son utilizadas cuando el suelo posee características favorables, tanto técnicas como económicas, para fundar en él (como alta capacidad portante); por otro lado, se recurre a fundaciones indirectas (también llamadas profundas) cuando el nivel apto para cimentar está a una profundidad considerablemente grande, a la cual sería muy costoso acceder mediante excavaciones para poder emplear fundaciones superficiales.

Las fundaciones directas son definidas por Rodríguez (1995) como elementos que transmiten cargas al terreno a través de superficies de apoyo con dimensiones grandes en comparación con su dimensión vertical, variando la cota de asiento de acuerdo con el tipo de edificación que se presente (alrededor de 3m en zapatas, pero mucho más en edificios con varios sótanos), por lo que aclara que el concepto de “fundación superficial” va más referido a la extensión en planta que a la cota de apoyo.

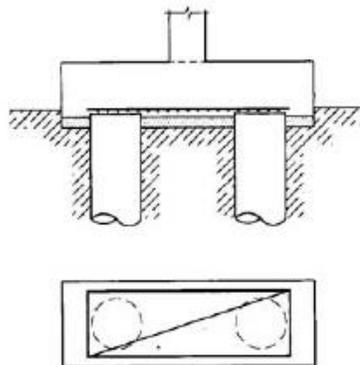


**Figura 8: *Fundación directa***

Fuente: Fratelli (1993).

En cambio, Fratelli (1993), da prioridad a la cota de asiento, definiendo a las fundaciones directas como “las que se apoyan en toda el área de la base sobre el terreno, en un estrato no mayor a 5 m de profundidad, medido desde la cota superior del predio a construir” (p. 246); y menciona los tipos de fundaciones directas: aisladas, continuas, combinadas, conectadas y placa de fundación.

Por otro lado, las fundaciones indirectas o profundas son definidas por Garza (2000), como aquellas cuya sección transversal es pequeña en comparación con su longitud, y que cumple la función de trasladar las cargas de una edificación a profundidades comprendidas entre 4 y 40 metros; estas se clasifican en pilotines, pilotes y pilas (Fratelli, 1993), de acuerdo con criterios que varían de un autor a otro, generalmente tomando en cuenta la forma y dimensiones de la sección transversal.



**Figura 9: *Fundación indirecta***

Fuente: Calavera (2000).

### *Fundaciones sometidas a cargas dinámicas*

Comúnmente, las fundaciones trabajan para soportar cargas estáticas; no obstante, como ya se explicó en párrafos anteriores, existen algunos casos en los que se ven sometidas a cargas dinámicas; estas son, según Fimbres y Cecilia (s.f.), cargas que varían en magnitud, dirección, sentido y/o punto de aplicación en función del tiempo, como por ejemplo las generadas por sismos, viento, maquinarias, entre otras fuentes.

Esto hace que la fundación sea un sistema estructural dinámicamente cargado, definido por Jumikis (1969) como “aquel en el que las cargas actuantes imparten aceleración a la masa del sistema, induciendo así fuerzas inerciales de magnitud considerable” (p. 298). De acuerdo con dicho autor, el cálculo de estas fundaciones en este caso es más complejo que cuando las cargas actuantes son meramente estáticas, ya que entra en juego no solo la magnitud, dirección, sentido y punto de aplicación de las fuerzas, sino la función de variación respecto al tiempo de las mismas, y las propiedades dinámicas del suelo (amortiguamiento, módulo de corte, módulo de Poisson, capacidad de disipación de la energía, etc.).

Sin embargo, se puede destacar que, entre las cargas dinámicas, hay algunas que son accidentales, tomadas en cuenta a la hora de diseñar la mayoría de las estructuras (como las de viento y sismo), y hay otras que están presentes durante toda su vida útil por el uso al que está destinada, como las generadas por equipos o maquinaria que operan con el movimiento constante de alguna o algunas de sus partes, sobre los cimientos en los que se apoyan.

Atendiendo a este último caso (que representa parte del objeto de estudio de esta investigación), se debe tener en cuenta que, para construir estas soluciones estructurales, es necesario realizar un análisis que asegure el trabajo del equipo sin inconvenientes. Según Fratelli (1993), cuando las cargas transmitidas a la fundación son de tipo dinámico, es importante analizar el comportamiento y la deformación del suelo; el problema se agrava cuando el equipo posee partes móviles que no están balanceadas, es decir, que las fuerzas que generan las masas en movimiento no

coinciden con el eje de rotación del equipo, generando trepidaciones en el cimiento, lo que puede generar fatiga en los materiales que lo constituyen y/o en el equipo.

Existen criterios básicos para diseñar este tipo de fundaciones que permiten evadir daños, como asegurar un espesor suficiente para evitar el deterioro de los materiales, compactación del suelo evitando la proximidad con el nivel freático, vinculación rígida entre el equipo y la cimentación para asegurar la correcta transmisión de las cargas, excentricidades reducidas entre el centro de gravedad del equipo y el de la cimentación, y un diseño del sistema con frecuencia natural alejada de la frecuencia operativa del equipo para evitar el fenómeno de resonancia.

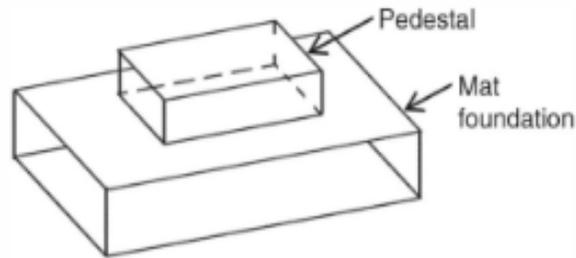
### ***Tipos de fundaciones sometidas a cargas dinámicas***

Como bien se explicó antes, existen dos grandes grupos de fundaciones que aplican también para aquellas cargadas dinámicamente: las directas, consistentes en un bloque que transmite las cargas directamente sobre el terreno, y las indirectas, que nacen como alternativa para llevar a cabo construcciones sobre suelos con pésimas condiciones; estas, por sus características, son de mayor profundidad y un ejemplo común de ellas son los pilotes. Cabe aclarar que el presente trabajo se delimita entorno al estudio de fundaciones directas.

Si bien las dos grandes clasificaciones de las fundaciones, como se mencionó anteriormente, son las directas e indirectas, la guía técnica ACI 351.3R-18 (2018) especifica y define los tipos más comunes de fundaciones en el campo de las cargas dinámicas; estos son:

- **Fundaciones tipo bloque:** como su nombre lo indica, posee la forma de bloque a la que se está acostumbrado, estando enterrada hasta cierto espesor de la misma. Posee la ventaja de disminuir los momentos generados por fuerzas horizontales, ya que la diferencia de nivel entre el punto de aplicación de las cargas dinámicas y el centro de gravedad del sistema equipo-cimentación es reducida. Se diseñan como estructura

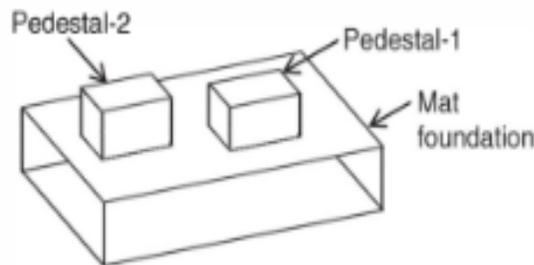
rígida, haciendo que su respuesta dinámica dependa solo de las cargas dinámicas, de su masa, dimensiones y las características del suelo.



**Figura 10: *Fundación tipo bloque***

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

- **Fundaciones tipo bloque combinado:** los bloques combinados se usan para soportar máquinas cercanas; en este caso, a la hora de diseñarlos, es necesario tomar en cuenta la combinación de fuerzas de dos o más máquinas, y la posible falta de rigidez por poseer mayores dimensiones en planta.

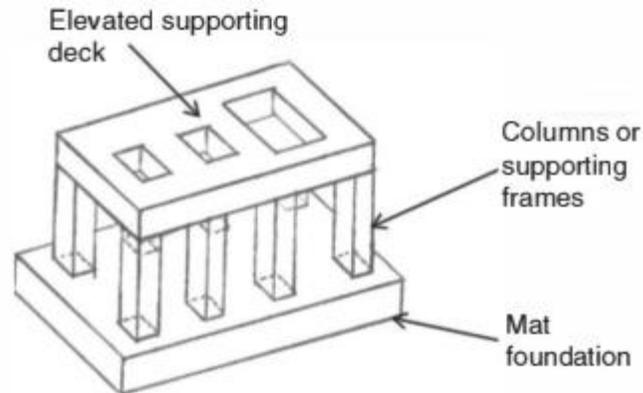


**Figura 11: *Fundación tipo bloque combinado***

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

- **Fundación aporticada o tipo mesa:** empleadas cuando es necesario elevar la maquinaria por requerimientos de procesos o permitir el paso por debajo de la misma de ductos, tuberías, plataformas de mantenimiento, etc. Estas estructuras están pensadas para comportarse de manera flexible, por lo que su respuesta a cargas dinámicas puede ser un objeto de estudio complejo, además de depender del

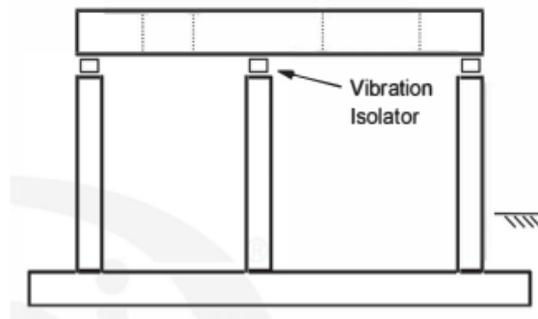
movimiento de los miembros estructurales (columnas, vigas y fundación) y del suelo sobre el cual se apoya.



**Figura 12: *Fundación tipo mesa***

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

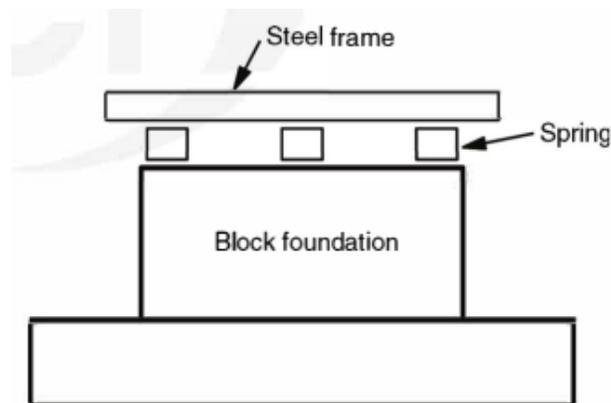
- **Fundación tipo mesa con aisladores:** se colocan aisladores al final del tope de las columnas que sostienen la “mesa” sobre la cual se apoya la máquina para reducir la respuesta a las cargas dinámicas. La efectividad de los aisladores depende del amortiguamiento, la velocidad de la máquina y la frecuencia natural de la fundación.



**Figura 13: *Fundación tipo mesa con aisladores***

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

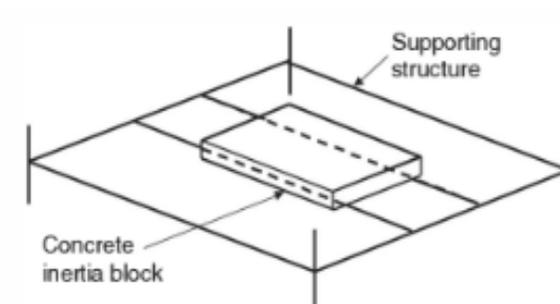
- **Equipos suspendidos sobre fundaciones tipo bloque:** en este caso, la maquinaria se suspende con resortes para reducir las fuerzas de conexiones de tuberías; a su vez, estos resortes se apoyan sobre una fundación tipo bloque.



**Figura 14: Equipo suspendido sobre fundación tipo bloque**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

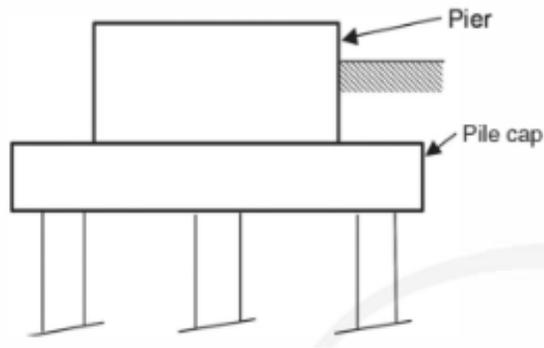
- **Bloques de inercia:** cuando los equipos se encuentran sobre una estructura, se emplean estos bloques de inercia, que alejan la frecuencia natural del sistema equipo-fundación de la frecuencia de operación del equipo, y reducen amplitudes a través del incremento de la inercia.



**Figura 15: Bloque de inercia**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

- **Fundaciones profundas:** como pilas y pilotes, empleadas para apoyar indirectamente cualquier tipo de fundación mencionado anteriormente, cuando las presiones admisibles del suelo son muy bajas, pudiendo ocasionar asentamientos perjudiciales para la estructura; estas se calculan para que trabajen por fricción y/o apoyo de punta. Las cargas horizontales son transferidas al suelo por el contacto del mismo con la zona lateral del pilote.



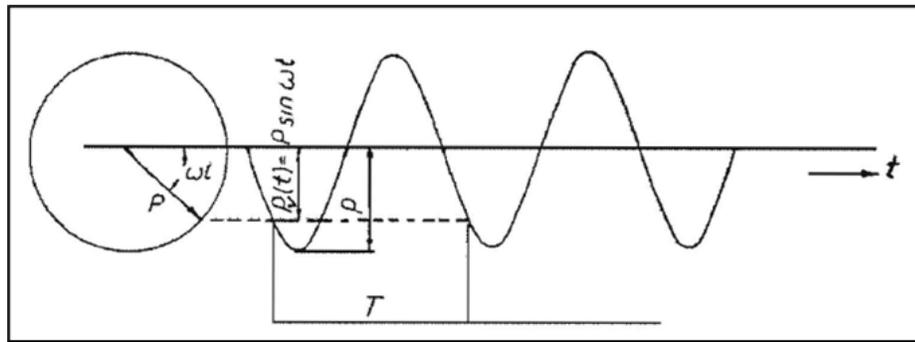
**Figura 16: *Fundación profunda***

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

### ***Tipos de equipos que generan cargas dinámicas***

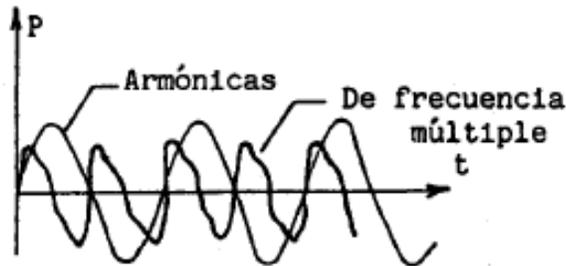
Los equipos que generan cargas dinámicas se pueden clasificar de diferentes maneras; Fratelli (1993) los clasifica según el tipo de carga dinámica que generan, ya que, como bien expresa Das (1989), “el tipo de carga dinámica en el suelo o en la fundación de una estructura depende de la naturaleza de la fuente que la produce” (p. 1); estas cargas varían en su magnitud, dirección o posición a medida que transcurre el tiempo.

De acuerdo con este último autor, existen diferentes clasificaciones de las cargas dinámicas; una de las más conocidas son las periódicas y no periódicas; las primeras varían su magnitud, pero se repiten en un ciclo con intervalos regulares, como, por ejemplo, las generadas por fuerzas centrífugas o por movimientos de vaivén originados por máquinas con elementos rotativos o reciprocantes. Fratelli (1993), además, subdivide las cargas periódicas en armónicas y de frecuencia múltiple; las armónicas son comúnmente fuerzas oscilantes, que cambian según funciones sinusoidales en el tiempo, mientras que las segundas varían en frecuencia y amplitud.



**Figura 17: Gráfica de carga armónica periódica vs. tiempo**

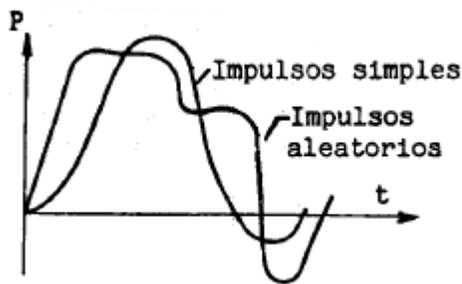
Fuente: Desing Foundation for Dynamic Loads (ASCE) 2008



**Figura 18: Gráficas de cargas periódicas en función del tiempo**

Fuente: Fratelli (1993)

Por otro lado, las no periódicas carecen de intervalos regulares en sus ciclos, como las cargas sísmicas, de viento o provenientes de un golpe repentino sin réplica generado por máquinas de choque cuando dejan caer una masa de forma brusca; diversos autores, a diferencia de Fratelli (1993), consideran dentro de esta clasificación las cargas de frecuencia múltiple. Otra clasificación de las cargas dinámicas, según Das (1989), son las determinísticas y no determinísticas, que va referida a si pueden o no, respectivamente, ser definidas como función del tiempo.



**Figura 19: Gráficas de cargas aperiódicas en función del tiempo**

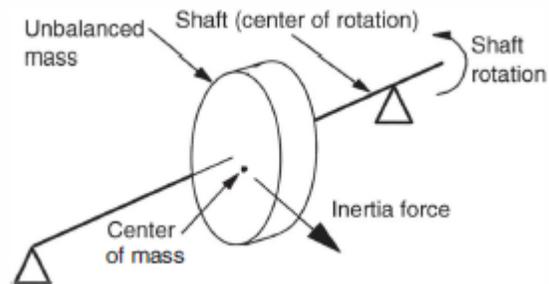
Fuente: Fratelli (1993)

Continuando con los equipos que generan cargas dinámicas, también pueden clasificarse según su frecuencia de operación; Fratelli (1993) establece que si trabaja entre 0 a 300 rev/min se trata de un equipo de baja frecuencia; de 300 a 1000 rev/min, equipo de mediana frecuencia, entre a 1000 y 3000 rev/min, de alta frecuencia, y mayor a 3000 rev/min, de muy alta frecuencia.

Esta clasificación está igualmente sustentada por Srinivasulu y Vaidyanathan (1977), quienes indican que las máquinas de baja frecuencia generalmente son grandes motores reciprocantes, para los que normalmente se emplean fundaciones tipo bloque con gran área de contacto entre el suelo y la fundación; los equipos de frecuencia media son motores reciprocantes medianos, como motores de gas y combustible, para los que también sugieren fundaciones tipo bloque; y que los equipos de alta frecuencia están representados por motores de combustión interna, motores eléctricos y turbogeneradores, para los que se recomiendan cimientos masivos con poca área de contacto con el suelo, y fundaciones aporticadas para turbomáquinas.

Sin embargo, una clasificación muy común (y la de mayor relevancia dentro de esta investigación), es según el mecanismo de funcionamiento; en primer lugar, se encuentran las máquinas rotativas o centrífugas (mayormente equipos de baja frecuencia), que no son más que máquinas con componentes que giran, generando fuerzas no balanceadas cuando el centro de masa de los componentes rotativos no

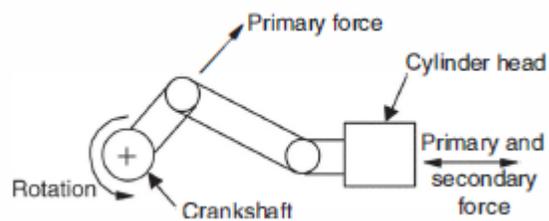
coincide con el eje de rotación (ACI 351.3R-18, 2018), como, por ejemplo, ventiladores, motores, turbinas de gas y vapor, etc.



**Figura 20: Diagrama de una máquina rotativa**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

Por otro lado, se encuentran los equipos recíprocos, en los que uno o varios pistones se mueven dentro de cilindros, interactuando con gases, a través de un mecanismo de manivela deslizante, impulsando o siendo impulsado por un cigüeñal giratorio; tal es el caso de compresores y motores (ACI 351.3R-18, 2018).



**Figura 21: Diagrama de una máquina recíproca**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

Y, por último, las máquinas impulsivas o de impacto, que operan con golpes regulados o choques entre diferentes partes del equipo (ACI 351.3R-18, 2018); generalmente las fuerzas que generan son aperiódicas, ya que trabajan con impactos que se transmiten a la cimentación, propagándose incluso a los alrededores, dando lugar a fuerzas desequilibrantes que deben ser objeto de estudio. Entre estas se encuentran los martillos de forja, martinets, guillotinas y prensas.

## *Diseño de Fundaciones Sometidas a Cargas Dinámicas*

El diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas se basa fundamentalmente en el estudio de la respuesta dinámica del sistema suelo-fundación y en la verificación del cumplimiento con la vibración permisible y desempeño estructural. La guía técnica ACI 351.3R-18 (2018), esquematiza el diseño de este tipo de cimentaciones como se muestra a continuación:

- Determinar unas dimensiones preliminares para la fundación usando un procedimiento como la regla del pulgar o el de cargas estáticas equivalentes, tomando en cuenta la experiencia del ingeniero, recomendaciones del fabricante del equipo y cualquier información de interés que esté disponible.
- Calcular los parámetros de vibración, como frecuencia natural, amplitudes, velocidades y aceleraciones, con las dimensiones preliminares.
- Verificar que los parámetros calculados no excedan límites generalmente aceptados o especificaciones del proyecto en cuanto a criterios de respuesta vibratoria.
- Si es necesario, incorporar las modificaciones apropiadas en el diseño de la fundación para ajustar la respuesta vibratoria.
- Chequear la integridad estructural del concreto de la fundación y el sistema de montaje del equipo.
- Si las dimensiones requeridas de la fundación son excesivamente grandes, determinar si es necesario y viable emplear algunas medidas de mitigación de la vibración, como aisladores.

En general, los métodos de diseño de las fundaciones en cuestión han evolucionado con el tiempo; existen tres métodos expuestos en la guía técnica ACI 351.3R-18 (2018): la regla del pulgar, el de cargas estáticas equivalentes y el análisis dinámico. La selección del método apropiado depende mayormente de las características de la

máquina, incluyendo fuerzas no balanceadas, velocidad, peso, ubicación del centro de gravedad, montaje, criterios de respuesta requerida, tipo y tamaño de la fundación.

El diseño comienza con la selección y estudio del tipo, dimensiones y ubicación de la fundación. El tipo de fundación depende de las características geotécnicas del terreno; del tamaño, dimensiones, peso, y fuerzas no balanceadas de la máquina; y las condiciones ambientales y de operación.

La guía técnica ACI 351.3R-18 (2018) establece tres categorías sobre las cuales los ingenieros deben recabar información para el predimensionado de las fundaciones:

1. Características del equipo:

- Función y mecanismo de funcionamiento.
- Peso de la máquina y de sus componentes giratorios.
- Ubicación del centro de gravedad en planta y elevación.
- Rangos de velocidad de operación.
- Magnitud y dirección de las fuerzas no balanceadas y momentos.
- Límites impuestos en la fundación para desplazamientos diferenciales.
- Límites respecto a criterios de respuesta vibratoria: amplitud de vibración, frecuencia, velocidad y aceleración.

2. Información geotécnica:

- Clasificación y tipo de suelo.
- Capacidad de carga admisible del suelo.
- Capacidad admisible de pilotes (cuando aplique).
- Efecto de vibración en el suelo, por ejemplo, riesgo de licuefacción y asentimiento.
- Módulo de reacción de subrasante.

- Módulo de corte dinámico y módulo de Poisson del suelo.
  - Información de amortiguamiento y rigidez del suelo.
3. Condiciones ambientales y contextuales:
- Fuentes de vibración existentes, como equipos, tráfico vehicular, construcción.
  - Susceptibilidad humana o de equipos a la vibración.
  - Amenaza de inundación.
  - Nivel freático.
  - Amenaza sísmica.
  - Viento.
  - Nieve.
  - Rangos de temperatura.

### ***Referencias en el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas***

A continuación, se presenta una descripción de una serie de documentos en forma de guías técnicas desarrolladas por el American Concrete Institute (ACI, siglas en inglés para el Instituto Americano de Concreto), en las que intervinieron numerosos ingenieros, que establecen criterios y recomendaciones generales aplicables en el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.

#### ***ACI 351.3R-18 "Report on Foundations for Dynamic Equipment"***

Es una guía técnica del ACI que proporciona orientación para el diseño y la construcción de cimientos para equipos dinámicos, como bombas, turbinas y compresores, que generan vibraciones y cargas dinámicas tanto en la fundación como en el suelo.

El informe describe los diferentes tipos de cimientos utilizados para equipos dinámicos, incluyendo distintos tipos de cimientos directos e indirectos. También se discuten los materiales de construcción utilizados para cimientos, como concreto reforzado y acero.

Se proporcionan pautas para la evaluación del suelo y la selección del tipo de cimiento adecuado para las condiciones del sitio. De igual manera, se aborda la relevancia de la ingeniería de detalles en la construcción de cimientos para equipos dinámicos, incluyendo la importancia de controlar la vibración y la alineación adecuada del equipo.

### ***ACI 350-06 “Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary”***

La ACI 350-06 es una norma de la American Concrete Institute (ACI) que proporciona pautas para el diseño y la construcción de estructuras de contención de líquidos y otras estructuras de concreto reforzado que retienen materiales como sólidos granulares y gases. Establece requisitos para la resistencia y la durabilidad de estas estructuras, así como pautas para la selección de materiales, incluyendo el concreto y el acero de refuerzo.

La norma también aborda asuntos importantes relacionados con la seguridad, como la protección contra el fuego, la resistencia a terremotos, la prevención de la corrosión y la prevención de la retracción y perjuicios por cambios de temperatura.

### ***ACI 318-19 “Building Code Requirements for Structural Concrete”***

Esta versión del código presenta requisitos y pautas para el diseño y análisis de estructuras de concreto, incluyendo la resistencia a la compresión, la deformación, la resistencia al corte, la flexión y el anclaje. También se proporcionan requerimientos

para la selección de materiales (concreto, acero de refuerzo, otros) utilizados en la construcción de estructuras de concreto.

La norma, de igual manera, contiene requerimientos para la colocación y el curado del concreto, la disposición del refuerzo y la inspección de la construcción. Además, se proporcionan pautas para la evaluación y el mantenimiento de estructuras de concreto existentes.

Es la versión más reciente del Código de Construcción de Concreto Estructural de la American Concrete Institute (ACI) en su versión más reciente. Contiene las especificaciones señaladas en los párrafos anteriores, pero tiene la información particular referida a la separación de las barras de acero de refuerzo para evitar daños por retracción y temperatura.

### ***Principio básico para el estudio de las vibraciones de una fundación***

En general, según Barkan (1962), el estudio de la vibración de una fundación apoyada sobre la superficie del suelo, puede ser reducido al de la vibración de un bloque sólido que descansa en otro sólido elástico semi-infinito. Esto va en armonía con las tres hipótesis propuestas por Fratelli (1993), para analizar el comportamiento dinámico de los cimientos:

- La fundación es un bloque absolutamente rígido que descansa en un medio elástico semi-infinito.
- La fundación es una masa únicamente con propiedades inerciales, sin propiedades elásticas, mientras que el suelo posee propiedades elásticas y no inerciales.
- Existe una relación lineal entre el desplazamiento de la fundación y la reacción del suelo causada por la vibración del equipo.

Un aspecto importante, es tomar en cuenta el tipo de vibración y amortiguamiento que caracterizan el movimiento del sistema, para adecuar el modelo matemático a dichas condiciones, ya que de esto dependerá la solución al problema.

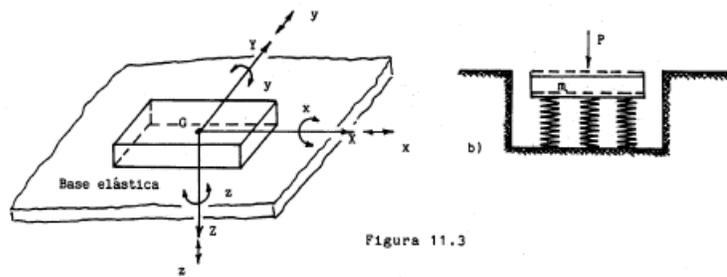
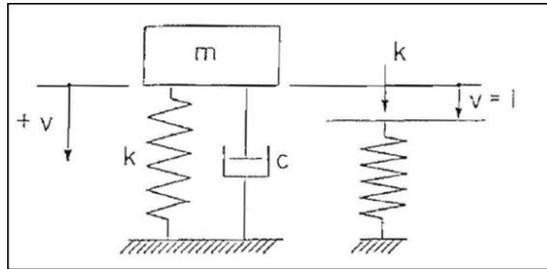


Figura 11.3



**Figura 22: Modelo de bloque apoyado en espacio elástico**

Fuente: Fratelli (1993)

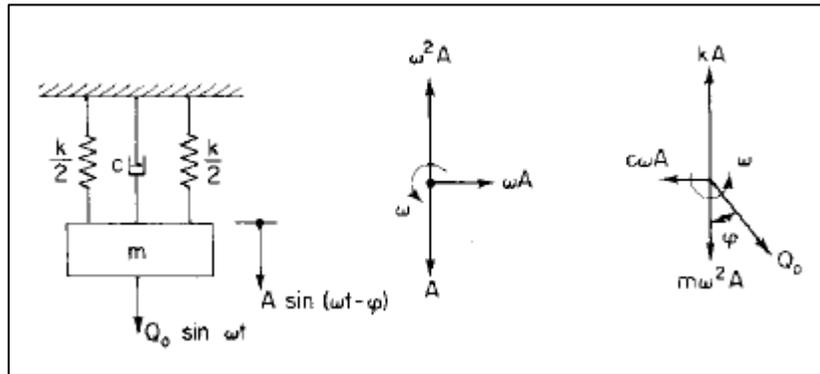
En el caso de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas, dado que la fuerza es producida por un causa exterior al sistema y se toma en cuenta la influencia de las características dinámicas del suelo (elasticidad/rigidez y amortiguamiento), se trata de una vibración forzada con amortiguamiento viscoso, por lo tanto, “el modelo matemático básico usado en el análisis dinámico de sistemas equipo-fundación infinitamente rígidos es una masa concentrada con un resorte y un amortiguador” (ACI 351.3R-18, 2018, p. 19).

Los tres ejes principales de inercia de la masa forman un sistema de coordenadas, haciendo que el movimiento de la misma quede definido por la traslación a lo largo y la rotación alrededor de los mismos. Luego, a través del principio de superposición, se combinan estos 6 movimientos posterior a haberlos analizado por separado, limitando el movimiento de la masa a una sola dirección o rotación en cada caso.

Para este caso, se tiene un sistema sometido a la acción de una fuerza armónica  $Q(t)$  que genera en él una vibración forzada, como el del modelo presentado en la figura 23,

ocasionando un movimiento oscilatorio amortiguado, descrito por la siguiente ecuación de fuerzas que obedece a la segunda Ley de Newton:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = Q = Q_o \sin(\omega t - \phi)$$

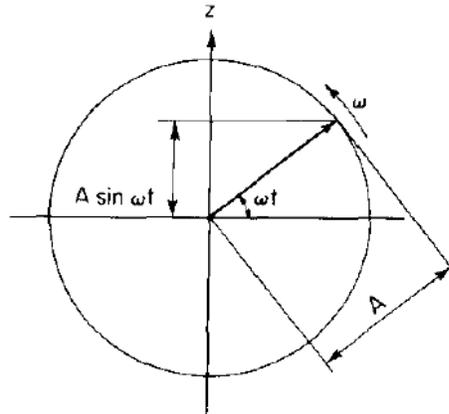


**Figura 23:** Diagrama de cuerpo libre de sistema vibratorio

Fuente: Richart et al. (1970).

Como la fuerza aplicada es armónica, también es correcto asumir que lo es la fuerza de inercia del resorte; de acuerdo con esto y atendiendo a la teoría de ecuaciones diferenciales, la función del desplazamiento del sistema está dada por:

$$z(t) = A \sin(\omega t - \phi)$$



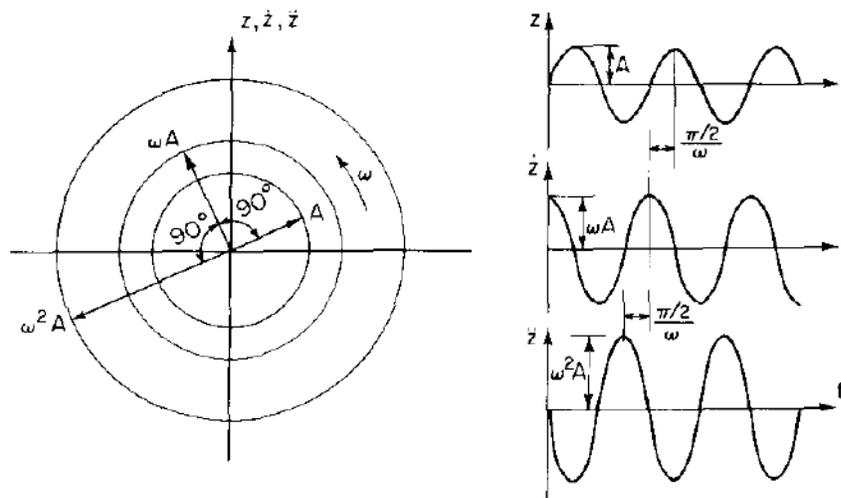
**Figura 24: Representación vectorial de un movimiento armónico**

Fuente: Richart et al. (1970).

Y derivando, se obtiene:

$$\dot{z}(t) = A\omega \cos(\omega t - \phi)$$

$$\ddot{z}(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t - \phi)$$



**Figura 25: Representación vectorial de desplazamiento, velocidad y aceleración de un movimiento armónico**

Fuente: Richart et al. (1970).

Sustituyendo correspondientemente, se forma un sistema de ecuaciones de fuerzas verticales y horizontales:

$$\sum F_V = -m\omega^2 A + kA - Q_o \cos \phi = 0$$

$$\sum F_H = c\omega A - Q_o \sin \phi = 0$$

Teniendo como resultados las siguientes expresiones (cuya igualdad se mantiene según se indica a pesar de los ajustes algebraicos realizados), por lo que el movimiento del sistema queda totalmente definido, pudiendo determinar el desplazamiento para cualquier instante de tiempo.

$$A = \frac{Q_o}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} = \frac{\frac{Q_o}{k}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2D \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}}$$

$$\tan \phi = \frac{c\omega^2}{k - m\omega^2} = \frac{2D \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Donde:

$$D = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$Q_o = m_r * e * \omega_m^2$$

Por último, la frecuencia a la amplitud máxima está referida a la frecuencia de resonancia para amplitud de fuerza constante, y está dada por la ecuación:

$$f_m = f_n \sqrt{1 - 2D^2}$$

En las ecuaciones anteriores, intervienen las siguientes variables:

$Q$ : fuerza armónica [N]

$Q_o$ : coeficiente de fuerza armónica [N]

$A$ : amplitud de desplazamiento [m]

$\omega$ : frecuencia angular natural [rad/s]

$\omega_n$ : frecuencia angular natural sin amortiguamiento [rad/s]

$\phi$ : ángulo de fase [rad]

$k$ : constante del resorte [N/m]

$D$ : razón de amortiguamiento [adim.]

$c$ : coeficiente de amortiguamiento [kg/s]

$f_m$ : frecuencia a la amplitud máxima (de resonancia) [Hz]

$f_n$ : frecuencia natural sin amortiguamiento [Hz].

### ***Predimensionado de fundaciones sometidas a cargas dinámicas***

Para el diseño de fundaciones de equipos dinámicos, la guía técnica ACI 318.3R-18 (2018) presenta el “método de la regla del pulgar”, llamado así porque se basa en aproximaciones y reglas empíricas para diseñar fundaciones sin necesidad de un cálculo avanzado, fundamentándose en ciertos requerimientos que devienen del conocimiento y experiencia de ingenieros, haciendo una analogía a tanteos que se hacen con “medidas de pulgar”.

El principio fundamental de este método consiste en otorgar suficiente masa al bloque de fundación para que la vibración sea atenuada y absorbida por el sistema suelo-cimentación, teniendo en cuenta que, como se mencionó, esto es válido para fundaciones que no requieren un análisis dinámico profundo (generalmente es el caso

de las fundaciones apoyadas directamente en el suelo o con pilotes); cuando este sea requerido se puede tomar como parte del predimensionado.

El método de la regla del pulgar, es comúnmente utilizado para el diseño de fundaciones para equipos pequeños, de hasta 2270 kgf, que generan menores fuerzas desequilibrantes. Una de estas reglas empíricas, es hacer que la masa del bloque de fundación sea por lo menos tres veces la masa del equipo, en caso de ser rotativo, y hasta cinco veces la masa del equipo para reciprocantes. En el caso de fundaciones sobre pilotes estos factores pueden disminuir a 2,5 y 4 respectivamente.

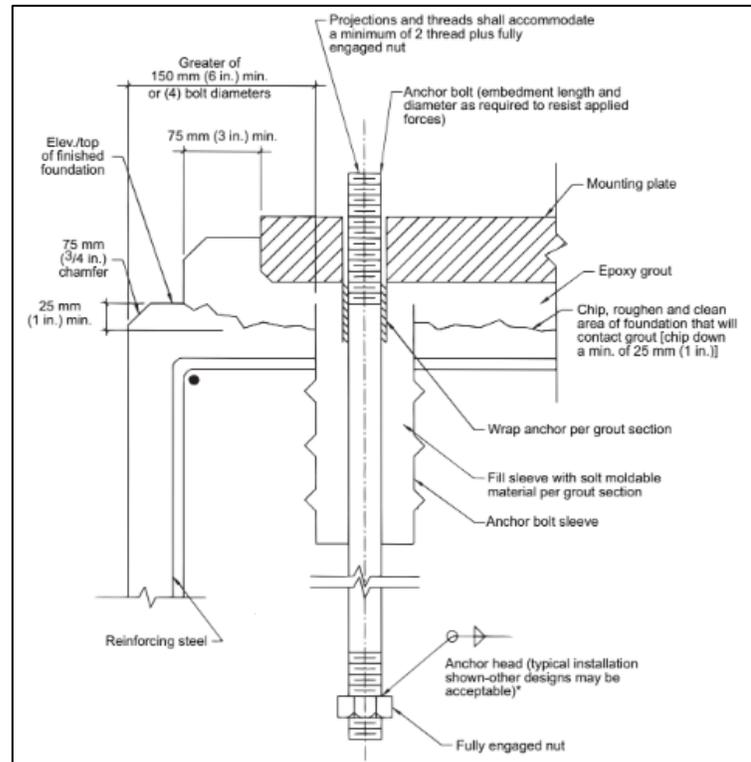
Para lograr estimar las dimensiones de la cimentación, se puede ajustar el largo y ancho junto con los elementos correspondientes al soporte del equipo, y lograr una excentricidad del centro de gravedad del conjunto equipo-cimentación menor al 5% con relación al centro de rigidez. Además, se debe proporcionar suficiente espacio para permitir el mantenimiento necesario durante el funcionamiento.

Asimismo, para definir las dimensiones en planta de la fundación, se recomienda que el ancho mínimo debe ser 1,5 veces la distancia vertical desde la línea central de la máquina hasta la parte inferior del bloque. Todos estos criterios son señalados en la guía técnica ACI 318.3R-18 (2018).

El largo y ancho del bloque de fundación debe tener suficiente área en planta para apoyar la viga soporte (*skid*) del equipo, así como para permitir la colocación de sus pernos de anclaje. Para cumplir con esto, se evalúan dos condiciones, ambas mostradas en la guía técnica “Práctica recomendada para la instalación de maquinaria y el diseño de la instalación” del Instituto Americano de Petróleo (2009), seleccionando la mayor entre:

- Tanto el largo como el ancho de la fundación sobresalen, como mínimo, 7,50 cm del borde de la viga soporte (*skid*) al borde del *grout*.
- Tanto el largo como el ancho de la fundación se incrementa en 15 cm por cada lado, respecto a la separación de los pernos de anclaje más externos.

Esta holgura presente entre el borde del *skid* y el del bloque de fundación, tiene como finalidad otorgar suficiente espacio para el mantenimiento del equipo; dependen de los requerimientos de espaciamiento y diseño de la planta, así como de las especificaciones de diseño del proyecto. Se debe verificar que esta holgura sea suficiente para garantizar el anclaje de los pernos.

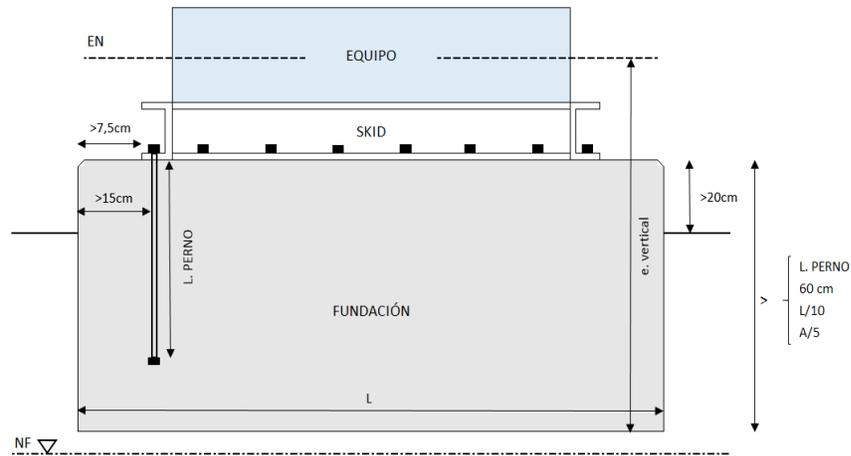


**Figura 26: Detalle típico de perno de anclaje**

Fuente: API 686-2009 (2009)

Gazetas (1983), autor al que se hace referencia en la guía técnica ACI 351.3R-18 (2018), indica ciertos criterios para el diseño de estas fundaciones en cuanto a su espesor, haciendo que este permita considerarla un cuerpo rígido: el espesor del bloque debe ser, como mínimo, el mayor valor entre 60 cm, 1/5 del ancho, 1/10 del largo del bloque de fundación, o mayor que la longitud de los pernos de anclaje, de manera que se asegure la rigidez requerida. Tomando en cuenta estos criterios de espesor, se recomienda que sobresalga del piso acabado de 20 a 30 cm. Si esto no se cumple, se

debe llevar a cabo cálculos más elaborados que tomen en cuenta la flexibilidad de la fundación, como el análisis de elementos finitos.



**Figura 27: Dimensiones preliminares propuestas según la regla del pulgar**

Fuente: Inelectra S.A.C.A. (2022)

Cuando se tienen las dimensiones de la fundación que cumplen con los criterios dados, queda como último paso de esta etapa la verificación de las presiones bajo la fundación. Se determinan las presiones en las cuatro esquinas del bloque (ya que son las más desfavorables) a través de la ecuación del estado general de tensiones:

$$\sigma = \frac{W_0}{a * b} \pm \frac{6M_{xx}}{a * b^2} \pm \frac{6M_{yy}}{a^2 * b}$$

Donde:

$\sigma$ : presión o tensión bajo la [Tf/m<sup>2</sup>]

$W_0$ : peso del sistema equipo fundación [Tf]

$M_{xx}$ : momento sobre el eje “x” [Tf-m]

$M_{yy}$ : momento sobre el eje “y” [Tf-m]

$a$ : largo de la fundación [m]

$b$ : ancho de la fundación [m]

Para esto, el fabricante, puede otorgar las cargas que son representativas en la puesta a prueba del equipo (cargas de mantenimiento, operación, construcción, cargas sísmicas, de viento, de prueba y apagado del equipo, además del peso propio), así como sus puntos de aplicación. A partir de esto, el ingeniero debe obtener la combinación más desfavorable y así cumplir que las presiones sean menores que la tensión admisible del suelo dividida por un factor de seguridad que, generalmente, se encuentra entre 2 y 3, ya que, a pesar de que los estudios de suelos incorporan un factor de seguridad, este suele contemplar solo cargas estáticas, por lo que se recomienda tomar otro adicional en el caso de que se incluyan también cargas dinámicas. Según la ACI 351.3R-18, las combinaciones de cargas que son frecuentemente usadas por los ingenieros son:

a. Construcción:

- $P + C$
- $P + C + W + R$
- $P + C + S + R$

b. Hidro pruebas:

- $P + T$
- $P + T + L + R$
- $P + T + W + R$

c. Operación normal:

- $P + O + L$
- $P + O + L + W + R$
- $P + O + S + R$

d. Operación anormal

- $P + U + L + W$

e. Mantenimiento:

- $P + M + L + R$

Donde:

P: cargas permanentes

- V: cargas variables
- C: cargas de construcción
- W: cargas de viento
- R: cargas de nieve, hielo o lluvia
- S: cargas sísmicas
- T: cargas de prueba
- O: cargas de operación
- M: cargas de mantenimiento
- U: cargas catastróficas

### *Análisis dinámico*

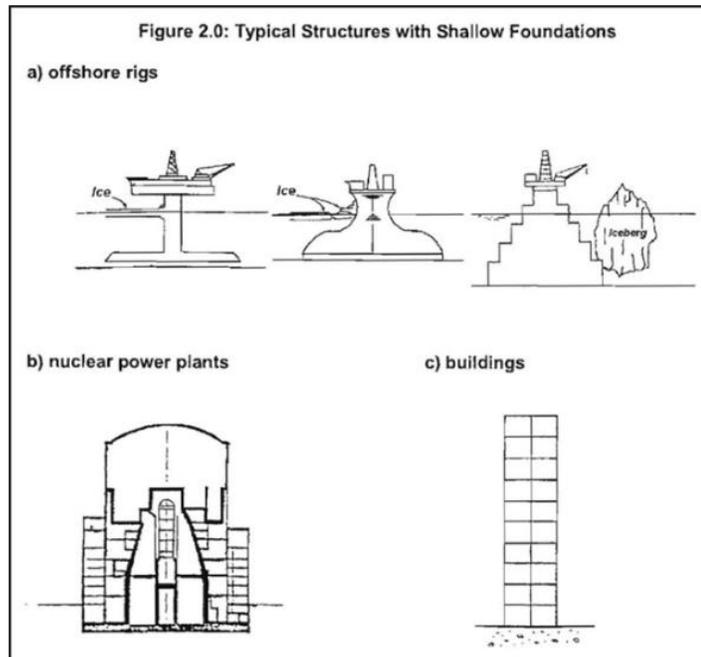
El objetivo del diseño de una fundación sometida a cargas dinámicas es limitar la amplitud de desplazamiento, esto según Gazetas (1983) porque la idea no es poner en peligro el funcionamiento normal de la máquina, ni perturbar el trabajo de los posibles operadores o del mantenimiento. Otro criterio importante para el diseño es evitar la resonancia, ya que con esta se generan amplitudes excesivas.

Este método incorpora un estudio más avanzado y preciso para determinar los parámetros de vibración en equipos con un peso mayor a 2270 kgf (ACI351.3R-18 Art 7.1.2.1, 2018) Art o una potencia mayor a 500 HP (PIP STC01015-17 Art. 3.4.8.3, 2017) En el análisis dinámico el modelo utilizado es el descrito anteriormente, representado por una masa concentrada que incluye la masa de la fundación, del equipo, y en ocasiones la del suelo, con un resorte y un amortiguador, en el que dicha masa posee un solo grado de libertad (ACI 351.3R, 2018). El resorte representa la elasticidad del suelo y es caracterizado por su constante de elasticidad “k”, mientras que el amortiguador representa la capacidad de disipación de energía de dicho suelo.

Cuando el sistema de fundación es infinitamente rígido y está sobre la superficie, la rigidez se puede representar como seis sistemas de masa con resorte dependientes de la frecuencia, donde tres serán de traslación y las otras tres angulares, con un amortiguador cada una también dependientes de la frecuencia, con las mismas características que actúan en el centroide del área de contacto entre la cimentación y el suelo de soporte.

Estas rigideces se pueden definir como la fuerza que produce una extensión unitaria del resorte en la dirección positiva del desplazamiento de la masa analizada. Para un desplazamiento “u” de la masa, la fuerza de restauración se define como “k\*u”.

En casos de cargas dinámicas el desplazamiento varía con el tiempo. Sin embargo, como el resorte no tiene masa, la rigidez dinámica es constante y se mantiene igual a la rigidez estática “kst”, así la fuerza recuperadora del resorte se mantiene y es independiente de la velocidad o frecuencia con la que varía el desplazamiento.



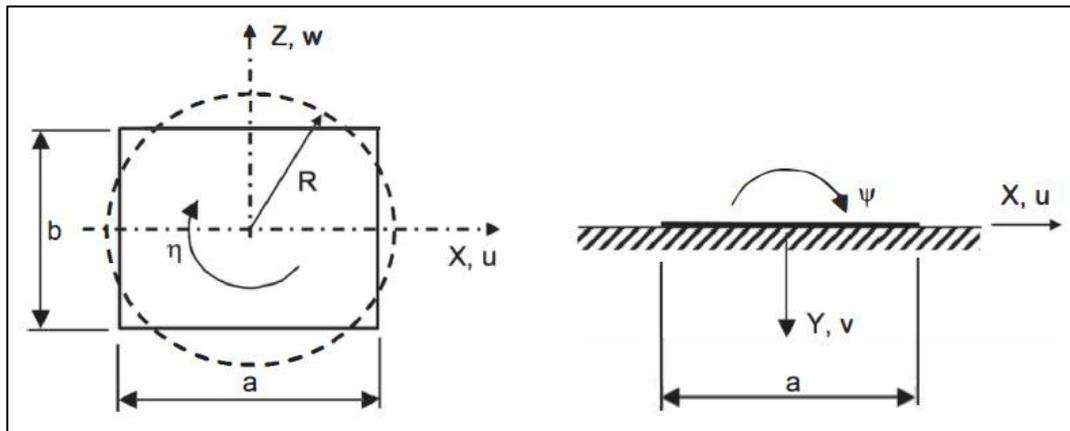
**Figura 28. Estructuras Típicas con Fundaciones Superficiales**

Nota: tomada de ASCE 2008

Empleando la teoría del semi-espacio elástico y asumiendo linealidad, las constantes de rigidez y amortiguamiento podrán ser evaluadas para fundaciones de diferentes geometrías y tipos de suelo.

Para geometría compleja, la ACI 351.3R-18 recomienda obtener la rigidez y el amortiguamiento mediante un análisis dinámico continuo tridimensional y bidimensional que representa el suelo. Aunque la teoría emplea como modelo un disco circular, los resultados pueden ser usados en bases de geometría diferente a la circular, utilizando un radio equivalente siempre y cuando la relación  $a/b$  sea menor que 2 o los resultados de amplitud no estén cerca de límites críticos para la fundación, equipo o personal.

En la Figura 15 se muestra la notación para el cálculo del Radio Equivalente de Bases Rectangulares con dimensiones “a” y “b”.



**Figura 29: Notación para Cálculo del Radio Equivalente de Bases Rectangulares**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

Es importante acotar que, en la continuidad del trabajo, tal como indica la figura anterior, se usarán los subíndices para denotar la componente a la cual se refiere cada variable de la siguiente manera:

- $h$  para una componente horizontal cualquiera.
- $u$  para la componente horizontal paralela a  $x$ .

- $w$  para componente horizontal paralela a  $z$ .
- $v$  para componente vertical (paralela a  $y$ ).
- $\Psi$  para componente rotacional alrededor de algún eje horizontal (volcamiento).
- $\eta$  para componente rotacional alrededor del eje vertical (torsión).

Gazetas (1991) presenta alternativas para el cálculo de una fundación circular con propiedades equivalentes a la rectangular; las tres direcciones de movimiento traslacional comparten un radio equivalente común “R”, y para las tres direcciones rotacionales, existen tres radios únicos con momentos de inercia equivalentes a sus contrapartes rectangulares.

Traslación:

$$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \quad (5.4a)$$

Balanceo (alrededor de un eje paralelo a “b”):

$$R_{\Psi b} = \sqrt[4]{\frac{a^3 b}{3\pi}} \quad (5.4b)$$

Balanceo (alrededor de un eje paralelo a “a”):

$$R_{\Psi a} = \sqrt[4]{\frac{b^3 a}{3\pi}} \quad (5.4c)$$

Torsión:

$$R_{\eta} = \sqrt[4]{\frac{ab(a^2 + b^2)}{6\pi}} \quad (5.4d)$$

Donde:

$R$ : radio equivalente para componentes traslacionales [m]

$R_{\psi b}$ : radio equivalente para la rotación alrededor de un eje paralelo a “b” [m]

$R_{\psi a}$ : radio equivalente para la rotación alrededor de un eje paralelo a “a” [m]

$R_{\eta}$ : radio equivalente para la componente torsional [m]

a: lado largo de la fundación [m]

b: lado corto de la fundación [m]

El radio equivalente trabaja muy bien en áreas cuadradas y en áreas rectangulares que poseen una relación  $a/b < 2$ . A medida que se incrementa la relación  $a/b$ , el grado de exactitud disminuye; por lo que, para fundaciones muy largas, sería conveniente asumir la fundación como una tira infinita.

Por otro lado, se encuentra el parámetro de la frecuencia adimensional, un enfoque comúnmente utilizado para calcular la impedancia de la fundación, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$a_o = \omega R / V_s = \omega R \sqrt{\rho / G} \quad (5.4f)$$

Donde:

$a_o$ : frecuencia adimensional [adim.]

$\omega$ : frecuencia de operación del equipo [rad/s]

$R$ : radio equivalente para componentes traslacionales [m]

$V_s$ : velocidad de onda de corte del suelo [m/s]

$\rho$ : densidad del suelo [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$G$ : módulo de corte dinámico del suelo [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

### *Cálculo de rigidez y coeficiente de amortiguamiento*

Existen dos métodos usados con frecuencia para calcular la rigidez y amortiguamiento, el modelo de Richart-Whitman (1967) y otro por Veletsos. Se debe contar con cierta información del equipo para realizar un modelo correcto del sistema máquina-fundación. Entre los requisitos necesarios están:

- Planos de la máquina indicando dimensiones y posición de los centros de gravedad (CG) horizontal y verticalmente.
- El peso de la máquina y sus partes móviles (rotor o cabezal del martillo).
- Velocidad de operación de la máquina y sus componentes.
- Grado de balanceo o fuerzas desbalanceadas (primarias, secundarias, etc.).
- Dirección de las fuerzas desbalanceadas y su punto de aplicación.
- Criterios para aceptar la fundación (velocidades y amplitudes límites, etc.).
- Posibilidad de equipos accesorios que deban ser soportados por la fundación, debido a que es muy importante que la masa de estos accesorios sea considerada en el análisis, ya que, si es significativa, puede llegar a afectar la posición del centro de gravedad (CG) del sistema y por lo tanto su respuesta dinámica.
- Se necesitan los siguientes parámetros del suelo para realizar el análisis:
  - ρ: densidad del suelo.
  - v: coeficiente de Poisson.
  - G: módulo de corte del suelo y del material de aporte (si llegase a emplearse).
  - D: amortiguamiento del material.
- Recomendación del tipo de fundación a utilizar (capacidad de carga del suelo, profundidad de fundación, largo de pilotes, etc.)
- Mínima profundidad de fundación.

### ***Modelo de Richart-Whitman***

Es un modelo utilizado con frecuencia para la obtención de la rigidez y amortiguamiento para cada modo de vibración, que se considera adecuado para condiciones de suelo uniforme. Para la dirección vertical, las ecuaciones de rigidez y amortiguamiento son válidas en un rango de frecuencia adimensional de  $0 < a_0 < 1$  (Richart, Hall y Woods, 1970). Las otras direcciones están igualmente limitadas, ya que los parámetros de rigidez son en realidad valores de rigidez estáticos.

Las relaciones de masa y amortiguamiento recomendadas por Richart y Whitman (1967) para fundaciones circulares infinitamente rígidas están dadas por:

Vertical:

$$B_v = \frac{1 - \nu}{4} * \frac{m}{\rho R^3} \quad (5.4.1.1a)$$

$$D_v = \frac{0.425}{\sqrt{B_v}} \quad (5.4.1.1b)$$

Horizontal:

$$B_u = \frac{7 - 8\nu}{32(1 - \nu)} * \frac{m}{\rho R^3} \quad (5.4.1.1c)$$

$$D_u = \frac{0.288}{\sqrt{B_u}} \quad (5.4.1.1d)$$

Balanceo:

$$B_\psi = \frac{3(1 - \nu)}{8} * \frac{I_\psi}{\rho R_\psi^5} \quad (5.4.1.1e)$$

$$D_\psi = \frac{0.15}{(1 + B_\psi)\sqrt{B_\psi}} \quad (5.4.1.1f)$$

Torsión:

$$B_{\eta} = \frac{I_{\eta}}{\rho R_{\eta}^5} \quad (5.4.1.1g)$$

$$D_{\eta} = \frac{0.50}{(1 + 2B_{\eta})} \quad (5.4.1.1h)$$

Donde:

$B_i$ : razón de masa en la componente  $i$  [adim.]

$D_i$ : razón de amortiguamiento [adim.]

$\nu$ : módulo de Poisson del suelo [adim.]

$m$ : masa del sistema equipo-fundación [kg]

$R_i$  : radio equivalente en la componente  $i$  [m]

$I_i$ : inercia respecto en la componente  $i$  [m<sup>4</sup>]

$\rho$ : densidad del suelo [kg/m<sup>3</sup>]

Asimismo, propone las siguientes ecuaciones para el cálculo de la rigidez en fundaciones con relación  $a/b < 2$ :

Vertical:

$$k_v = \frac{4}{(1 - \nu)} GR_v \quad (5.4.1.1i)$$

Horizontal:

$$k_h = \frac{32(1 - \nu)}{(7 - 8\nu)} GR_h \quad (5.4.1.1j)$$

Balanceo:

$$k_{\psi} = \frac{8}{3(1-\nu)} GR_{\psi}^3 \quad (5.4.1.1k)$$

Torsión:

$$k_{\eta} = \frac{16}{3} GR_{\eta}^3 \quad (5.4.1.1l)$$

Donde:

$k_i$ : rigidez en la componente  $i$  [N/m para componentes traslacionales y N-m para componentes rotacionales]

$G$ : módulo de corte dinámico del suelo [N/m<sup>2</sup>]

$R_i$ : radio equivalente en la componente  $i$  [m]

$\nu$ : módulo de Poisson del suelo [adim.]

Sin embargo, este método otorga ecuaciones para calcular la rigidez, desarrolladas para ser aplicadas cuando la relación largo/ancho ( $a/b$ ) es mayor que 2, utilizando directamente las dimensiones de la fundación rectangular. En estas ecuaciones, los valores de  $\beta_i$  varían con la relación  $a/b$  del rectángulo de fundación. El valor de  $\beta_v$  para la vibración vertical varía de aproximadamente 2,1 a 2,8,  $\beta_u$  para la vibración horizontal varía de 0,95 a 1,2, y  $\beta_{\psi}$  para la vibración de balanceo varía de 0,35 a 1,25. Existe una gráfica que permite obtener el valor aproximando de estos parámetros, que se puede observar en la figura 18.

Es necesario acotar, que no hay solución para la rigidez torsional cuando la fundación es cuadrada, por lo que, para este valor, es válido utilizar la rigidez torsional obtenida con el radio equivalente (Arya et al, 1979), señalada en la ec. 5.4.1.1l.

Vertical:

$$k_v = \frac{G}{(1-\nu)} \beta_v \sqrt{ab} \quad (5.4.1.1m)$$

Horizontal:

$$k_u = 2(1 + \nu)G\beta_u\sqrt{ab} \quad (5.4.1.1n)$$

Balaceo (alrededor de un eje paralelo a “b”):

$$k_\psi = \frac{G}{(1 - \nu)}\beta_\psi ba^2 \quad (5.4.1.1o)$$

Donde:

$k_i$ : rigidez en la componente  $i$  [N/m para componentes traslacionales y N-m para componentes rotacionales]

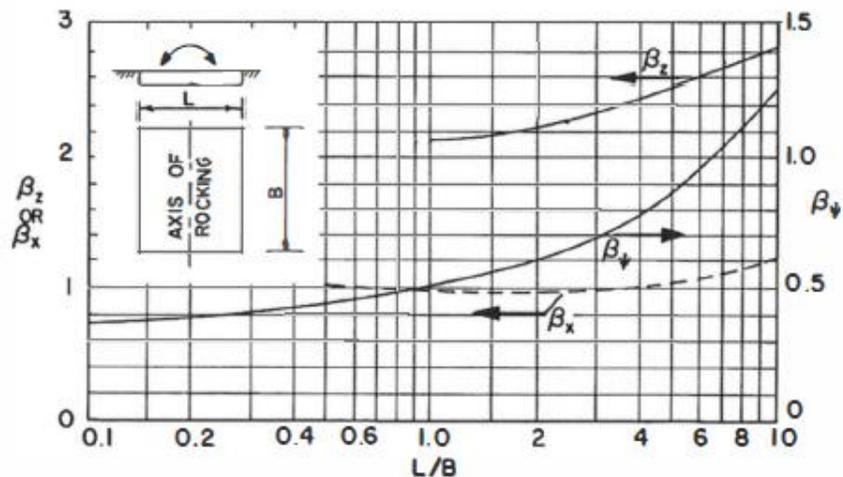
$\nu$ : módulo de Poisson del suelo [adim.]

$G$ : módulo de corte dinámico del suelo [N/m<sup>2</sup>]

$\beta_i$ : coeficiente para fundaciones rectangulares [adim.]

$a$ : lado largo de la fundación [m]

$b$ : lado corto de la fundación [m]



**Figura 30. Coeficientes para fundaciones rectangulares**

Fuente: Richart et al. (1970)

Los parámetros de amortiguamiento “ $c_i$ ” se pueden determinar a partir de la rigidez y la razón de amortiguamiento, usando también la masa del sistema “ $m$ ” para las componentes traslacionales (ec. 5.4.1.1p) y el momento de inercia  $I_i$  para las componentes rotacionales (ec. 5.4.1.1q):

$$c_i = 2D_i\sqrt{k_i m} \quad (5.4.1.1p)$$

$$c_i = 2D_i\sqrt{k_i I_i} \quad (5.4.1.1q)$$

### ***Modelo de Veletsos***

Veletsos y Wei (1971), Veletsos y Verbic (1973) y Veletsos y Nair (1974), formularon ecuaciones apropiadas que representan la impedancia al movimiento ofrecida por condiciones uniformes del suelo. Desarrollaron estas formulaciones utilizando la suposición de un semi-espacio elástico o viscoelástico uniforme y el movimiento relacionado de una base rígida o flexible en este semi-espacio, compuesto por movimientos traslacionales y rotacionales. Si bien los cálculos pueden ser tediosos manualmente, la implementación por medio de programas tecnológicos proporciona una eficiencia aceptable.

Para los cimientos circulares infinitamente rígidos que descansan sobre la superficie de un semi-espacio viscoelástico, Veletsos y Verbic (1973), determinaron las expresiones analíticas para la impedancia dinámica en función de la frecuencia, razón de Poisson, y amortiguamiento interno del material. Las ecuaciones para el cálculo de los coeficientes de impedancia son:

Impedancia horizontal:

$$k_u^* = \frac{8GR}{2 - \nu} [1 + ia_o\alpha_i] \quad (5.4.1.2a)$$

Impedancia Vertical:

$$k_v^* = \frac{4GR}{(1-\nu)} [(1 - X_v - Y_3 a_o^2) + ia_o(Y_4 + \psi_v)] \quad (5.4.1.2c)$$

Donde:

$$X_v = \frac{Y_1 * (Y_2 a_o)^2}{1 + (Y_2 a_o)^2}$$

$$\psi_v = \frac{Y_1 Y_2 * (Y_2 a_o)^2}{1 + (Y_2 a_o)^2}$$

Impedancia de balanceo:

$$k_\psi^* = \frac{8GR}{3(1-\nu)} [(1 - X_\psi - \beta_\psi a_o^2) + ia_o \psi_\psi] \quad (5.4.1.2b)$$

Donde:

$$X_\psi = \frac{\beta_1 * (\beta_2 a_o)^2}{1 + (\beta_2 a_o)^2}$$

$$\psi_\psi = \frac{\beta_1 \beta_2 * (\beta_2 a_o)^2}{1 + (\beta_2 a_o)^2}$$

Impedancia Torsional:

$$k_\eta^* = \frac{16GR_\eta^3}{3} [A + ia_o B] \quad (5.4.1.2d)$$

Donde:

$$A = 1 - \frac{b_1 (b_2 a_o)^2}{1 + (b_2 a_o)^2}$$

$$B = \frac{b_1 b_2 (b_2 a_o)^2}{1 + (b_2 a_o)^2}$$

$$b_1 = 0,425 \text{ y } b_2 = 0,687$$

Para las ecuaciones anteriores, se tiene la siguiente nomenclatura:

$k_i^*$ : impedancia dependiente de la frecuencia en la dirección  $i$  [adim.]

$G$ : módulo de corte dinámico del suelo [N/m<sup>2</sup>]

$R_i$ : radio equivalente en la componente  $i$  [m]

$a_o$ : frecuencia adimensional [adim.]

$\alpha_1, \beta_j, \gamma_j$ : coeficientes en la dirección  $j$  [adim.]. Se obtienen de la figura 19.

Los parámetros para realizar el cálculo de la rigidez se pueden obtener realizando una interpolación de los valores presentados en la siguiente tabla, ingresando a la misma con el módulo de Poisson del suelo ( $\nu$ ).

**Table 4.1—Values of  $\alpha_1$ ,  $\beta_j$ , and  $\gamma_j$**

	$\nu = 0$	$\nu = 0.33$	$\nu = 0.45$	$\nu = 0.50$
$\alpha_1$	0.775	0.650	0.600	0.600
$\beta_1$	0.525	0.500	0.450	0.400
$\beta_2$	0.800	0.800	0.800	0.800
$\beta_3$	0.000	0.000	0.023	0.027
$\gamma_1$	0.250	0.350	—	0.000
$\gamma_2$	1.000	0.800	—	0.000
$\gamma_3$	0.000	0.000	—	0.170
$\gamma_4$	0.850	0.750	—	0.850

**Figura 31. Tabla de coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\beta_j$ ,  $\gamma_j$**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018)

### ***Ajuste de rigidez y coeficiente de amortiguamiento***

Posteriormente, es necesario realizar un ajuste de la rigidez y amortiguamiento para considerar la amortiguación del material, ya que hasta ahora se estaba asumiendo una

elasticidad perfecta, tomando en cuenta que el amortiguamiento era puramente geométrico; de esta manera se evita la sobreestimación de la amplitud de desplazamiento traslacional y de volcamiento. Para ello se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$k_i(ajus) = k_i - 2\beta_m \omega c_i \quad (5.4.4. b)$$

$$c_i(ajus) = c_i + 2\beta_m k_i / \omega \quad (5.4.4. c)$$

Hasta ahora, los cálculos asumen que la fundación reposa sobre el suelo, pero en la mayoría de los casos no es así, sino que se encuentran embebidas (enterradas) hasta cierto espesor. Esto, según ciertos estudios, aumenta la rigidez y el amortiguamiento, por lo que tal hecho debe ser tomado en cuenta.

Una asunción que conlleva a una aproximación efectiva (sobre todo cuando se usa relleno para enterrar al bloque de fundación) es que las reacciones del suelo sobre la base del cimiento son las mismas que las de una fundación apoyada sobre la superficie del suelo (semi-espacio), y que las reacciones en los lados del bloque son iguales que las que generaría una capa independiente sobrepuesta sobre la superficie; todas estas reacciones se simplifican y se calculan asumiendo deformaciones planas, lo que significa que se asume a las reacciones actuando sobre un cilindro rígido, sin masa y de largo infinito, en un movimiento uniforme en un medio infinitamente homogéneo.

Esto permite tomar en cuenta la radiación de energía a través de la propagación de onda, permite tomar en cuenta la variación de las propiedades del suelo con la profundidad (esto no aplica en este caso) y también permite usar las soluciones de fundaciones superficiales, porque, de hecho, el efecto de la capa independiente sobrepuesta sobre la superficie representa una corrección aproximada a la solución del semi-espacio por efecto del embebido de la fundación (ACI 351.3R-18, 2018).

Las ecuaciones que se muestran a continuación representan la impedancia, que es un valor complejo, en el que la parte real está representada por la rigidez, y la parte

imaginaria por el amortiguamiento; cada una se suma al parámetro correspondiente para corregirlos tomando en cuenta el embebido de la fundación.

Dirección horizontal:

$$k_{eu}^* = G_s l [S_{u1} + i a_o S_{u2}] \quad (5.4.3a)$$

Impedancia Vertical

$$k_{ev}^* = G_s l [S_{v1} + i a_o S_{v2}] \quad (5.4.3b)$$

Impedancia de Balanceo

$$k_{e\psi}^* = G_s k_\psi^2 [S_{\psi1} + i a_o S_{\psi2}] \quad (5.4.3c)$$

Impedancia Torsional

$$k_{e\eta}^* = G_s k_\eta^2 [S_{\eta1} + i a_o S_{\eta2}] \quad (5.4.3d)$$

Donde:

$k_{ei}^*$ : impedancia por embebido en la dirección  $i$  [adim.]

$G_s$ : módulo de corte dinámico del material de embebido [N/m<sup>2</sup>]

$k_i$ : rigidez en la componente  $i$  [N/m para componentes traslacionales y N-m para componentes rotacionales]

$a_o$ : frecuencia adimensional [adim.]

$S_{i1}, S_{i2}$ : parámetros de rigidez y amortiguamiento para la capa de embebido en la componente  $i$  [adim.]. Se obtienen de la figura 20.

En estas expresiones, el módulo de corte dinámico  $G_s$  es el de la capa lateral de relleno. Los parámetros adimensionales  $S_{i1}$  y  $S_{i2}$  se relacionan con la rigidez y amortiguación reales, respectivamente; estos dependen de la frecuencia adimensional, aplicable para la capa de material de relleno. La relación de Poisson afecta solo la

impedancia horizontal generada por el empotramiento de la zapata, y no a la impedancia en otras direcciones. Estos parámetros de  $S_i$  dependen de la amortiguación y están tabulados para suelos granulares y cohesivos, con coeficiente de Poisson de 0,40 y 0,25 respectivamente.

**Table 5.4.1.2—Stiffness and damping parameters ( $D = 0$ )**

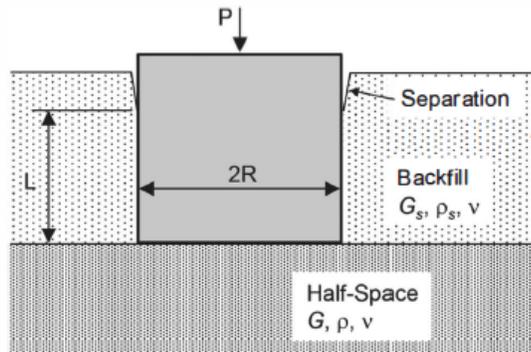
Motion	Soil	Side layer		Half space	
Horizontal	Cohesive	$S_{u1} = 4.1$	$S_{u2} = 10.6$	$C_{u1} = 5.1$	$C_{u2} = 3.2$
	Granular	$S_{u1} = 4.0$	$S_{u2} = 9.1$	$C_{u1} = 4.7$	$C_{u2} = 2.8$
Rocking	Cohesive	$S_{v1} = 2.5$	$S_{v2} = 1.8$	$C_{v1} = 4.3$	$C_{v2} = 0.7$
	Granular	$S_{v1} = 2.5$	$S_{v2} = 1.8$	$C_{v1} = 3.3$	$C_{v2} = 0.5$
Torsion	Cohesive	$S_{\eta1} = 10.2$	$S_{\eta2} = 5.4$	$C_{\eta1} = 4.3$	$C_{\eta2} = 0.7$
	Granular	$S_{\eta1} = 10.2$	$S_{\eta2} = 5.4$	$C_{\eta1} = 4.3$	$C_{\eta2} = 0.7$
Vertical	Cohesive	$S_{v1} = 2.7$	$S_{v2} = 6.7$	$C_{v1} = 7.5$	$C_{v2} = 6.8$
	Granular	$S_{v1} = 2.7$	$S_{v2} = 6.7$	$C_{v1} = 5.2$	$C_{v2} = 5.0$

Note:  $S$  values are valid for  $0.5 < a_v < 1.5$ ;  $C$  values for valid for  $a_v < 2.0$ .

**Figura 32. Parámetros de rigidez y amortiguamiento ( $S_{i1}$  y  $S_{i2}$ )**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018).

Diversos autores han expresado su opinión respecto a qué hacer finalmente con el amortiguamiento, dependiendo de la aplicación que se tenga para la fundación; en 1980 el Electric Power Research Institute (EPRI, atañido en la guía técnica ACI 351.3R-18, 2018) recomendó que la razón de amortiguamiento usada en el diseño de fundaciones para ventiladores en plantas de potencia no debe exceder el 20% para las direcciones horizontales, 50% para la vertical, 10% para volcamiento y 15% para movimiento torsional. Por otro lado, Novak en 1970 (mencionado en la ACI 351.3R-18, 2018) recomienda reducir las razones de amortiguamiento geométrico calculadas analíticamente en un 50% para el análisis dinámico de la fundación. El criterio a utilizar depende, como bien se dijo, de la aplicación estructural en cuestión, pero en especial del criterio del ingeniero.



**Figura 33: Esquema de una fundación embebida**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018).

Otra de las correcciones que tiende a hacerse a la teoría del semi-espacio elástico es cuando el suelo es un depósito superficial apoyado en un substrato rígido, pero esto no se tomará en cuenta en el presente trabajo ya que se asume al suelo como un medio puramente homogéneo.

#### ***Cálculo de amplitud de desplazamiento***

Para el cálculo de la amplitud se recomienda tomar los valores de rigidez y amortiguamiento obtenidos mediante el modelo de Richart-Whitman. Luego, es necesario conocer el valor de la fuerza no balanceada, que en muchos casos es dada por el fabricante de la máquina; en caso contrario, se podrá determinar haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$F_o = \frac{m_r e_m \omega_o^2 S_f}{1000} \quad (4.3.1.1)$$

Dónde:

$F_o$ : fuerza dinámica [N]

$m_r$ : masa de los componentes rotativos de la máquina [kg]

$e_m$ : excentricidad de la masa [mm]

$\omega_o$ : frecuencia angular de operación de la máquina [rad/s]

$S_f$ : factor de servicio, usado para tomar en cuenta el incremento del desequilibrio durante la vida útil del equipo; varía entre 2 y 2,5 según criterios del ingeniero.

Otras veces, los equipos son fabricados con una calidad de equilibrio inicial, ya sea de acuerdo con criterios del fabricante o especificaciones del comprador. Ese grado de calidad de balance está definido por un factor “Q” definido por el producto de  $e_m * \omega_o$  según las normas ISO 1 940- 1 y ASA/ANSI S2.19 (mencionadas en ACI 351.3R-18, 2018). Sustituyendo esto en la ecuación anterior, se obtiene:

$$F_o = \frac{m_r Q \omega_o S_f}{1000} [N] \quad (4.3.1.2a)$$

$$Q = e_m * \omega_o \left[ \frac{mm}{s} \right]$$

Los valores de  $e_m$  y  $\omega_o$  o directamente  $Q$  son provistos normalmente por el fabricante del equipo; en el caso de no ser suministrados, se puede recurrir a la siguiente tabla, que establece los valores de  $Q$  de acuerdo con el grado de calidad de balance y al tipo de equipo:

**Table 4.3.1.2—Balance quality grades for selected groups of representative rigid rotors\***

Balance quality guide	Product of $e_m \omega_o$ , in./s (mm/s)	Rotor types—general examples
G1600	63 (1600)	Crankshaft/drives of rigidly mounted, large, two-cycle engines
G630	25 (630)	Crankshaft/drives of rigidly mounted, large, four-cycle engines
G250	10 (250)	Crankshaft/drives of rigidly mounted, fast, four-cylinder diesel engines
G100	4 (100)	Crankshaft/drives of fast diesel engines with six or more cylinders
G40	1.6 (40)	Crankshaft/drives of elastically mounted, fast four-cycle engines (gasoline or diesel) with six or more cylinders
G16	0.6 (16)	Parts of crushing machines; drive shafts (propeller shafts, cardan shafts) with special requirements; crankshaft/drives of engines with six or more cylinders under special requirements
G6.3	0.25 (6.3)	Parts of process plant machines; centrifuge drums, paper machinery rolls, print rolls; fans; flywheels; pump impellers; machine tool and general machinery parts; medium and large electric armatures (of electric motors having at least 3-1/4 in [80 mm] shaft height) without special requirement
G2.5	0.1 (2.5)	Gas and steam turbines, including marine main turbines; rigid turbo-generator rotors; turbo-compressors; machine tool drives; medium and large electric armatures with special requirements; turbine driven pumps
G1	0.04 (1)	Grinding machine drives
G0.4	0.015 (0.4)	Spindles, discs, and armatures of precision grinders

\*Excerpted from ASA/ANSI S2.19.

**Figura 34: Grados de calidad de balance para algunos rotores rígidos**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018) tomado de ASA/ANSI S2.19.

Luego, se debe calcular la frecuencia circular natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (5.8.1ff)$$

Dónde:

$\omega_n$ : frecuencia circular natural del sistema equipo-fundación [rad/s]

$k$ : rigidez del sistema suelo-fundación [N/m]

$m$ : masa del sistema equipo-fundación [kg]

$W$ : peso del sistema equipo-fundación [N]

$g$ : aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Como paso siguiente, se debe calcular la razón de amortiguamiento “D” despejando la ecuación 5.4.1.1:

$$D = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2\sqrt{kW/g}} \quad (5.8.1hh)$$

Por último, se calcula el valor de la amplitud de desplazamiento, dado por la ecuación que se muestra a continuación. La unidad de la amplitud es de longitud, esta depende únicamente de la unidad en la que se trabaje la rigidez (k).

$$A = \frac{F_o/k}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_o}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2D * \frac{\omega_o}{\omega_n}\right)^2}} \quad (5.8.1jj)$$

Dónde:

$A$ : amplitud de desplazamiento [m]

$F_o$ : fuerza no balanceada [N]

$k$ : rigidez del sistema suelo-fundación [N/m]

$D$ : razón de amortiguamiento [adim.]

$\omega_n$ : frecuencia angular natural del sistema equipo-fundación [rad/s]

$\omega_o$ : frecuencia angular de operación del equipo [rad/s]

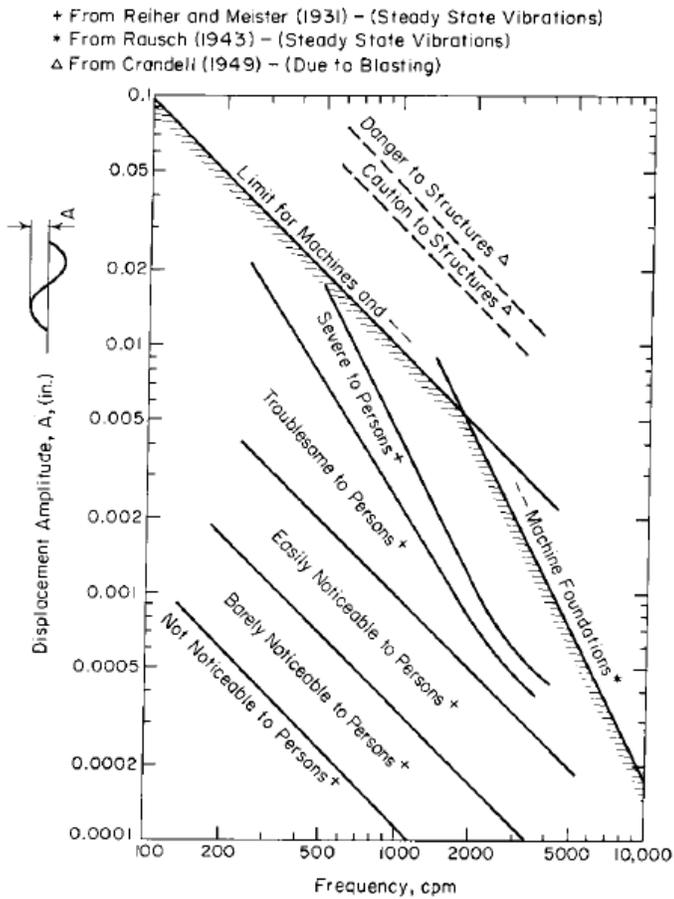
Para terminar el análisis dinámico, ya habiendo conseguido los valores de la frecuencia circular y amplitud de desplazamiento, se deben comparar respectivamente con los otorgados por el fabricante, verificando que se cumplan las siguientes condiciones:

$$A < A_{fab}$$

$$\frac{\omega_o}{\omega_n} < 0,60 \text{ ó } \frac{\omega_o}{\omega_n} > 1,40$$

Con estos dos valores, se ingresa a los gráficos mostrados a continuación según aplique el caso, y se verifica el comportamiento dinámico de la estructura, comprobando que los parámetros de vibración de la fundación estén dentro de los rangos permisibles, para no ocasionar daños a los equipos, personas y a sí mismas, entendiendo que los criterios que otorga cada gráfico no son exhaustivos, por lo que puede que algunos no apliquen para un mismo problema particular.

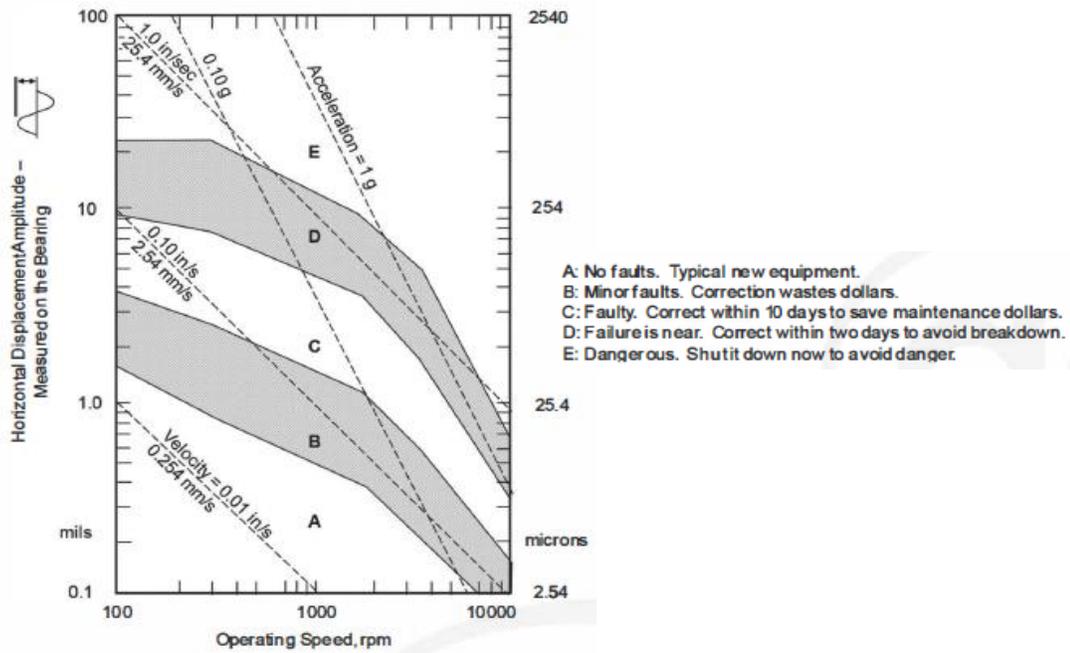
En la figura 35 se muestran curvas que limitan zonas para la percepción de personas de las vibraciones verticales cuando están paradas en la fundación o se encuentran de alguna manera sujetas a los efectos de esta vibración, yendo desde “no notable” a “severo”. Las líneas sombreadas nombradas como “límite para máquinas y fundaciones de máquinas” indican un límite de seguridad y no de funcionamiento adecuado, incluyéndose dos líneas punteadas por encima de ellas que señalan el riesgo y peligro para estructuras (Richart et al., 1970).



**Figura 35: Gráfico de percepción humana de vibraciones**

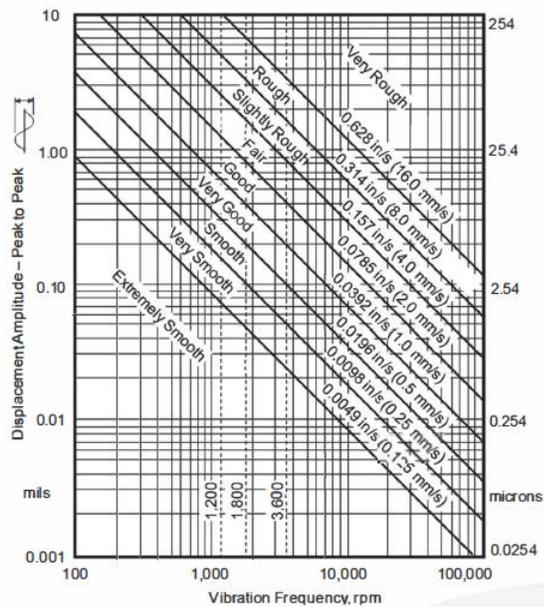
Fuente: Richart et al. (1970) tomado de Richart (1962).

En la figura 36 se muestra un gráfico que establece las amplitudes horizontales permisibles a la velocidad de operación el equipo, delimitando zonas con diferentes niveles de riesgo, mientras que la figura 37 muestra la severidad de la vibración, basándose en la amplitud “pico a pico”, es decir, el doble de la amplitud de desplazamiento “A” calculada anteriormente.



**Figura 36. Gráfico de fallas por desplazamiento horizontal en máquinas rotativas**

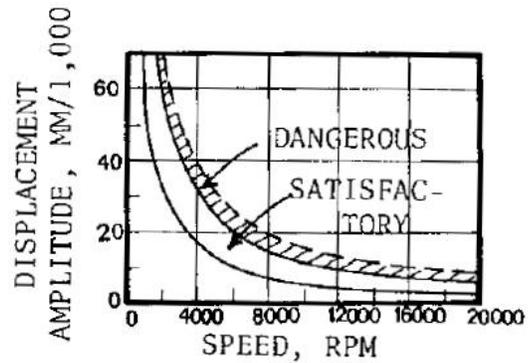
Fuente: ACI 351.3R-18 (2018), tomado de Blake (1964) luego de la modificación realizada por Arya et al. (1979).



**Figura 37: Gráfico de severidad vibratoria de maquinaria**

Fuente: ACI 351.3R-18 (2018), tomado de Baxter y Bernhard (1967).

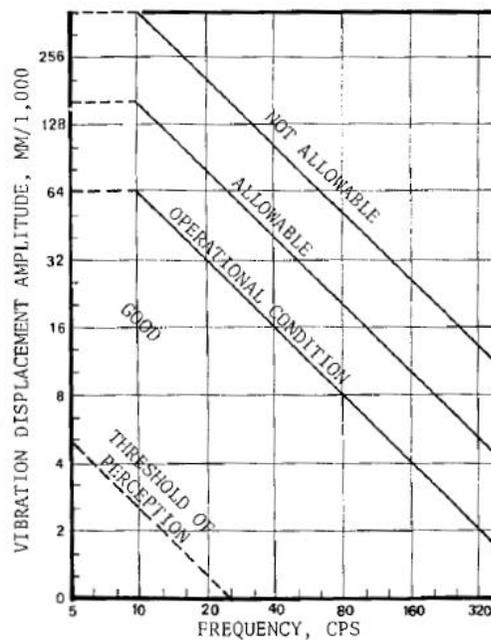
En la figura 38 se muestra un gráfico que hace una clasificación más cerrada para la vibración de máquinas de alta frecuencia, dividiéndola en “satisfactoria” y “peligrosa”.



**Figura 38: Estándares de vibración para máquinas de alta frecuencia**

Fuente: Arya et al. (1979) tomado Kruglov (1959).

Por otro lado, el gráfico de la figura 39 muestra límites de seguridad para las vibraciones generadas por turbomáquinas.



**Figura 39: Gráfico de límites en vibraciones para turbo máquinas rotativas**

Fuente: Arya et al. (1979) tomado de Verlin Deutscher Ingenieure (1964).

Se recomienda emplear el gráfico de la figura 40 en casos en los que las condiciones que gobiernan son valores limitantes de velocidad o aceleraciones máximas; este gráfico muestra diferentes valores de desplazamiento, velocidades y aceleraciones, sugeridos por los límites de Rausch, la Oficina de Minas de Estados Unidos, y por motivos de confort para personas.

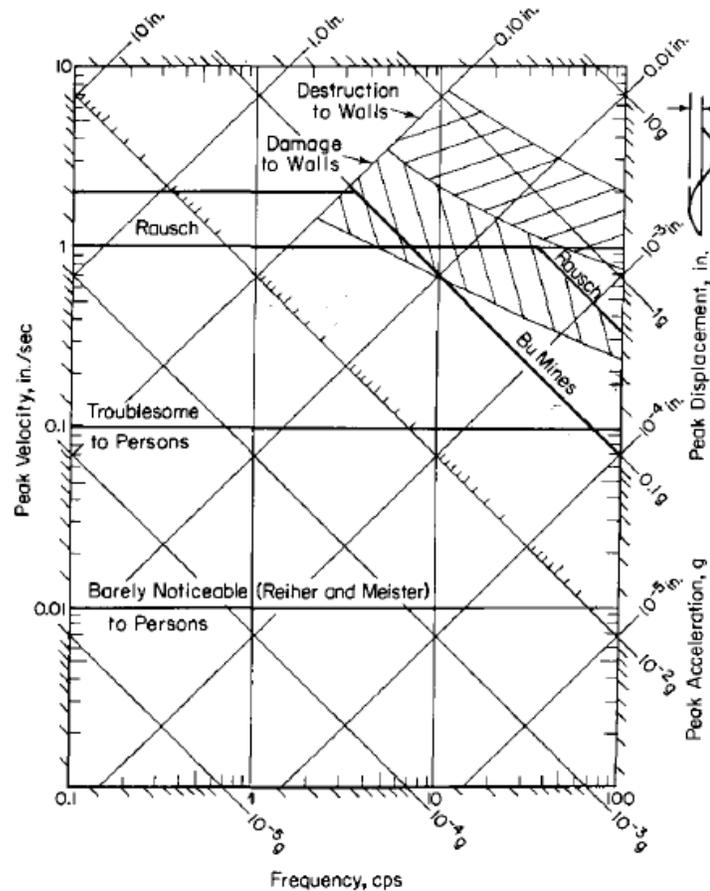


Figure 10-3. Response spectra for vibration limits.

**Figura 40: Espectro de respuesta para vibraciones límite**

Fuente: Richart et al. (1970).

De esta manera, se asegura que el sistema opere sin sobrepasar los desplazamientos permisibles y que no ocurra el fenómeno de resonancia, cumpliendo a cabalidad con su función, sin representar un riesgo para sí mismo, ni para las estructuras aledañas, personal de operación y mantenimiento.

Otra manera de realizar el análisis dinámico de fundaciones, es a través de programas computarizados, tales como DynaN, que permite estudiar fundaciones superficiales y profundas a través del método mejorado de Novak, según se indica en su manual de uso Computer Program DynaN (2012), disponible en el sitio web de su casa fabricante Ensoft Inc.

El programa es capaz de obtener la respuesta estructural de las fundaciones para los distintos tipos de máquinas mencionadas anteriormente. Para el análisis, hace uso del método de la función de impedancia y un modelo de interacción suelo-estructura con elementos reflectantes. Según sus estudios el suelo no es un medio elástico perfecto y demostraron que el amortiguamiento del mismo es sobreestimado, por lo tanto, reducen los resultados basándose en sus estudios.

### ***Diseño del acero de refuerzo***

No existe un juicio único para definir la cantidad y distribución del acero de refuerzo para el armado de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, ya que los diferentes comités del ACI utilizan diversos criterios que son válidos para miembros y elementos estructurales unidimensionales y bidimensionales (Velásquez, 2023), es decir, aquellos en los que una o dos de sus dimensiones son despreciables respecto al resto, como columnas, vigas, muros y losas, que soportan, comúnmente, cargas estáticas.

No obstante, hay algunas consideraciones que pueden extenderse a estructuras de concreto masivo (como lo son las fundaciones sometidas a cargas dinámicas), ya que conducen a resultados bastante aceptables, de acuerdo con la experiencia y criterios del Ingeniero José Manuel Velásquez (consultados a través de entrevista, 2023), sin embargo, queda a consideración del ingeniero las directrices que tomará para el diseño del acero de refuerzo de estas estructuras.

Partiendo de la hipótesis de que la fundación en cuestión es rígida y que el acero no aporta significativamente a la resistencia de la misma, ya que las cargas estáticas son relativamente pequeñas al haber asegurado que el peso de ella es, como mínimo, el

triple del peso del equipo que en ella se apoya, se puede decir que el acero requerido es principalmente por motivos constructivos y para prevenir daños por retracción y cambios de temperatura durante el fraguado del concreto.

Las recomendaciones extraídas de las distintas guías y entrevistas son:

- Calcular el área de acero mínima, que será repartida en toda la sección del bloque de fundación, determinando la cuantía mínima para la prevención de daños por retracción y cambios de temperatura, en función de la longitud de las juntas de movimiento; estas juntas hacen referencia a la longitud de los tramos en los que se realizará el vaciado, ya que, por tratarse de una estructura con dimensiones importantes, se hace prácticamente imposible realizar el vaciado en una sola fase.

Por lo tanto, a mayor longitud de vaciado, mayor será el volumen de concreto vaciado en cada fase, y a su vez el riesgo de agrietamiento y cambios de temperatura por calor de hidratación en el fraguado, por lo que será mayor el requerimiento de acero para el control de estos riesgos. Esta cuantía podrá reducirse en un 50% si el vaciado no se hace directamente en el suelo.

**TABLE 7.12.2.1—MINIMUM SHRINKAGE AND TEMPERATURE REINFORCEMENT**

Length between movement joints, ft	Minimum shrinkage and temperature reinforcement ratio	
	Grade 40	Grade 60
Less than 20	0.0030	0.0030
20 to less than 30	0.0040	0.0030
30 to less than 40	0.0050	0.0040
40 and greater	0.0060*	0.0050*

**Figura 41: Cuantía mínima de acero de refuerzo**

Fuente: Richart et al. (1970).

- El diámetro mínimo para las barras de acero deberá ser 1/2".
- El recubrimiento mínimo del refuerzo metálico para fundaciones vaciadas directamente en el suelo no debe ser menor a 7,50 cm; para aquellos elementos

vaciados con encofrado, este valor se reduce a 5,00 cm (ACI 318-19 Art. 20.5.1.3.1).

- Se deben ajustar los ganchos del acero superior e inferior para que la longitud de solape entre ambos no sea menor que 30 cm; para el acero intermedio se usarán ganchos no menores de 15 cm.
- La separación máxima entre barras para el control de grietas, siguiendo lo establecido en el ACI 318-19, debe ser el menor valor entre:

$$s_1(cm) = 38 * \frac{2800}{f_s} - 2,5r$$

$$s_2(cm) = 30 * \frac{2800}{f_s}$$

Donde:

$s$ : separación centro a centro del acero de refuerzo a tracción más cercano a la superficie.

$f_s$ : tensiones sobre el acero de refuerzo para cargas de servicio

$$f_s = \frac{2}{3} f_y = \frac{2}{3} * 4200 \frac{kgf}{cm^2} = 2800 \frac{kgf}{cm^2}$$

$r$ : recubrimiento del acero de refuerzo (cm).

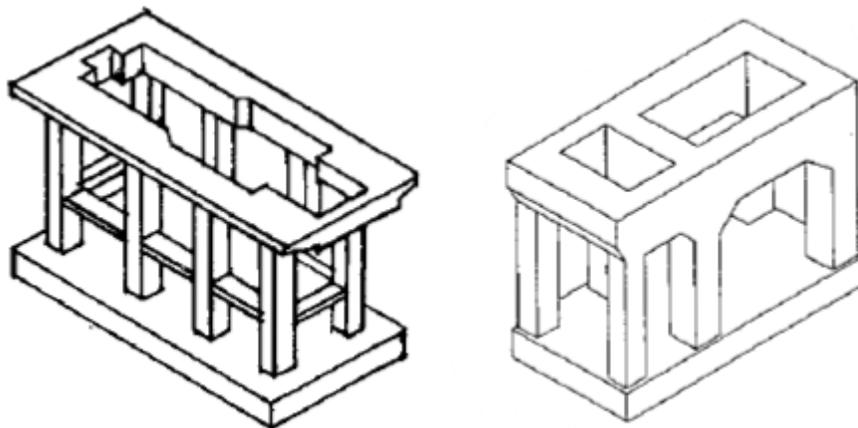
- En bloques de fundación con espesor igual o mayor que 90 cm, se deberá agregar capas de acero intermedio en ambas direcciones horizontales, con separaciones equitativas de una capa a otra que varían de 30 a 40 cm, guardando la misma distancia al acero superior e inferior.
- Al realizar el detallado del acero de refuerzo se debe verificar que la relación entre peso de acero colocado y volumen de concreto según la guía ACI 351.3R-18 en su artículo 7.3.2 debe ser mayor a 30 kgf/m<sup>3</sup> para losas de cimentación; sin embargo, de acuerdo a la información provista por el Ingeniero José Manuel Velásquez, se recomienda que esta relación esté entre 25 y 35 kgf/m<sup>3</sup>.

### *Caso común: fundaciones aporticadas*

Cuando es necesario atender algunos requerimientos del proyecto o limitaciones respecto a la instalación y funcionamiento de algunos equipos dinámicos, como requerimientos de altura y equipos auxiliares, ubicación en planta, evasión de interrupciones de tuberías y cableado eléctrico, acceso a todas sus partes para inspección y mantenimiento, entre otros, se emplean fundaciones aporticadas. En estas, las máquinas se apoyan sobre una placa con vigas, que, junto a las columnas, forman pórticos embebidos en una losa de fundación que está en contacto con el suelo.

Generalmente, las fundaciones aporticadas se constituyen de “tres o más pórticos transversales apoyados en una losa de fundación suficientemente gruesa” (Barkan, 1969). La losa superior puede contener aberturas para el calzado de algunas partes de la máquina, paso de tuberías y cableado que comuniquen equipos ubicados en la parte superior con otros ubicados en la parte inferior.

Los pórticos pueden encontrarse en una o dos direcciones, e incluso pueden insertarse muros entre las columnas para aumentar la rigidez, todo dependerá de los requerimientos del caso de estudio, el criterio del ingeniero y, por supuesto, las recomendaciones del fabricante del equipo, que deben estar presentes a lo largo del diseño de estas estructuras.



**Figura 42:** *Fundaciones aporticada con aberturas en la losa superior*

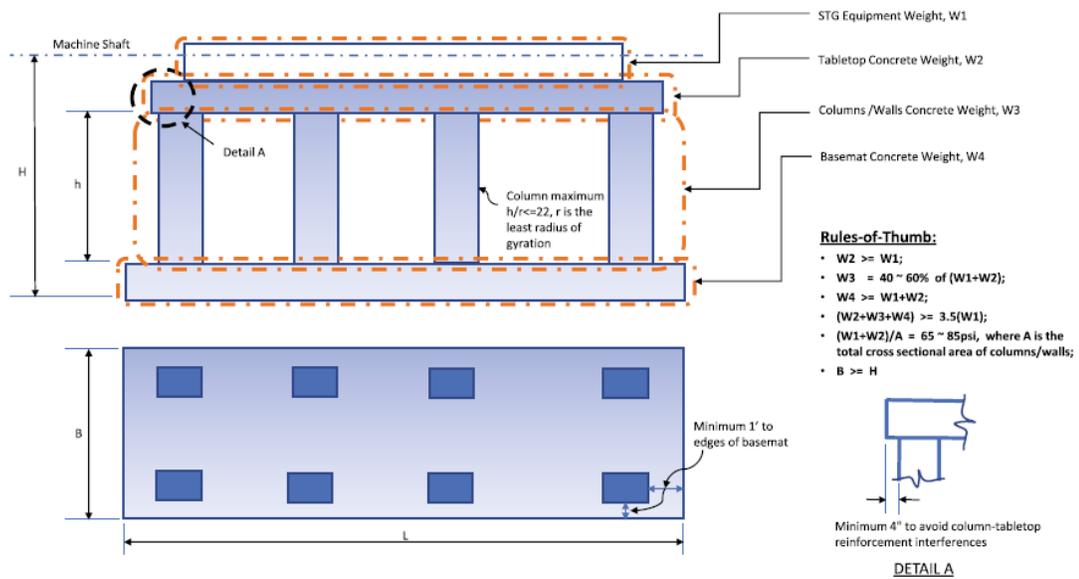
Fuente: Arya et al. (1979).

En la mayoría de los casos, son empleadas para fundar máquinas de alta frecuencia de excitación ( $\omega \geq 3000$  rev/min), como los equipos eléctricos y turbo dinámicos (turbocompresores, turbogeneradores, etc.) de alta potencia, ya que cuando la frecuencia del equipo es baja, suele coincidir con la del sistema de fundación (Fratelli, 1993), además, según observaciones, emplearlas para este tipo de maquinaria resulta frecuentemente más económico que las fundaciones masivas, además de evitar fisuras por asentamientos y cambios de temperatura (Barkan, 1969).

Para estas fundaciones, existen diferentes criterios para la determinación de dimensiones iniciales para su diseño (predimensionado), como por ejemplo los establecidos por la “regla del pulgar” de la American Society of Civil Engineers (ASCE, siglas en inglés para Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, 2018):

- El peso de la placa superior de concreto no debe ser menos que el peso total de la máquina.
- La relación  $W/A$  debe encontrarse aproximadamente entre 60 y 90 psi; donde “W” es el peso del sistema máquina-losa superior, y “A” la sumatoria de las áreas transversales de los miembros verticales (muros y columnas) que soportan a dicha placa.
- La sumatoria de los pesos de los miembros estructurales verticales debe estar entre el 40% y 60% del peso del sistema máquina-losa superior.
- El peso de la losa inferior debe ser mayor que el peso combinado de la máquina y losa superior.
- El peso total de la fundación de concreto, no debe ser menor que 3,5 veces el peso de la máquina.
- La relación  $h/r$  de cada columna debe ser menor que 22; donde “h” es la altura libre de la columna y “r” es el menor radio de giro de la misma.

- El espesor de la losa inferior debe ser mayor que  $L/30 + 60$  cm y que el 20% de la mayor separación libre entre columnas en la dirección longitudinal; donde L es el largo de la losa de fundación.
- El ancho de la losa inferior debe ser mayor que la distancia vertical entre la base de dicha losa y el eje central de la máquina.
- La carga promedio sobre el suelo no debe exceder el 75% de la capacidad admisible bajo peso propio más cargas dinámicas normales.



**Figura 43: Reglas del pulgar para fundaciones aporticadas**

Fuente: ASCE (2018).

### *Los manuales como herramientas de agilización de procesos*

La Real Academia Española, hace referencia a los manuales como “libros en que se compendia lo más sustancial de una materia” (2022). También, hace referencia a frases como “fácil de manejar” y “fácil de entender”; esto es precisamente lo que busca un manual: reunir información relacionada con un tema o un área, y asentarla en sus páginas de tal manera que se facilite la comprensión y entendimiento por parte del lector.

En la ingeniería, es común el uso de manuales para esquematizar procesos detallada y organizadamente, que en general, son laboriosos por estar relacionados con temas complejos, que requieren un estudio profundo por parte del profesional para poder entenderlo y definir criterios fundamentados en la revisión bibliográfica.

Estos, presentan instrucciones e indicaciones técnicas que siguen una línea de ejecución continua, basadas en normativas, guías, experiencias y documentos oficiales, que sustentan la validez del propio manual; de esta manera, se garantiza una alta probabilidad de obtener resultados efectivos y satisfactorios que se alineen con estándares de calidad certificados.

La estructura general de un manual técnico se señala a continuación.

- **Cubierta:** es la presentación del manual que, además, sirve como protección del contenido, en el caso de manuales impresos.
- **Hojas de respeto:** son hojas en blanco que se colocan al principio y al final, generalmente en publicaciones impresas.
- **Portada:** contiene los datos e información general del manual.
- **Agradecimiento:** es opcional, y sirve para que el autor exprese su agradecimiento a los que colaboraron en la realización del manual y cualquier otro que considere dicho autor.
- **Índice:** esquematiza el contenido del manual y especifica el número de página en el que se encuentra cada tema.
- **Introducción:** en este apartado se da un abreboca sobre el contenido del manual, y se da una descripción clara y sencilla del mismo, explicando sus objetivos, alcances e intención, para incentivar el interés del lector. Instrucciones para su uso: expone las recomendaciones para el entendimiento y uso efectivo del manual.
- **Cuerpo principal:** presenta el contenido de forma amplia, describiendo y explicando las instrucciones de cada procedimiento y/o actividad. Esta sección tiende a dividirse en capítulos.

- Glosario: considera las definiciones de la terminología que puede ser desconocida por los usuarios del manual.
- Referencias: especifica los documentos o fuentes consultadas para la realización del manual.
- Apéndice: considera los anexos como gráficos, tablas, ilustraciones, etc., que sirven de complemento, y que no se presentan en el cuerpo principal, debido a su extensión o a que pueden generar distracción en el lector.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Luego de dar un contexto y establecer las bases teóricas del presente trabajo de investigación, es necesario establecer un cuadro que describa y desarrolle el método usado para cumplir los objetivos planteados en la investigación. De acuerdo con Balestrini (2006) el marco metodológico “es la instancia referida a los métodos, las diversas reglas, registros, técnicas y protocolos con los cuales una Teoría y Método calculan las magnitudes de lo real” (p. 126); de una manera más práctica, “es el «cómo» se realizará el estudio para responder al problema planteado.” (Arias, 2006, p. 110).

Por eso, se presenta el marco metodológico, en el que se encuentran definidos el enfoque, nivel, tipo y diseño de la investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, y el método que permitió sistematizar y operacionalizar la información, para alcanzar los resultados que satisfacen los objetivos del trabajo en cuestión.

#### **Enfoque de la Investigación**

El presente trabajo de investigación se desarrolló sobre la base de un enfoque cuantitativo, que busca la descripción y estructuración de ciertos procesos concretos relativos al diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, ya que, según Hernández, Fernández y Baptista (2010), el enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio; en él, cada etapa precede a la siguiente, el orden es riguroso, y se parte de una idea que va acotándose hasta derivar objetivos.

Además, este enfoque “plantea un problema de estudio delimitado y concreto” (Hernández et al., 2010, p. 5) en el que la recolección de los datos se realiza usando procedimientos estandarizados aceptados por una comunidad científica, por lo que la investigación queda sustentada en los conocimientos de los profesionales pertenecientes al área de estudio en cuestión.

## **Nivel de Investigación**

El nivel que alcanza el presente trabajo de investigación es proyectivo, ya que “propone soluciones a una situación determinada a partir de un proceso de indagación” (Hurtado, 2007, p. 114); según la autora citada “implica explorar, describir, explicar y proponer alternativas de cambio”.

Además, en este nivel de investigación se incluyen, según Palella y Martins (2006), “a todas las investigaciones que conllevan a diseños o creaciones dirigidas a cubrir una necesidad y basadas en conocimientos anteriores” (p. 103).

Este trabajo busca realizar una propuesta de manual para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, presentando una solución al proceso complejo que representa, mediante la explicación de la información básica contenida en distintas guías técnicas y la estructuración de un procedimiento a partir de la misma, reduciendo el tiempo que un ingeniero debe invertir en la comprensión del área de la dinámica de fundaciones y suelos, y en realizar el diseño de esta clase de estructuras.

## **Tipo de Investigación**

El trabajo de investigación sigue un modelo de proyecto factible.

El Proyecto Factible consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos. El Proyecto debe tener apoyo en una investigación de tipo documental, de campo o un diseño que incluya ambas modalidades.

El Proyecto Factible comprende las siguientes etapas generales: diagnóstico, planteamiento y fundamentación teórica de la propuesta; procedimiento metodológico, actividades y recursos necesarios para su ejecución; análisis y conclusiones sobre la viabilidad y realización del Proyecto; y en caso de su desarrollo, la ejecución de la propuesta y la evaluación tanto del proceso como de sus resultados. (UPEL, 2016, p. 21)

El presente trabajo de investigación propone un manual como herramienta que facilite el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, como alternativa a procesos más tediosos y complejos que hasta ahora existen, desarrollado y estructurado gracias a una revisión de literatura previa, que fundamenta teóricamente el producto final de la investigación.

### **Diseño de la investigación**

El trabajo de investigación en cuestión, presenta un diseño documental; según Arias (2006) “la investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas” (p. 27), y, según la UPEL (2010), para “el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar su naturaleza” (p. 20).

Eso es precisamente lo que se hizo: se investigó en documentos oficiales existentes (como guías técnicas y trabajos de grado) para poder entender los fenómenos y procedimientos asociados al diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, y posteriormente desarrollar la estructura de un manual que facilite dicho proceso.

### **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas de recolección de datos son definidas por Palella y Martins (2006) como “las distintas formas o maneras de obtener la información.” (p. 126); además, estas técnicas son diversas según el objeto a que se apliquen y no se excluyen entre sí” (Balestrini, 2006, p. 145)

Por otro lado, “un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (Arias, 2006, p. 68).

Hurtado (2007) hace una analogía entre las técnicas e instrumentos de recolección de datos con el cómo y con qué, respectivamente, se lleva a cabo esta tarea.

De acuerdo con el diseño de esta investigación, las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron la revisión documental y la entrevista; la primera se basa en una lectura general de textos y documentos, seguida de lecturas secundarias más detenidas y rigurosas, con el fin de captar la información esencial de sus contenidos y propuestas, para extraer los datos de interés para la investigación (Balestrini, 2006); mientras que la segunda “es una técnica que permite obtener datos mediante un diálogo que se realiza entre dos personas cara a cara: el entrevistador investigador y el entrevistado” (Palella y Martins, 2006, p. 130).

Esto aplica para el presente proyecto, pues se llevó a cabo una revisión de documentos y textos realizados por investigadores, expertos e instituciones, que tratan los temas relacionados con la dinámica estructural y de suelos; esto incluye la lectura general del material encontrado y la selección de la información en función de los requerimientos del trabajo. Igualmente, se entrevistó a un ingeniero, con la finalidad de recabar ciertas recomendaciones basadas en su experiencia profesional, dada la difusa información respecto al diseño del acero de refuerzo de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.

Entre las técnicas específicas de la revisión documental se empleó la lectura exploratoria, lectura rápida y atenta, lectura crítica, análisis y síntesis, subrayado, notas de referencias bibliográficas, fichaje y realización de esquemas. El instrumento esencial de esta técnica es el análisis documental en sí mismo, pero también se incluyen las notas, fichas y esquemas.

### **Método de la investigación**

El método, según Ander-Egg (citado por Pulido, 2015, p. 1141) es el “camino a seguir mediante una serie de operaciones, reglas y procedimientos fijados de antemano de manera voluntaria y reflexiva, para alcanzar un determinado fin que pueda ser material o conceptual” (1995, p. 41). En este sentido, para alcanzar los objetivos de la investigación, se estableció una serie de pasos consecutivos, fundamentados en el marco teórico presentado en el Capítulo II; los mismos se muestran a continuación.

### ***Planificación de la ejecución del Trabajo Especial de Grado***

Los autores realizaron una reunión inicial para planificar el orden de ejecución del Trabajo Especial de Grado, analizando su método y evaluando distintas rutas para alcanzar el objetivo general del mismo; de esta manera se tuvo más claridad del orden lógico con mayor efectividad a seguir para tal fin.

Dentro de la planificación, se acordó llevar a cabo reuniones semanales con el objetivo de hacer seguimiento al avance durante la semana culminante de acuerdo al plan general, evaluar las actividades no realizadas y analizar las razones de esto para establecer posibles soluciones que serían puestas en marcha durante la semana siguiente.

Igualmente, se acordó con el tutor del Trabajo Especial de Grado realizar reuniones semanales para reportar el avance de la investigación, aclarar dudas académicas y metodológicas atendiendo al fundamento teórico de la misma, recibir recomendaciones y material bibliográfico provistos por el tutor, realizar y discutir propuestas para el enriquecimiento del trabajo, pudiendo de esta manera perseguir un resultado satisfactorio.

### ***Revisión de la literatura***

El primer paso para la realización del trabajo fue la revisión de literatura; a través de la investigación y consultas al tutor del trabajo de grado, fueron encontradas fuentes de diversas índoles (libros en versión impresa y digital, guías técnicas, normativas, trabajos de grado, etc.), que se sometieron a una lectura exploratoria general, aprovechando esta oportunidad para adquirir conocimientos acerca de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas y los manuales técnicos.

De esta manera, fue posible realizar un mapeo de la información relevante para la investigación, agilizando el proceso relacionado con las lecturas más profundas y críticas realizadas para organizar dicha información en instrumentos como fichas y

esquemas, que facilitaron la comprensión del tema y la redacción de un basamento teórico coherente y pertinente.

La bibliografía, guías técnicas y demás documentos consultados (listados en las referencias de este tomo) fueron, en su mayoría, internacionales, ya que en Venezuela no existe ningún texto referente a las fundaciones sometidas a cargas dinámicas; solo un trabajo de grado estuvo como referencia dentro del ámbito nacional.

Otro punto importante en cuanto a conocimientos que fungieron como base para el desarrollo del Trabajo de Grado, fue la familiarización, experiencia y consulta de los autores, ya que, en tiempos previos y durante la realización de la investigación, trabajaron en el campo de la dinámica de suelos y fundaciones, ocasión que sirvió como oportunidad para consultar a distintos profesionales del área y adquirir experiencia en el diseño de estas estructuras.

### ***Elaboración del procedimiento para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas***

Luego de haber realizado una revisión de literatura extensa y continua, se inició un proceso de análisis para la elaboración del procedimiento de diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas para equipos rotativos, estableciendo un esquema que mostrara cada etapa con sus respectivos pasos, y así poseer una visión global del mismo; de este modo, se constituyó una estructura que siguiera un orden lógico de ejecución del procedimiento de diseño de estas fundaciones, basado en la revisión de la literatura, atendiendo a los datos de entrada y salida de cada etapa del procedimiento, y por supuesto, al criterio de los investigadores.

Fueron identificadas tres etapas principales dentro del procedimiento: predimensionado, análisis dinámico y diseño del acero de refuerzo. Para la primera etapa se definieron los criterios que permiten establecer las dimensiones iniciales del bloque de fundación, tomando en consideración la información de distintas normas y

guías técnicas que atienden a parámetros de rigidez, seguridad, operación y mantenimiento.

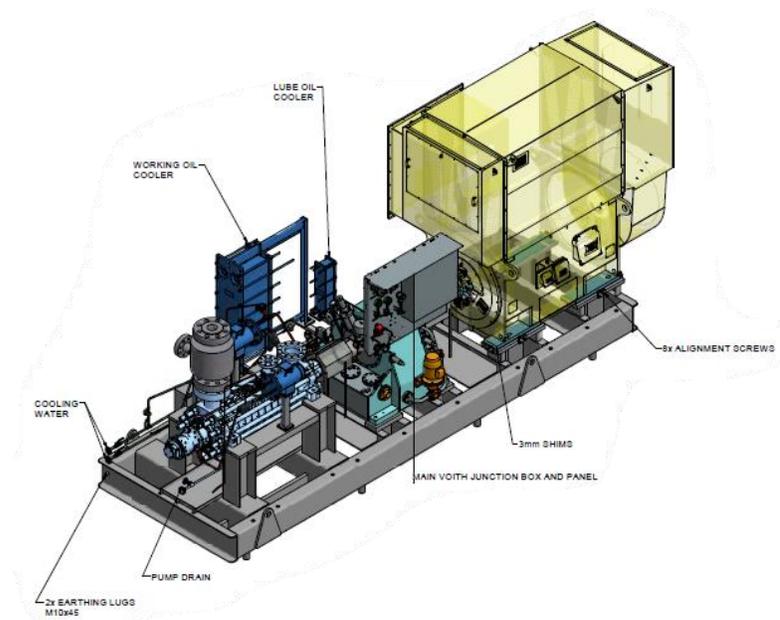
Estas dimensiones tentativas resultantes sirvieron como punto de partida y datos de entrada para la segunda etapa, el análisis dinámico, que permite estudiar las características dinámicas del sistema equipo-fundación (amplitud de desplazamiento y frecuencia), tomando en cuenta los parámetros dinámicos del suelo; para ello se estudiaron los dos métodos presentados en la guía ACI 351.3R-18 que permiten realizar este análisis: el método de Richart-Whitman y el de Veletsos, seleccionando el primero por criterios de los investigadores y sugerencias del tutor, ya que es el método pionero en el análisis dinámico de fundaciones, es el más conocido y ampliamente utilizado, siendo el ingeniero y profesor Frank E. Richart Jr. uno de los profesionales expertos más reconocidos en el campo de la dinámica de estructuras y suelos, sin desmeritar el trabajo realizado por Veletsos.

La tercera etapa, consiste en el diseño del acero de refuerzo; para ello, se consultaron distintas guías internacionales y se realizaron varias entrevistas a profesionales de la ingeniería con experiencia previa en el análisis de este tipo de estructuras, hasta obtener un listado de recomendaciones para el diseño del refuerzo metálico, ya que, como se dijo anteriormente, no existen normas ni reglamentos específicos para el armado de estos cimientos.

Por último, se hizo una revisión del procedimiento estructurado, para verificar que cumpliera con lo establecido en la guía ACI 351.3R-18 y demás normativas, y atendiera a una secuencia lógica de acuerdo a los requerimientos de cada paso.

### ***Diseño de una fundación superficial sometida a cargas dinámicas***

Se tomó como ejemplo una bomba de alta presión que alimenta a un generador de vapor (HRSG) dentro de un complejo industrial de generación de potencia, perteneciente a un proyecto de Inelectra S.A.C.A., empresa venezolana del sector de la energía.

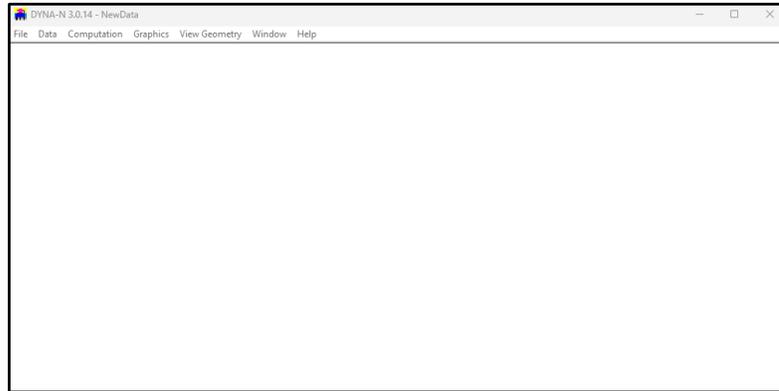


**Figura 44: Bomba de alta presión**

Fuente: Inelectra S.A.C.A. (2023).

Para tener una muestra de la aplicación del procedimiento estructurado, se diseñó la fundación presentada aplicándolo paso a paso. Los cálculos asociados a este ejemplo, se encuentran en el anexo 1 del presente tomo.

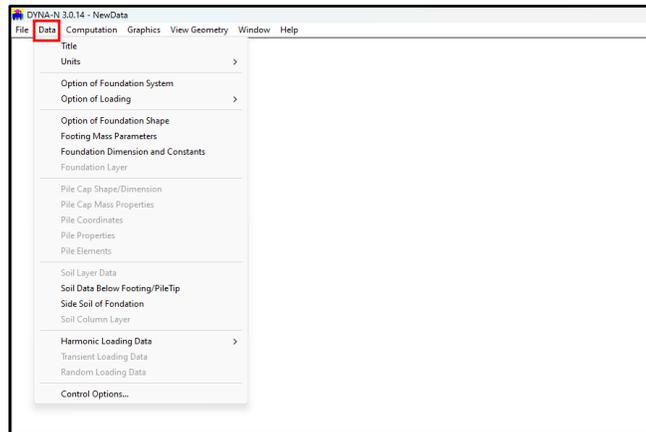
Para verificar la validez del procedimiento establecido a través de la formulación de Richart-Whitman, se realizó el mismo ejemplo a través de un programa digital de análisis dinámico estructural, llamado DynaN, al que se accedió gracias a una licencia con uso autorizado por Inelectra S.A.C.A.



**Figura 45: Interfaz del programa de análisis de dinámico**

Fuente: DynaN (2023).

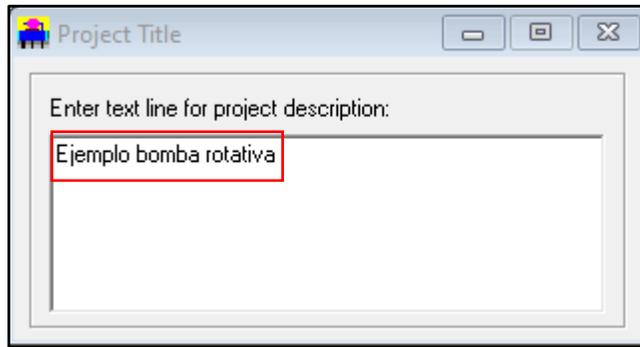
En la barra de menú en la sección “Data” se ingresan los datos necesarios para simular la fundación



**Figura 46: Sección “Data”**

Fuente: DynaN (2023).

En la opción “Title” se ingresó el nombre del archivo.

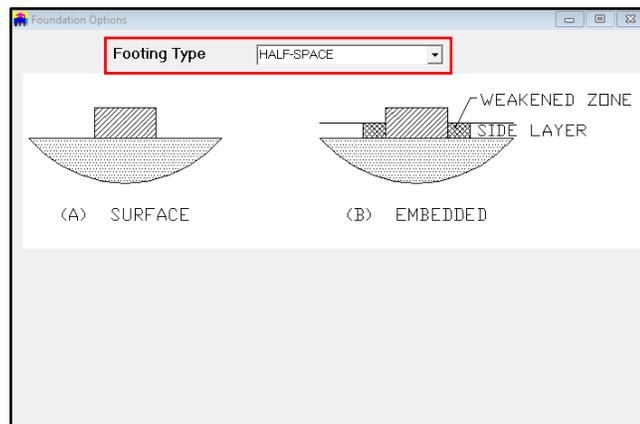


**Figura 47: Título del proyecto**

Fuente: DynaN (2023).

Luego, se asignaron las unidades del proyecto en la ventana “Units”; se seleccionó el sistema internacional. Es importante aclarar que el programa usa como unidad de fuerza el kilo Newton (kN), el metro (m) para la longitud y megagramo (Mg) para la masa (en el manual de uso se indica dentro del apartado 1.4 que  $1 \text{ Mg} = 1000 \text{ kg}$ ).

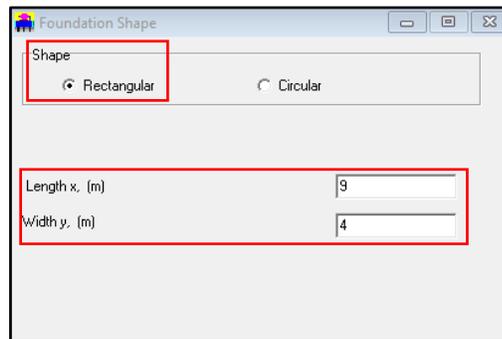
Es posible seleccionar distintos tipos de fundaciones en “Foundation Options”, tales como: fundación sobre un semi-espacio, pilotes, por estratos y multicapa. Para este caso de estudio se consideró un semi-espacio.



**Figura 48: Selección del tipo de fundación**

Fuente: DynaN (2023).

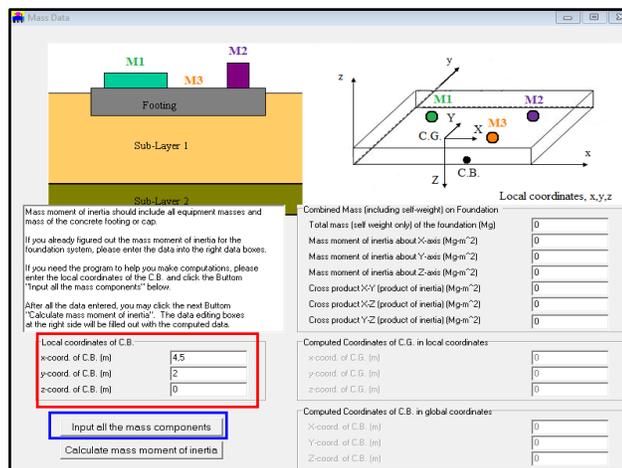
Además, es posible seleccionar el tipo de carga en “Option of Loading”. Se escogió una carga armónica para el proyecto en cuestión; posteriormente se definió la geometría y dimensiones de la fundación provenientes de la etapa de predimensionado.



**Figura 49: Dimensiones de la fundación**

Fuente: DynaN (2023).

Luego, en la sección “Footing Mass Parameters” se ingresaron las coordenadas del centro de masa de la fundación, además de las masas y coordenadas de los componentes del equipo, vistas previamente en la etapa de predimensionado, de tal manera que se evitara una excentricidad mayor al 5% entre el centro de masa del conjunto equipo-fundación y el centro de rigidez, según la norma ACI 351.3R-18.



**Figura 50: Coordenadas del centro de la base de la fundación**

Fuente: DynaN (2023).

En “Input all the mass components” (señalado con azul en la figura anterior) se ingresaron las masas y coordenadas para ubicación de cada componente del equipo y de la fundación, junto con las dimensiones de esta última nuevamente.

Mass #	Mass (Mg)	x-Coord. (m)	y-Coord. (m)	z-Coord. (m)	Length (x-direction) (m)	Width (y-direction) (m)	Thickness (z-direction) (m)
1	3,112	1,85	2	2,27	0	0	0
2	14	7,08	2	2,27	0	0	0
3	2,2	4,15	2	2,27	0	0	0
4	4,7	0,419	1,86	1,34	0	0	0
5	0,87	2,76	2	3,99	0	0	0
6	0,694	3,37	3,5	2,27	0	0	0
7	0,085	3,47	0,63	2,27	0	0	0
8	86,4	4,5	2	0,5	9	4	1

**Figura 51: Información del sistema equipo-fundación**

Fuente: DynaN (2023).

El programa calcula las coordenadas en la opción “Calculate mass moment of inertia” (señalada con azul en la figura siguiente).

Local coordinates of C.B.:

x-coord. of C.B. (m) 4,5  
y-coord. of C.B. (m) 2  
z-coord. of C.B. (m) 0

Input all the mass components

Calculate mass moment of inertia

Computed Coordinates of C.G. in local coordinates:

x-coord. of C.G. (m) 4,63917397624660  
y-coord. of C.G. (m) 1,99307340506620  
z-coord. of C.G. (m) 0,88908957155265

Computed Coordinates of C.B. in global coordinates:

X-coord. of C.B. (m) -0,19917397624660  
Y-coord. of C.B. (m) 0,00632659433379  
Z-coord. of C.B. (m) 0,88908957155265

Combined Mass (including self-weight) on Foundation

Total mass (self weight only) of the foundation (Mg) 112,826  
Mass moment of inertia about X-axis (Mg·m<sup>2</sup>) 187,815534746849  
Mass moment of inertia about Y-axis (Mg·m<sup>2</sup>) 768,282590612192  
Mass moment of inertia about Z-axis (Mg·m<sup>2</sup>) 817,354199597461  
Cross product X·Y (product of inertia) (Mg·m<sup>2</sup>) 0,38274415143672  
Cross product X·Z (product of inertia) (Mg·m<sup>2</sup>) -29,7940321671600  
Cross product Y·Z (product of inertia) (Mg·m<sup>2</sup>) 0,46724149983159

**Figura 52: Cálculo de propiedades físicas y geométricas del sistema equipo-fundación**

Fuente: DynaN (2023).

Luego se ingresaron los datos del estrato de suelo próximo al fondo de la fundación en la opción “Soil below de footing”, estos datos provinieron de un estudio de suelos realizado, tomando aquel con mayor cercanía a la zona destinada para la fundación

**Figura 53: Propiedades dinámicas del suelo bajo la fundación**

Fuente: DynaN (2023).

Además, se registraron los datos del estrato de suelo en el que se encuentra embebida la fundación.

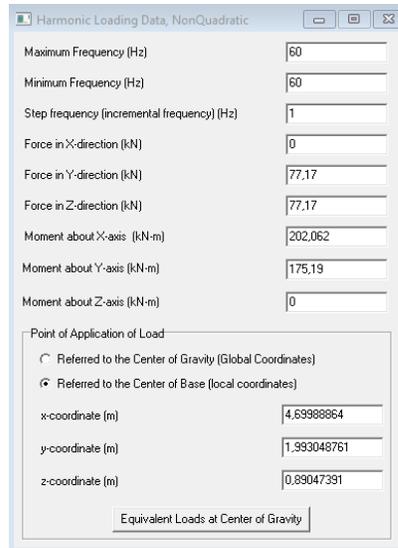
	Thickness	Shear Wave	Unit Weight	Poisson's	Material	Weak Zone Shear
	(m)	Velocity, (m/SEC)	(kN/m <sup>3</sup> )	Ratio	Damping	Modulus Ratio
1	2,25	245	18	0,35	0,05	229000000

**Figura 54: Estrato de suelo**

Fuente: DynaN (2023).

Por último, se ingresó la fuerza dinámica actuante previamente calculada, haciendo uso de las ecuaciones presentadas en el fundamento teórico de la investigación. Además, el programa solicita los momentos resultantes, que, por ser una fundación rígida, pueden ser trasladados al centro de masa de la misma, luego de ser calculado

como una sumatoria de aquellos momentos generados por las fuerzas provenientes del movimiento de los componentes rotativos.



Parameter	Value
Maximum Frequency (Hz)	60
Minimum Frequency (Hz)	60
Step frequency (incremental frequency) (Hz)	1
Force in X-direction (kN)	0
Force in Y-direction (kN)	77,17
Force in Z-direction (kN)	77,17
Moment about X-axis (kN-m)	202,062
Moment about Y-axis (kN-m)	175,19
Moment about Z-axis (kN-m)	0

Point of Application of Load

Referred to the Center of Gravity (Global Coordinates)

Referred to the Center of Base (local coordinates)

Coordinate	Value (m)
x-coordinate	4,69988864
y-coordinate	1,993048761
z-coordinate	0,89047391

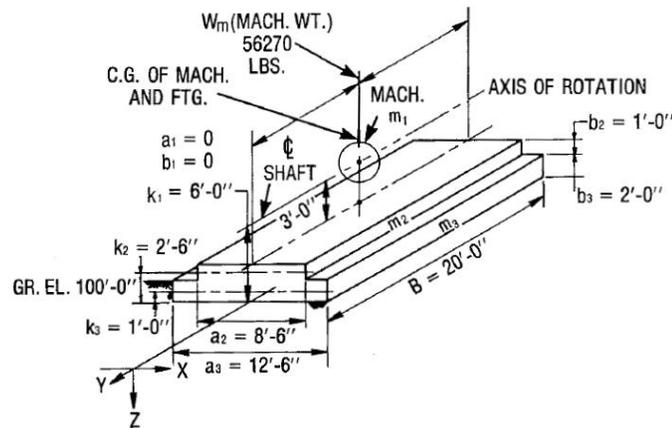
Equivalent Loads at Center of Gravity

**Figura 55: Fuerza y momentos resultantes sobre la fundación**

Fuente: DynaN (2023).

Por último, se ejecutó el programa en la opción “Run Analysis”, para obtener y extraer los resultados de los coeficientes de rigidez, amortiguamiento y la amplitud de desplazamiento, mostrados en el capítulo siguiente.

Luego de realizar el ejemplo 1, para tener otro punto de comparación, se realizó otro ejercicio presentado en la bibliografía por Arya et al. (1979) utilizando el procedimiento desarrollado en esta investigación, para comparar los resultados obtenidos, con los presentados en dicho libro. Igualmente, se realizó este ejemplo con el DynaN para hacer una triangulación de resultados, presentados en el Capítulo IV.



**Figura 56: Esquema de máquina centrífuga**

Fuente: Arya et al. (1979).

### *Establecimiento de la estructura técnica del manual*

Para establecer la estructura técnica del manual, se investigó acerca de las partes de esta herramienta, atendiéndose a la propuesta planteada en el Marco Teórico, que se recuerda a continuación. Esta estructura contiene partes de forma y de fondo, las primeras para dar formalidad a la herramienta, y las segundas para tratar el contenido para el cual fue propuesto.

- Cubierta.
- Hojas de respeto.
- Portada.
- Dedicatoria
- Agradecimientos.
- Índice.
- Prefacio.
- Nota de los autores.
- Introducción.

- Propósito
- Cuerpo principal.
- Referencias.

Con ayuda de la herramienta Microsoft Word, se creó todo el documento del manual, redactando la información necesaria y correspondiente para el desarrollo del mismo, de manera clara y concisa, para que fuese de fácil y rápida comprensión para el lector, al momento de estudiarlo o consultarlo.

En este, se redactó una sección que fundamenta teóricamente el procedimiento de diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas expuesto en el cuerpo principal del manual, parte que presenta dicho procedimiento; este fue estructurado y redactado de manera sistemática, siguiendo un orden lógico que atiende al estudio hecho por los autores de la investigación.

Se colocaron ejemplos para que el lector tenga una muestra ilustrativa del procedimiento, y tenga la oportunidad de resolver las dudas que se le presenten durante el fundamento teórico, explicación y/o aplicación del procedimiento de diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.

Por último, como complemento a lo establecido por los objetivos de la presente investigación, los autores decidieron desarrollar una hoja de cálculo a través de Microsoft Excel; por esto, se adjuntó al manual una guía para el uso de este archivo (disponible en los anexos del tomo), cuyas páginas están formuladas con el procedimiento establecido en el trabajo de investigación, para crear también una herramienta digital que calcule las dimensiones iniciales, realice el análisis dinámico (de ser necesario) y diseñe el acero de refuerzo de una fundación, con solo introducir las características del equipo, del suelo y de los materiales del cimiento.

### Cronograma de actividades

Actividad	2022			2023									
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
Planificación del desarrollo del TEG													
Revisión de la literatura													
Recolección y organización de la información													
Búsqueda de tutor para el TEG													
Redacción del planteamiento del problema y justificación de la investigación													
Concreción de los objetivos de investigación													
Basamento teórico y antecedentes de la investigación													
Establecimiento de lineamientos metodológicos del TEG													
Elaboración del procedimiento para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas													
Aplicación del método establecido a un ejemplo práctico													
Ejecución del ejemplo práctico a través de programa de análisis estructural													
Establecimiento de la estructura técnica del manual													
Redacción del método seguido en el TEG													
Análisis de resultados obtenidos													
Elaboración de conclusiones y recomendaciones													
Finalización del Tomo del TEG													
Revisión del tomo final por parte del tutor													
Aplicación de correcciones al tomo final													
Asignación de jurados por el Consejo de Escuela de Ingeniería Civil-UCV													
Defensa pública del TEG													

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de haber seguido el método de la investigación en pro de la consecución de sus objetivos, se obtuvo cierta información que calificará como resultados luego de haber realizado el análisis e interpretación correspondientes, que se muestra a continuación en el desarrollo de este capítulo.

#### **Identificación y elaboración del procedimiento de diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas**

Posteriormente de haber realizado una revisión de la norma ACI 351.3R-18, diversas guías técnicas y bibliografías referentes a dinámica de estructuras y suelos, se identificó y elaboró el procedimiento para el diseño de fundaciones superficiales sometidas a cargas dinámicas de equipos rotativos, el cual se dividió en tres etapas principales, cada una con diferentes pasos, tal como se muestra a continuación:

##### Etapa I: Predimensionado

1. Determinación del ancho mínimo de la fundación.
2. Determinación del largo mínimo de la fundación.
3. Determinación del espesor mínimo de la fundación.
4. Verificación de las tres dimensiones iniciales y el peso de la fundación.
5. Cálculo de las coordenadas del centro de masa del bloque de fundación.
6. Cálculo de las coordenadas del centro de masa del sistema equipo-fundación.
7. Cálculo de la excentricidad entre el sistema y el centro de rigidez.
8. Verificación de las presiones en el suelo.

##### Etapa II: Análisis dinámico

9. Cálculo de la relación largo/ancho de la fundación.
10. Cálculo de los radios equivalentes.

11. Cálculo de la frecuencia adimensional.
12. Cálculo de los coeficientes de rigidez.
13. Cálculo de la razón de masa y razón de amortiguamiento.
14. Cálculo del coeficiente de amortiguamiento.
15. Ajuste del coeficiente de amortiguamiento por influencia del suelo.
16. Ajuste del coeficiente de rigidez y amortiguamiento por embebido de la fundación.
17. Cálculo de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento totales.
18. Cálculo de la frecuencia natural del sistema equipo-fundación.
19. Verificación del fenómeno de resonancia.
20. Cálculo de la fuerza dinámica.
21. Cálculo de la amplitud de desplazamiento.
22. Verificación de amplitud y frecuencia.

Etapa III: Diseño del acero de refuerzo

23. Cálculo del acero mínimo por retracción y temperatura.
24. Definición de la separación máxima del acero a utilizar.
25. Distribución del acero de refuerzo.
26. Verificación del acero de refuerzo.

**Comparación del procedimiento estructurado para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas con otras fuentes de resultados**

Luego de haber realizado el ejemplo planteado utilizando el procedimiento establecido en la investigación, y a través del programa de análisis dinámico estructural “DynaN”, se tienen los siguientes resultados:

**Tabla 1: Parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 1**

Parámetros	Procedimiento	DynaN	% diferencia
$k_v$ (kN/m)	$2,354 \cdot 10^9$	$1,345 \cdot 10^6$	99,943
$k_u$ (kN/m)	$4,341 \cdot 10^9$	$2,131 \cdot 10^6$	99,951
$k_{\psi a}$ (kN-m)	$7,495 \cdot 10^{10}$	$1,033 \cdot 10^7$	99,986
$k_{\psi b}$ (kN-m)	$3,882 \cdot 10^{10}$	$2,740 \cdot 10^7$	99,929
$k_{\eta}$ (kN-m)	$8,356 \cdot 10^{10}$	$1,821 \cdot 10^7$	99,978
$c_v$ (kN/m)	$2,882 \cdot 10^6$	$2,459 \cdot 10^4$	99,147
$c_u$ (kN/m)	$2,209 \cdot 10^6$	$1,819 \cdot 10^5$	91,767
$c_{\psi a}$ (kN-m)	$2,235 \cdot 10^7$	$4,254 \cdot 10^4$	99,810
$c_{\psi b}$ (kN-m)	$1,521 \cdot 10^7$	$1,819 \cdot 10^6$	88,043
$c_{\eta}$ (kN-m)	$2,325 \cdot 10^7$	$9,476 \cdot 10^4$	99,592
$A_v$ (m)	$3,147 \cdot 10^{-11}$	$4,695 \cdot 10^{-9}$	99,330
$A_u$ (m)	$1,841 \cdot 10^{-11}$	$1,174 \cdot 10^{-9}$	98,432
$A_{\psi a}$ (rad)	$2,440 \cdot 10^{-12}$	$5,258 \cdot 10^{-9}$	99,954
$A_{\psi b}$ (rad)	$7,133 \cdot 10^{-12}$	$2,227 \cdot 10^{-9}$	99,680
$A_{\eta}$ (rad)	$2,503 \cdot 10^{-12}$	$1,707 \cdot 10^{-9}$	99,853

Fuente: DynaN (2023).

Se observa que, para el ejemplo 1, existe una diferencia importante entre los resultados obtenidos con el procedimiento diseñado y los resultantes de la aplicación del *software* de análisis dinámico estructural DynaN, estando comprendidas en un rango de 88,043% a 99,986%. Esto se atribuye principalmente a que dicho programa utiliza el método mejorado de Novak para realizar el análisis dinámico de la fundación, mientras que el procedimiento estructurado en el presente trabajo utiliza el método de Richart-Whitman, uno de los procedimientos recomendados por el ACI 351.3R-18 y ampliamente utilizado para dicho análisis.

Además, no está del todo claro el procedimiento utilizado por el DynaN para realizar el análisis dinámico; en su manual de uso se señala que se reducen los coeficientes de amortiguamiento de acuerdo a resultados de experimentos realizados por la empresa a la que pertenece el programa, Ensoft, Inc. (Reese, Tower, Arrellaga, y Vásquez, 2012), pero no se explican los criterios tomados en cuenta para ello, por lo tanto, se dificulta determinar si el procedimiento establecido por los autores de esta investigación, siendo ajustado con las reducciones que hace el DynaN, arrojaría resultados iguales o con un margen de diferencia reducido.

Por esta razón, se tomaron los valores de rigidez y amortiguamiento resultantes del DynaN, y se ingresaron como datos iniciales para el análisis dinámico a través procedimiento propuesto para calcular nuevamente los valores de amplitud, que se muestran a continuación.

**Tabla 2: Parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 1**

Parámetros	Procedimiento	DynaN	% error
$A_v$ (m)	$4,695 \cdot 10^{-9}$	$4,695 \cdot 10^{-9}$	0,017
$A_u$ (m)	$5,460 \cdot 10^{-9}$	$4,009 \cdot 10^{-9}$	26,562
$A_{\psi a}$ (rad)	$5,586 \cdot 10^{-9}$	$5,258 \cdot 10^{-9}$	5,865
$A_{\psi b}$ (rad)	$1,823 \cdot 10^{-9}$	$2,227 \cdot 10^{-9}$	22,145
$A_{\eta}$ (rad)	$1,817 \cdot 10^{-9}$	$1,707 \cdot 10^{-9}$	6,032

Fuente: DynaN (2023).

Se evidencia que las amplitudes poseen mucho menor, por lo tanto, se destaca que, efectivamente, la reducción de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento que realiza el DynaN influyen significativamente en los resultados finales del análisis dinámico, y estas son desconocidas para los usuarios del programa

Por tal motivo, se decidió recurrir a una segunda fuente de verificación de la validez del procedimiento, aplicándolo al “ejemplo 2”, tomado de la bibliografía de Arya et al. (1979), y comparar los resultados con los provistos por dichos autores, quienes, a lo

largo de su obra, desarrollan la teoría de análisis dinámico estructural basándose en el método de Richart-Whitman.

**Tabla 3: Parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 2**

Parámetros	Procedimiento	Arya et al.	% error
$R_v$ (ft)	8,921	8,920	0,011
$R_u$ (ft)	8,921	8,920	0,011
$R_\psi$ (ft)	8,024	8,020	0,050
$B_v$	0,243	0,240	1,250
$B_u$	0,341	0,350	2,571
$B_\psi$	0,163	0,168	2,976
$D_v$	0,863	0,868	0,576
$D_u$	0,493	0,494	0,202
$D_\psi$	0,320	0,361	11,357
$k_v$ (lb/ft)	$5,785 \cdot 10^7$	$5,785 \cdot 10^7$	0,000
$k_u$ (lb/ft)	$4,077 \cdot 10^7$	$4,077 \cdot 10^7$	0,000
$k_\psi$ (lb-ft)	$2,446 \cdot 10^9$	$2,446 \cdot 10^9$	0,000
$f_v$ (rpm)	$1,040 \cdot 10^3$	$1,041 \cdot 10^3$	0,096
$f_u$ (rpm)	$8,735 \cdot 10^2$	$8,739 \cdot 10^2$	0,046
$f_\psi$ (rpm)	$1,449 \cdot 10^3$	$1,449 \cdot 10^3$	0,000
$M_v$	0,022	0,022	0,000
$M_u$	0,016	0,016	0,000
$M_\psi$	0,045	0,045	0,000
$F_o$ (lb)	1460	1460	0,000
$M_o$ (lb-ft)	8760	8760	0,000
$A_v$ (ft)	$5,596 \cdot 10^{-7}$	$5,600 \cdot 10^{-7}$	0,071
$A_u$ (ft)	$5,703 \cdot 10^{-7}$	$5,700 \cdot 10^{-7}$	0,053
$A_\psi$ (ft)	$1,626 \cdot 10^{-7}$	$1,611 \cdot 10^{-7}$	0,931

Fuente: elaboración propia (2023).

Los resultados obtenidos a través del procedimiento diseñado son muy aproximados a los expuestos por Arya et al. (1979), con una única diferencia significativa del 11,357% en la razón de amortiguamiento rotacional, mientras que los demás valores

están en un rango de diferencias del 0 al 2,976%, resultando comprobada la validez de del procedimiento estructurado por los autores.

Por último, para verificar nuevamente el funcionamiento del DynaN, se introdujeron los datos del ejemplo 2 en el programa, para verificar nuevamente si existía alguna coincidencia de resultados, y los valores obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 4: Comparación de parámetros dinámicos obtenidos en el ejemplo 2 (bibliografía vs. programa digital)**

Parámetros	Arya et al.	DynaN
$k_v$ (lb/ft)	$5,785 \cdot 10^7$	$-1,522 \cdot 10^{10}$
$k_u$ (lb/ft)	$4,077 \cdot 10^7$	$2,741 \cdot 10^8$
$k_\psi$ (lb-ft)	$2,446 \cdot 10^9$	$-6,696 \cdot 10^{10}$
$A_v$ (ft)	$5,600 \cdot 10^{-7}$	$4,867 \cdot 10^{-8}$
$A_u$ (ft)	$5,700 \cdot 10^{-7}$	$1,009 \cdot 10^{-7}$
$A_\psi$ (ft)	$1,611 \cdot 10^{-7}$	$3,179 \cdot 10^{-8}$

Fuente: elaboración propia (2023).

Como se puede observar, los valores obtenidos a través del DynaN son distintos a los presentados en el libro, por lo tanto, sigue sin poder demostrarse las consideraciones y procedimientos exactos de este programa.

### **Estructura técnica y elaboración de la propuesta de manual para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas**

Luego de comparar los resultados obtenidos por el procedimiento constituido en el presente trabajo de investigación, se le dio una estructura técnica a la propuesta de manual, siguiendo un orden lógico, presentando la información de manera específica y detallada para promover la comprensión de la información de forma rápida y efectiva por parte del lector. Esta estructura se muestra a continuación con una descripción de cada una de sus partes, junto con figuras que ilustran la herramienta propuesta; esta podrá ser conseguida en su versión completa y digital en los anexos del presente tomo.

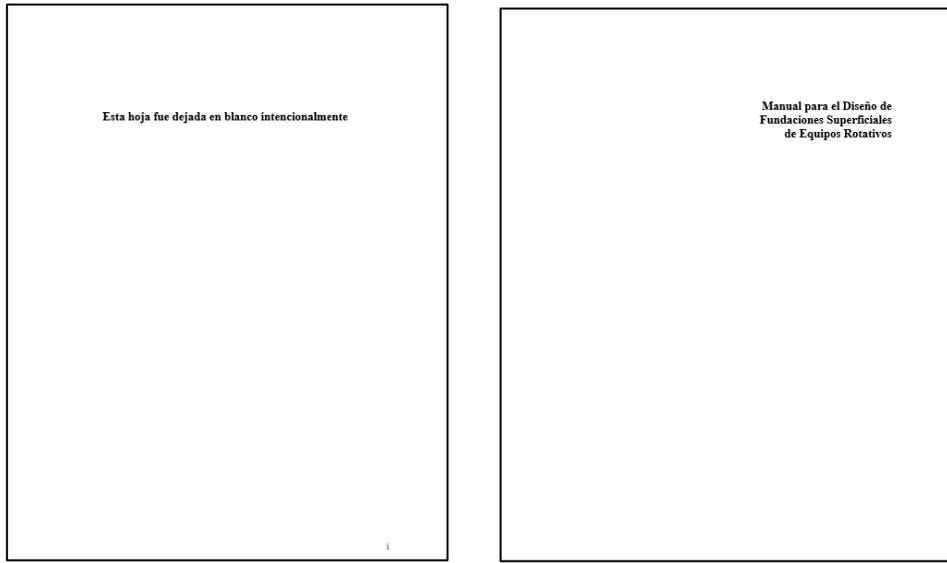
- Cubierta: contiene el título de la obra escrita, nombre de los autores e identificación de las instituciones que la respaldan.



**Figura 57:** *Cubierta del manual*

Fuente: elaboración propia (2023).

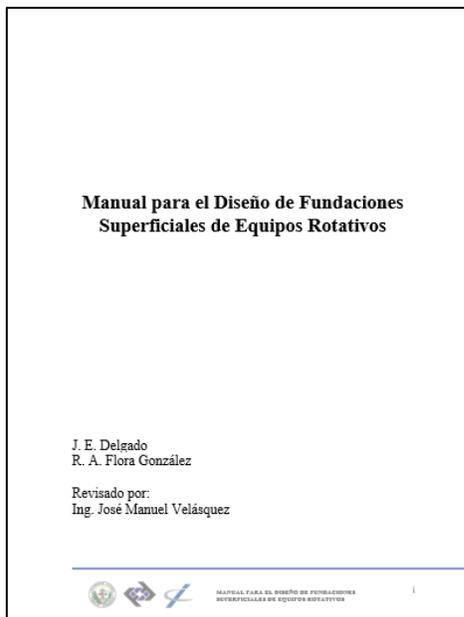
- Hojas de respeto: adjuntas para separar las hojas de texto de las hojas de guarda, ideales para cumplir con la formalidad requerida en caso de la impresión este manual.



**Figura 58: Hojas de respeto**

Fuente: elaboración propia (2023).

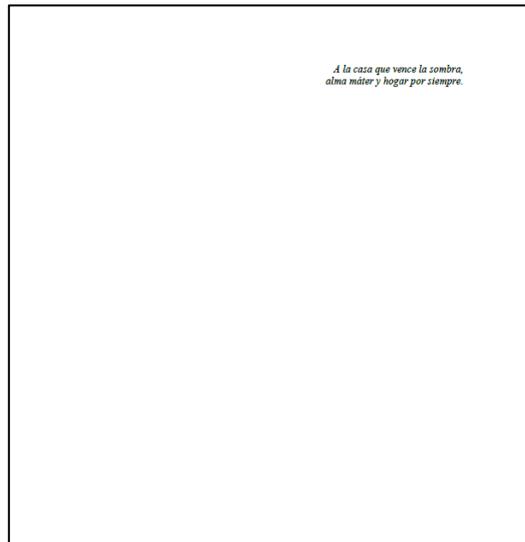
- Portada: presenta nuevamente el título del texto, nombre de los autores y revisor.



**Figura 59: Portada del manual**

Fuente: elaboración propia (2023).

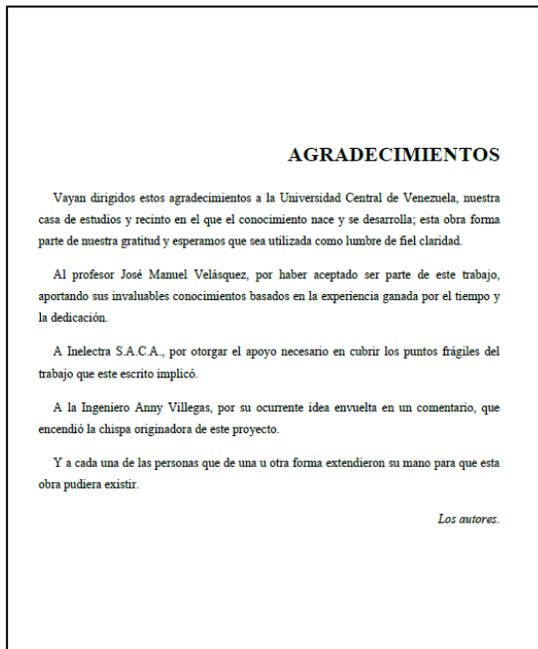
- Dedicatoria: señala a quiénes está dirigida la obra.



**Figura 60: Dedicatoria**

Fuente: elaboración propia (2023).

- Agradecimientos: como expresión de gratitud hacia las personas y organizaciones que colaboraron de manera directa o indirecta en la realización de esta herramienta.



**Figura 61: Agradecimientos**

Fuente: elaboración propia (2023).

- Índice: esquematiza la estructura general del manual, asignándole a cada parte un número de página.

<b>ÍNDICE</b>	
<b>CAPÍTULO 1. NOTACIONES Y DEFINICIONES</b> .....	6
1.1 Notaciones.....	6
1.2 Definiciones.....	9
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO DEFINICIONES</b> .....	12
2.1 Dinámica de estructuras.....	12
2.2 Dinámica de suelos.....	19
2.3 Fundaciones como sistema estructural.....	22
2.4 Fundaciones sometidas a cargas dinámicas.....	25
2.5 Tipos de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.....	26
2.6 Tipos de equipos que generan cargas dinámicas.....	30
2.7 Diseño de Fundaciones Sometidas a Cargas Dinámicas.....	34
2.8 Referencias en el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.....	36
2.9 Principio básico para el estudio de las vibraciones de una fundación.....	38
2.10 Predimensionado de fundaciones sometidas a cargas dinámicas.....	43
2.11 Análisis dinámico.....	47
2.12 Diseño del acero de refuerzo.....	68
<b>CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b> .....	71
3.1 Requisitos Iniciales.....	71
3.1.1 Características del equipo.....	71
3.1.2 Información Geotécnica.....	72
3.1.3 Condiciones Ambientales.....	72
	iv
3.1.4 Calidad de los Materiales.....	73
3.2 Etapa 1: Predimensionado.....	73
3.3 Etapa 2: Análisis Dinámico.....	77
3.4 Etapa 3: Acero de Refuerzo.....	93
<b>CAPÍTULO 4. EJEMPLOS PRÁCTICOS</b> .....	97
4.1 Ejemplo 1. Fundación para bomba de agua descentralizada.....	97
Etapa 1: Predimensionado.....	98
Etapa 2: Análisis Dinámico.....	101
Etapa 3: Diseño del acero de refuerzo.....	101
4.2 Ejemplo 2. Fundación para bomba de alta presión en planta de generación de potencia.....	106
Etapa 1: Predimensionado.....	107
Etapa 2: Análisis dinámico.....	114
Etapa 3: Diseño del acero de refuerzo.....	138
<b>CAPÍTULO 5. GUÍA PRÁCTICA PARA USO DE HOJAS DE CÁLCULO</b> .....	145
5.1 Etapa I: Predimensionado.....	145
5.2 Etapa II: Análisis Dinámico.....	149
5.3 Hoja Etapa III: Acero de Refuerzo.....	155
	v

**Figura 62: Índice del manual**

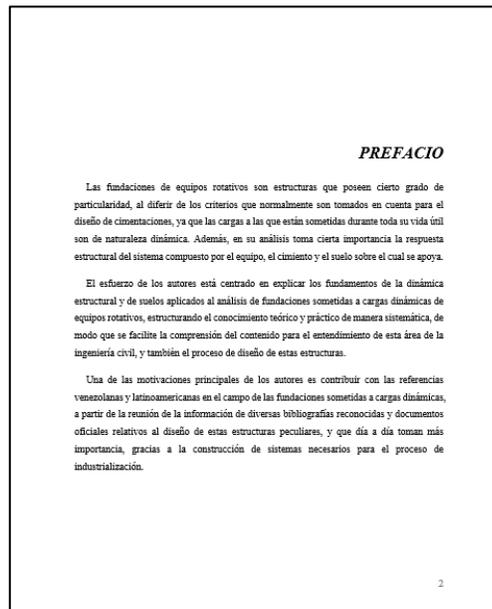
Fuente: elaboración propia (2023).

- Prólogo: presenta la opinión del Ingeniero José Manuel Velásquez respecto a la importancia y utilidad de la propuesta.

### **Figura 63: Prólogo**

Fuente: elaboración propia (2023).

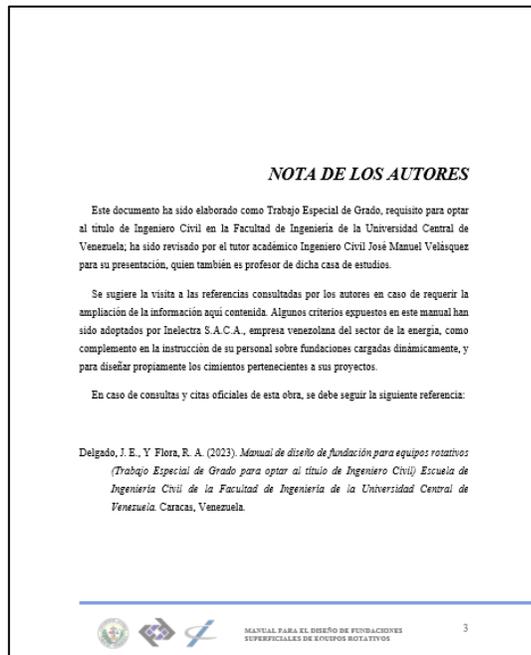
- Prefacio: exhibe las razones por las cuales los autores decidieron desarrollar la obra, junto con su perspectiva y opinión acerca del tema que trata.



### **Figura 64: Prefacio**

Fuente: elaboración propia (2023).

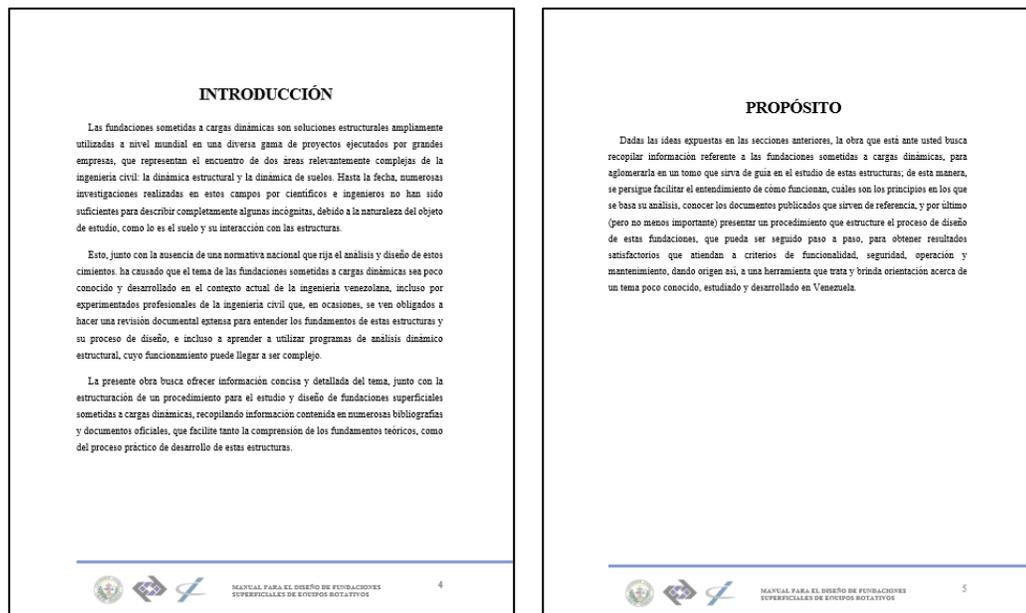
- Nota de los autores: aclaraciones respecto al contenido y uso del manual.



**Figura 65:** *Nota de los autores*

Fuente: elaboración propia (2023).

- Etapa introductoria: compuesta por la introducción, propósito y alcance de la obra, redactada para dar un abreboaca al lector acerca de la función y finalidad de la herramienta que está ante él, dando una visión clara que le permitirá inferir lo útil que pueda serle para el fin que persigue.



**Figura 66: Etapa introductoria**

Fuente: elaboración propia (2023).

- Cuerpo principal: compuesto por los capítulos esenciales del manual, en los que se desarrolla el contenido primordial que atiende a la función, propósito y objetivo de esta herramienta.
- Referencias: especifica las fuentes consultadas para la realización del manual.

**REFERENCIAS**

American Concrete Institute. (2006). *ACI 350-06. Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary*. Farmington Hills: ACI.

American Concrete Institute. (2018). *ACI 351 3R-18. Report on Foundations for Dynamic Equipment*. Farmington Hills: ACI.

American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills: ACI.

American Petroleum Institute. (2009). *API 686-2009. Recommended Practice for Machinery Installation and Installation Design*. Washington, D.C.: API.

American Society of Civil Engineers. (2018). *Concrete Foundations for Turbine Generators: Analysis, Design and Construction*. Reston, Virginia: Hongchun Liu, P.E.

Arya, S., O'Neill, M., & Pincus, G. (1979). *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.

Barkan, D. (1962). *Dynamics of Bases and Foundations*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill Book Company, Inc.

Calavera, J. (2000). *Cálculo de Estructuras de Cimentación*. Madrid: Intemac: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones.

Das, B., & Ramana, G. (2011). *Principles of Soil Dynamics*. United States of America: Cengage Learning.

Ferrero, L., & Milagros, T. (2021). *Diseño de una cimentación sometida a cargas dinámicas causadas por prensa mecánica de alto impacto (Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil) Universidad Tecnológica Nacional*. Buenos Aires.

Fimbres, C., & Martha, C. (s.f.). *Dinámica Estructural*.

---


MANUAL PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES SUPERFICIALES DE EJES ROTATIVOS
158

**Figura 67: Referencias**

Fuente: elaboración propia (2023).

Ahondando en la estructura técnica del manual, se hace necesario, como parte de los resultados de la investigación, desarrollar el contenido del cuerpo principal, dividido en seis capítulos:

- Capítulo 1. Notaciones y Definiciones

El capítulo 1 proporciona al lector inicialmente una guía organizada y de fácil lectura de las nomenclaturas utilizadas a lo largo del manual, en orden alfabético. Esto con el objetivo de aclarar cualquier duda que pueda surgir durante la consulta del manual. Sin embargo, los autores decidieron presentar las nomenclaturas con su significado en el cuerpo del texto para facilitar la lectura de quien lo consulte.

Además, se presenta un glosario de definiciones, con términos usados en el desarrollo de manual, relevantes para el entendimiento de la información presentada.



**Figura 68: Capítulo 1. Notaciones y Definiciones**

Fuente: elaboración propia (2023).

- Capítulo 2. Fundamento Teórico

Este apartado del manual ofrece al lector un recorrido por toda la información recopilada de distintas bibliografías, manuales y normas. Y que sirve como base para el estudio de fundaciones superficiales para equipos rotativos, así como la teoría y el modelo aplicado para el análisis.



**Figura 69. Capítulo 2. Fundamento Teórico**

Fuente: elaboración propia (2023).

- **Capítulo 3. Procedimiento de Diseño**

Aquí se presenta un paso a paso para el diseño de las fundaciones superficiales sometidas a cargas de equipos rotativos, comenzando por el predimensionado, que sirve como dimensiones finales si la fundación según los criterios expuestos no requiere análisis dinámico, luego un apartado con el procedimiento para realizar el análisis dinámico (de ser necesario) y por último una serie de criterios para diseñar el acero de refuerzo en este tipo de fundaciones.



**Figura 70: Capítulo 3. Procedimiento de Diseño**

Fuente: elaboración propia (2023).

- **Capítulo 4. Ejemplos Prácticos**

Se presentan dos ejemplos siguiendo el procedimiento planteado en el Capítulo IV, esto para aclarar dudas sobre el uso de las ecuaciones, consideraciones y ajustes. El primer ejercicio es para una bomba que según sus características no requiere de análisis dinámico, ya que se desea presentar como resolver esta variante. Y por otro lado una bomba de alta potencia que sí requiere análisis dinámico.

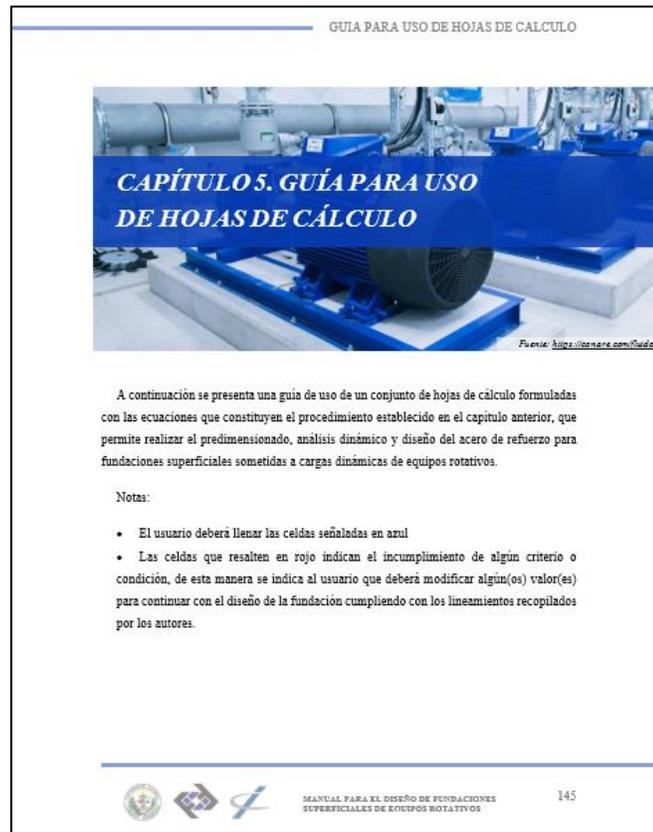


**Figura 71: Capítulo 4. Ejemplos Prácticos**

Fuente: elaboración propia (2023).

- Capítulo 5. Guía para uso de hojas de cálculo

Por último, se muestra una guía para el uso de unas hojas de cálculo formuladas en Excel que permiten realizar todo el procedimiento expuesto a lo largo del manual, disminuyendo el tiempo invertido por parte del ingeniero. En el archivo adjunto al manual solo se debe ingresar los datos iniciales del equipo y el estudio de suelo para que se realice las 3 etapas de la metodología propuesta.



**Figura 72: Capítulo 5. Guía para uso de hojas de cálculo**

Fuente: Arya et al. (2023).

Esta estructura atiende a una línea secuencial que facilita la comprensión del contenido del manual, ya que abarca la información que da fundamento teórico al posterior procedimiento estructurado de manera sistemática y organizada, añadiendo los ejemplos prácticos para ilustrar la aplicación de dicho procedimiento; estos ejemplos incluyen un caso real de una fundación perteneciente a un proyecto de un complejo industrial de generación de potencia que está siendo desarrollado por la empresa venezolana Inelectra S.A.C.A.

La utilidad de la herramienta propuesta se verifica ya que está siendo empleada por dicha empresa en la instrucción del personal de ingeniería civil para la comprensión de todo lo relacionado a las fundaciones sometidas a cargas dinámicas, e incluso en el diseño de diversos cimientos para equipos rotativos, ya que permite obtener resultados

satisfactorios sin tener que utilizar programas avanzados de análisis dinámico estructural, como DynaN, y familiarizarse con el tema para entender qué está detrás de dichos programas, en caso de requerir su uso.

Además, como complemento al manual, se desarrolló una hoja de cálculo que estructura, a través de formulaciones comunes de Microsoft Excel, el procedimiento que presenta, simplificando aún más la tarea del usuario, al tener que introducir únicamente las características del suelo, de los materiales y del equipo en cuestión.

La validez de esta hoja de cálculo se verificó al obtener resultados exactamente iguales a los ejemplos presentados en el manual que fueron corroborados con el procedimiento expuesto en Arya et al. (1979), por lo que también está siendo usada por Inelectra para el diseño de cimentaciones de equipos rotativos. Para garantizar el buen empleo de esta herramienta digital, el manual incluye en su parte final una guía que explica el funcionamiento y cómo debe usarse esta hoja de cálculo para obtener resultados satisfactorios.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A la luz de los resultados obtenidos, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación, que buscan aclarar al lector los puntos de llegada y aprendizajes obtenidos con la realización del trabajo en cuanto al método desarrollado y logro de objetivos, así como presentar una lista de sugerencias a aquellos interesados en los temas tratados a lo largo de este tomo, como lo son la dinámica estructural, dinámica de suelos, fundaciones sometidas a cargas dinámicas y manuales como herramientas de estandarización de procesos asociados a proyectos de ingeniería.

#### **Conclusiones**

Las fundaciones sometidas a cargas dinámicas son estructuras que, además de cumplir la función de cualquier otro cimiento, que es transmitir los esfuerzos de lo que se apoya en ella al suelo, tienen la particularidad de que deben resistir las vibraciones generadas por cargas que varían en magnitud, dirección, sentido y/o punto de aplicación; de eso depende que la función general a la que esté destinada sea cumplida, obedeciendo a criterios de efectividad constructiva, seguridad, operación y mantenimiento.

Luego de haber realizado la revisión, resumen y análisis de los distintos libros, normas y guías técnicas, tomando como punto de partida la norma ACI 351.3R-18, fue posible identificar las consideraciones para el diseño de fundaciones superficiales de equipos rotativos, elaborando su procedimiento de predimensionado, análisis dinámico y diseño del acero de refuerzo.

Por otro lado, se logró diseñar una fundación para una bomba de un proyecto de ingeniería de la realidad, y a través de este ejemplo, se verificó la validez del análisis dinámico del procedimiento propuesto, haciendo una comparación con ejercicios

presentados en la bibliografía de Arya et al. (1979), obteniéndose resultados con un pequeño margen de error, respecto a los expuestos en dicho libro.

Se destaca la importancia de definir cuál método de análisis dinámico se empleará en el diseño de las fundaciones cargadas dinámicamente, pues este influye en los resultados al ser un factor determinante de los parámetros dinámicos del sistema, sea a través de un programa computarizado, hoja de cálculo o procedimiento manual; esto se demostró, al comparar los resultados obtenidos (para el cimiento tomado como ejemplo), a través del procedimiento estructurado y del programa de análisis dinámico estructural DynaN.

Además, se logró elaborar la propuesta de manual a través de la definición de su estructura técnica, otorgándole carácter formal y cubriendo el contenido, de forma concisa, para el cual fue pensado; este representa una herramienta de rápida consulta para profesionales y estudiantes de ingeniería que requieran diseñar fundaciones superficiales para equipos rotativos o estén interesados en el tema, que facilita el proceso de diseño de estas estructuras, resultando en la mejora de la efectividad de procedimientos asociados a proyectos de ingeniería.

Por último, la hoja de cálculo presentada con la formulación del procedimiento establecido en el manual, constituye un complemento del mismo, que permitirá agilizar aún más el proceso de diseño de las estructuras en cuestión, sin necesidad de recurrir a costosos programas computarizados de análisis dinámico, para los que, además, hay que invertir tiempo en aprender a utilizarlo.

### **Recomendaciones**

- Hacer lectura del fundamento teórico expuesto en el manual para entender los principios fundamentales de vibración de estructuras y suelos, antes de diseñar una fundación cargada dinámicamente.
- Realizar los ejemplos presentados en el manual para familiarizarse con el procedimiento y darle sentido al fundamento teórico.

- Tratar, en la medida de lo posible, que la fundación en cuestión sea rígida para facilitar su diseño y no tener que recurrir a métodos de análisis por elementos finitos.
- Antes de usar cualquier programa computarizado de análisis dinámico, consultar en su manual de uso acerca de cuál es el método que emplea, y tomar en cuenta las consideraciones asociadas a ese método.
- Seguir las indicaciones dadas para el diseño del acero de refuerzo, a pesar de que son sugerencias, ya que recopilan información de varias guías técnicas y experiencia de ingenieros, así como también atienden al criterio que predomina en el diseño del refuerzo metálico de estas fundaciones: el acero solo cumple funciones constructivas y de prevención de daños por retracción y cambios de temperatura durante el fraguado del concreto.
- Para el diseño del acero de refuerzo es recomendable estimar longitudes de vaciado de la fundación menores a 6m, ya que a mayor separación de vaciado la cuantía aumenta, de acuerdo con la norma ACI 350, y esto puede incurrir en mayores gastos innecesarios y aumento de la relación peso de acero/volumen de concreto.
- Utilizar la hoja de cálculo luego de haber estudiado el fundamento teórico y haberse familiarizado con el procedimiento (ambos expuestos en el manual), de esta manera, se comprenderá mejor el funcionamiento de la herramienta digital y se prevendrán equivocaciones y/o errores.
- Consultar las referencias señaladas a lo largo de la investigación y listadas en la sección siguiente, en caso de querer ahondar en el estudio de las fundaciones sometidas a cargas dinámicas.
- Dar continuidad a esta investigación, ampliando el alcance del manual y/o la hoja de cálculo propuestos, al estudio de fundaciones para equipos reciprocantes y de impacto, fundaciones indirectas, aporticadas o cualquiera de los otros tipos expuestos en el Marco Teórico, o el diseño, en cualquiera de estos casos, a través de métodos válidos para fundaciones que no necesariamente son rígidas, e incluso variando el método utilizado para el análisis dinámico.
- Ampliar este trabajo a través de la comparación de distintos métodos para el análisis dinámico de los diferentes tipos de cimientos para máquinas.

- Actualizar el manual propuesto de acuerdo a las revisiones y renovaciones que se hagan a los documentos consultados como referencias para su realización.
- A las universidades, institutos de investigación e investigadores venezolanos, se les recomienda promover los estudios en dinámica de fundaciones a nivel de pregrado y posgrado, para que exista mayor número de referencias nacionales en esta área, así como en la dinámica de estructuras y suelos en general, que den pie al desarrollo de normativas y guías técnicas oficiales, de uso obligatorio y/o para orientación en el diseño de estructuras sometidas a cargas dinámicas.
- A las empresas nacionales, fomentar el estudio de estas estructuras para la formación, capacitación y especialización del talento humano con el que operan.

## REFERENCIAS

- Alcalá, D., & Vidal, G. (2017). *Manual para el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas (Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil)* Universidad Católica Andrés Bello. Guayana.
- American Concrete Institute. (2006). *ACI 350-06. Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary*. Farmington Hills: ACI.
- American Concrete Institute. (2018). *ACI 351 3R-18. Report on Foundations for Dynamic Equipment*. Farmington Hills: ACI.
- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills: ACI.
- American Petroleum Institute. (2009). *API 686-2009. Recommended Practice for Machinery Installation and Installation Design*. Washington, D.C.: API.
- American Society of Civil Engineers. (2018). *Concrete Foundations for Turbine Generators: Analysis, Design and Construction*. Reston, Virginia: Hongchun Liu, P.E.
- Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación*. Caracas: Episteme.
- Arya, S., O'Neill, M., & Pincus, G. (1979). *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Balestrini, M. (2006). *Como se Elabora el Proyecto de Investigación*. Caracas: BL Consultores Asociados.
- Barkan, D. (1962). *Dynamics of Bases and Foundations*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill Book Company, Inc.

- Calavera, J. (2000). *Cálculo de Estructuras de Cimentación*. Madrid: Intemac: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones.
- Das, B., & Ramana, G. (2011). *Principles of Soil Dynamics*. United States of America: Cengage Learning.
- Delgado, J. E., & Flora, R. A. (2023). *Manual de diseño de fundaciones para equipos rotativos (Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Civil) Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*. Caracas, Venezuela.
- Ferrero, L., & Milagros, T. (2021). *Diseño de una cimentación sometida a cargas dinámicas causadas por prensa mecánica de alto impacto (Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil) Universidad Tecnológica Nacional*. Buenos Aires.
- Fimbres, C., & Martha, C. (s.f.). *Dinámica Estructural*.
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelos, fundaciones y muros*. Caracas: Maria Graciela Fratelli.
- Garza, L. (2000). *Diseño de Estructuras de Cimentación*. Medellín: Colección Facultad de Minas 120 años.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. México DF: Mc Graw Hill.
- Herrera, F. (2017). *Manual para diseño de cimentaciones para equipos vibratorios (Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil) Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*. Bogotá.
- Herrera, R. (2011). *Comportamiento del sistema suelo-fundación sometido a cargas dinámicas (Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*. Valparaíso.

- Hurtado, J. (2007). *El Proyecto de Investigación*. Caracas: Quirón.
- Hurty, W., & Rubinstein, M. (1964). *Dynamics of Structures*. New Jersey: Prentices-Hall, Inc.
- Jumikis, A. (1969). *Theoretical Soil Mechanics*. United States of America: Van Nostrand Reinhold.
- Monachello, F., & Moreno, B. (2013). *Diseño de bloques de cimentaciones para máquinas dinámicas (Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil) Universidad de los Andes (Colombia)*. Bogotá.
- Núñez, A. (2020). *Diseño de una cimentación para un sistema de enfriamiento y mesa de carga en caliente sometida a fuerzas dinámicas para la empresa Novacero C.A. en Planta Lasso (Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil) Universidad Politécnica Salesiana*. Quito, Ecuador.
- Palella, S., & Martins, F. (2006). *Metodología de la Investigación Cuantitativa*. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- Pulido, M. (2015). Ceremonial y protocolo: métodos y técnicas de la investigación científica. *Opción*, 1012-1587.
- Real Academia Española. (2022). *Diccionario de la Lengua Española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/manual>
- Reese, L., Tower, S., Arrellaga, J., & Vásquez, L. (abril de 2012). Obtenido de <https://www.ensoftinc.com/products/dynan/doc/dynan-users-manual.pdf>
- Richart Jr., F., Hall Jr., J., & Woods, R. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*. United States of America: PRENTICE-HALL, INC.

Rodríguez, J. M., Serra, J., & Oteo, C. (1995). *Curso Aplicado de Cimentaciones*. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

Srinivasulu, P., & Vaidyanathan, C. (1977). *Handbook of Machine Foundations*. New Delhi: McGraw-Hill Book Company.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (2016). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.

Villafranca, D. (2002). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw-Hill.

## ANEXOS

### Anexo 1. Cálculos de cimentación de bomba de alta presión en complejo de generación de potencia

#### *Datos generales*

##### *Características del equipo*

- Ancho del skid ( $a_{skid}$ ) = 2,50 m
- Largo del skid ( $l_{skid}$ ) = 7,41 m
- Separación longitudinal entre pernos de anclaje ( $S_l$ ) = 6,30 m
- Separación transversal entre pernos de anclaje ( $S_t$ ) = 2,24 m
- Altura del eje del equipo desde la base ( $d_e$ ) = 1,27 m
- Longitud de pernos ( $L_p$ ) = 0,15m
- Peso total del equipo ( $W_{eq}$ ) = 26,426 Tf
- Peso de los componentes rotativos = 17,112 Tf
- Potencia del equipo ( $P_{eq}$ ) = 3900 kW
- Frecuencia angular del equipo ( $\omega_o$ ) = 3589 rpm

##### *Características del suelo*

- Se considera una capacidad admisible del suelo ( $\sigma_{adm}$ ) = 24,000 T/m<sup>2</sup>
- Suelo cohesivo
- No se considera empuje por nivel freático para este diseño.
- $\gamma_s = 19,50 \text{ kN/m}^3$
- $V_s = 190 \text{ m/s}$
- $\nu_s = 0,35$
- $G = 2,29 * 10^8 \text{ kN/m}^2$

- $\rho = \frac{\gamma_s}{g} = \frac{19,50 \text{ kN/m}^3}{9,81 \text{ m/s}^3} 1,988 \text{ T/m}^3$
- $\beta_s = 0,05$

### **Características de los materiales**

- $\gamma_c = 2400 \text{ kgf/m}^3$
- $f'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$
- $fy = 4200 \text{ kgf/cm}^2$

### **Predimensionado**

#### 1. Largo del bloque de fundación

Se determinó el largo mínimo según lo indicado en la guía API 686-2009, esta condición fue utilizada para asegurar una distancia mínima de los pernos de anclaje del equipo al borde de la fundación. El largo del bloque escogido es el mayor entre  $a_1$  y  $a_2$ :

$$a_1 = a_{skid} + 2 * 0,075 \text{ m} = 7,41 \text{ m} + 2 * 0,075 \text{ m} = \mathbf{7,560 \text{ m}}$$

$$a_2 = S_L + 2 * 0,015 \text{ m} = 6,30 \text{ m} + 2 * 0,015 \text{ m} = \mathbf{6,330 \text{ m}}$$

$$a = a_1 = \mathbf{7,560 \text{ m}}$$

#### 2. Ancho del bloque de fundación

Igualmente, se tuvo en consideración lo establecido para el largo de la fundación, pero en este caso tomando en cuenta la distancia entre pernos en la dimensión más corta del *skid* ( $S_T$ ). El ancho del bloque es el mayor valor entre  $b_1$  y  $b_2$ :

$$b_1 = b_{skid} + 2 * 0,075 \text{ m} = 2,500 \text{ m} + 2 * 0,075 \text{ m} = \mathbf{2,650 \text{ m}}$$

$$b_2 = S_T + 2 * 0,015 \text{ m} = 2,240 \text{ m} + 2 * 0,015 \text{ m} = \mathbf{2,540 \text{ m}}$$

$$b = b_1 = 2,650 \text{ m}$$

### 3. Espesor de la fundación

El espesor mínimo del bloque se determinó según la consideración de la ACI 351.3R-18 (2018) en su Art. 7.1.2.1. Este espesor asegura el embebido de los pernos y rigidez de la fundación, y es el mayor valor entre:

$$h_1 = 0,600 \text{ m}$$

$$h_2 = L_p + r = (0,150 + 0,050) \text{ m} = 0,200 \text{ m}$$

$$h_3 = \frac{b}{5} = \frac{2,810 \text{ m}}{5} = 0,562 \text{ m}$$

$$h_4 = \frac{a}{10} = \frac{7,560 \text{ m}}{10} = 0,756 \text{ m}$$

$$h_5 = 0,600 \text{ m} + \frac{a}{30} = 0,600 \text{ m} + \frac{7,560 \text{ m}}{30} = 0,850 \text{ m}$$

$$h = \text{máx} [h_1; h_2; h_3; h_4; h_5] = h_5 = 0,850 \text{ m}$$

### 4. Chequeo del ancho, espesor y peso de la fundación

Una vez obtenidas las dimensiones mínimas, se verificó que el ancho, espesor y peso de la fundación, cumplieran con lo establecido en la guía técnica ACI 351.3R-18 Art. 7.1.2.1.

$$b > 1,5 * (h + d_e) = 1,5 * (0,850 + 1,270) \text{ m} = 3,180 \text{ m}$$

$$h > \frac{b}{5} = \frac{3,180 \text{ m}}{5} = 0,636 \text{ m} < 0,850 \text{ m} \rightarrow OK$$

$$W_f > 3 * W_{eq} = 3 * 26426 \text{ kgf} = 79278 \text{ kgf}$$

$$W_f = 2400 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} * 3,18 \text{ m} * 7,56 \text{ m} * 0,85 \text{ m} = \mathbf{49043 \text{ kgf}} < \mathbf{79278 \text{ kgf}} \rightarrow \text{NO}$$

Como el peso no cumplió con la relación mostrada, las dimensiones de la fundación debieron ser aumentadas, iniciando un proceso de iteración que culminó cuando todas las condiciones anteriores se cumplieron. Se propusieron las siguientes dimensiones:

$$a = \mathbf{9,000 \text{ m}}$$

$$b = \mathbf{4,000 \text{ m}}$$

$$h = \mathbf{1,000 \text{ m}}$$

Resultando que:

$$b > 1,5 * (h + d_e) = 1,5 * (1,000 + 1,270) \text{ m} = \mathbf{2,270 \text{ m}} < \mathbf{4,000 \text{ m}} \rightarrow \text{OK}$$

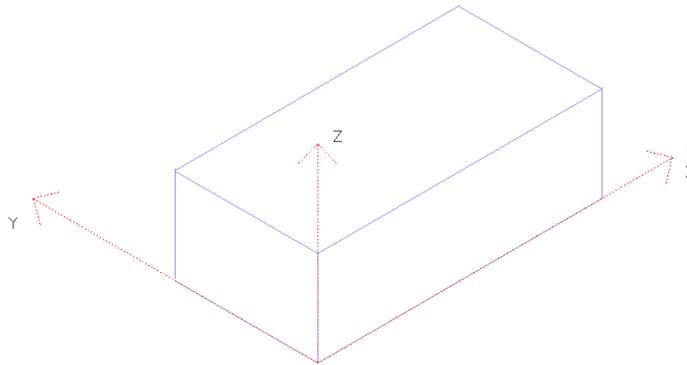
$$h > \frac{b}{5} = \frac{4,000 \text{ m}}{5} = \mathbf{0,800 \text{ m}} < \mathbf{0,850 \text{ m}} \rightarrow \text{OK}$$

$$W_f = 2,400 \frac{\text{Tf}}{\text{m}^3} * 9 \text{ m} * 4 \text{ m} * 1 \text{ m} = \mathbf{86,400 \text{ Tf}} > \mathbf{79,278 \text{ Tf}} \rightarrow \text{OK}$$

##### 5. Centro de masa de pedestales

Como el equipo no requiere de pedestales no es necesario obtener el centro de masa de los pedestales

Además, se requiere obtener el centro de rigidez. Por ser un bloque homogéneo, su centro de masa coincide con el centro de rigidez en las coordenadas “X” y “Y”, cuyas coordenadas se midieron desde uno de los vértices inferiores del bloque como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 74: Sistema de coordenadas del bloque de fundación**

Fuente: elaboración propia (2023).

Por lo tanto, el centro de masa del bloque posee las siguientes coordenadas:

**Tabla 5. Coordenadas del centro de rigidez**

$X_{CR}(m)$	$Y_{CR}(m)$	$Z_{CR}(m)$
4,500	2,000	0,00

Fuente: elaboración propia (2023).

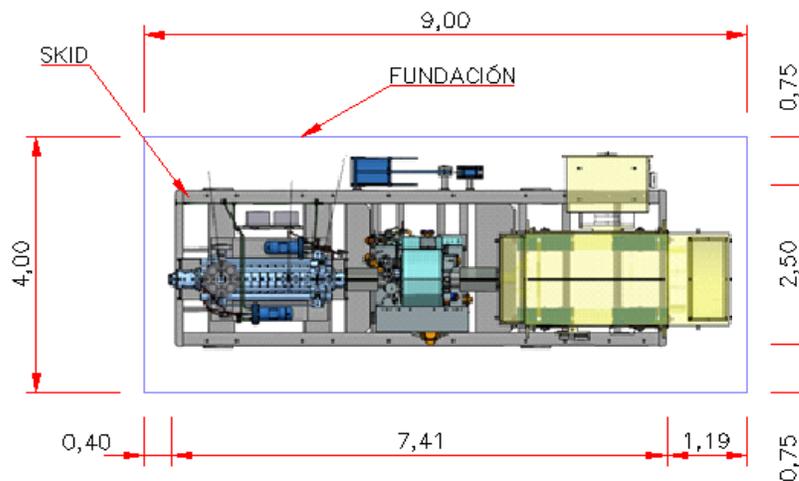
Cálculo tipo:

$$X_{CR} = \frac{a}{2} = \frac{9,000 \text{ m}}{2} = 4,500 \text{ m}$$

$$Y_{CR} = \frac{b}{2} = \frac{4,000 \text{ m}}{2} = 2,000 \text{ m}$$

#### 6. Centro de masa del sistema equipo-fundación

Luego, se calcularon las coordenadas el centro de masa del equipo respecto al origen indicado, ubicando el *skid* como se muestra en la figura a continuación.



**Figura 75: Ubicación de skid sobre fundación**

Fuente: elaboración propia (2023).

Según datos otorgados por el fabricante, se puede obtener la siguiente información:

**Tabla 6: Ubicación del CM y peso de componentes del equipo**

Componente	$X_{CM}$ (m)	$Y_{CM}$ (m)	$Z_{CM}$ (m)	W (Tf)	$W * X_{CM}$ (Tf-m)	$W * Y_{CM}$ (Tf-m)	$W * Z_{CM}$ (Tf-m)
1 Bomba	1,85	2,27	2,27	3,112	5,757	6,224	7,064
2 Motor	7,08	2,27	2,27	14,000	99,050	28,000	31,780
3 Bomba de engranaje	4,15	2,27	2,27	2,200	9,130	4,400	4,994
4 Skid	4,19	1,34	1,34	4,700	19,707	8,756	6,298
5 Válvula automática	2,76	3,99	3,99	0,870	2,397	1,740	3,471
6 Work oil	3,37	2,27	2,27	0,694	2,339	2,429	1,575
7 Auxiliar	3,47	2,70	2,70	0,850	2,945	0,536	2,295
8 Bloque de fundación	4,50	0,50	0,50	86,400	388,800	172,800	43,200
Totales				112,826	530,125	224,885	100,678

Fuente: elaboración propia (2023).

Estos datos, permiten calcular las coordenadas del centro de masa del sistema equipo-fundación:

**Tabla 7: Coordenadas del CM del conjunto equipo-fundación**

X (m)	Y (m)	Z (m)
4,699	1,993	0,889

Fuente: elaboración propia (2023).

Cálculo tipo:

$$X_{cm_o} = \frac{\sum_{i=1}^8 W_i * X_i}{\sum_{i=1}^8 W_i} = \frac{530,125 Tf - m}{112,826 Tf} = \mathbf{4,699 m}$$

$$Y_{cm_o} = \frac{\sum_{i=1}^8 W_i * Y_i}{\sum_{i=1}^8 W_i} = \frac{224,885 Tf - m}{112,826 Tf} = \mathbf{1,993 m}$$

$$Z_{cm_o} = \frac{\sum_{i=1}^8 W_i * Z_i}{\sum_{i=1}^8 W_i} = \frac{100,678 Tf - m}{112,826 Tf} = \mathbf{0,889 m}$$

#### 7. Cálculo de excentricidad

Se calculó la excentricidad en planta del centro de masa del conjunto equipo fundación respecto al centro de rigidez (CR), que coincide con el centro geométrico de la huella del cimiento:

**Tabla 8: Coordenadas del centro de rigidez del sistema**

X <sub>CR</sub> (m)	Y <sub>CR</sub> (m)
4,000	2,000

Fuente: elaboración propia (2023).

$$e_x = \frac{|X_{cm_o} - X_{CR}|}{a} * 100\% = \frac{|4,699 - 4,500| m}{9 m} * 100\% = \mathbf{2,207\% < 5\%}$$

$$e_y = \frac{|Y_{cm_o} - Y_{CR}|}{b} * 100\% = \frac{|1,993 - 2,000| m}{4 m} * 100\% = \mathbf{0,170\% < 5\%}$$

**Tabla 9: Excentricidad del CM del equipo**

$e_x$ (%)	$e_y$ (%)
2,207	0,170

Fuente: elaboración propia (2023).

#### 8. Verificación de la presión en el suelo

La presión actuante sobre el suelo en las esquinas de la fundación se determina mediante la ecuación general del estado de tensiones, determinado por el peso total del sistema equipo-fundación (asumiendo su aplicación en el centro de la huella de fundación, por ser rígida), y los momentos generados por el peso del equipo, ya que el momento generado por el peso del bloque de fundación es nulo:

$$\sigma = \frac{W_o}{a * b} \pm \frac{6M_{xx}}{a * b^2} \pm \frac{6M_{yy}}{a^2 * b}$$

**Tabla 10: Coordenadas del CM del conjunto equipo-fundación**

X (m)	Y (m)	Z (m)
4,699	1,993	0,889

Fuente: elaboración propia (2023).

Cálculo tipo:

$$X_{cm_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^7 W_i * X_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} = \frac{141,325 Tf - m}{26,426 Tf} = \mathbf{5,348 m}$$

$$Y_{cm_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^7 W_i * Y_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} = \frac{52,085 Tf - m}{26,426 Tf} = \mathbf{1,971 m}$$

$$Z_{cm_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^7 W_i * Z_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} = \frac{57,101 Tf - m}{26,426 Tf} = \mathbf{2,161 m}$$

$$M_{xx} = W_{eq} * (X_{cm_{eq}} - X_{cm_f}) = 26,426 \text{ Tf} * (5,348 - 4,500) \text{ m}$$

$$M_{xx} = \mathbf{22,408 \text{ Tf} - m}$$

$$M_{yy} = W_{eq} * (Y_{cm_{eq}} - Y_{cm_f}) = 26,426 \text{ Tf} * (1,971 - 2,000) \text{ m}$$

$$M_{yy} = \mathbf{-0,767 \text{ Tf} - m}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{4,054} \frac{\text{Tf}}{\text{m}^2} < 12,000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = \frac{\sigma_{adm}}{2} \rightarrow \text{OK}$$

$$\sigma_2 = \mathbf{2,186} \frac{\text{Tf}}{\text{m}^2} < 12,000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = \frac{\sigma_{adm}}{2} \rightarrow \text{OK}$$

$$\sigma_3 = \mathbf{2,215} \frac{\text{Tf}}{\text{m}^2} < 12,000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = \frac{\sigma_{adm}}{2} \rightarrow \text{OK}$$

$$\sigma_4 = \mathbf{4,082} \frac{\text{Tf}}{\text{m}^2} < 12,000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = \frac{\sigma_{adm}}{2} \rightarrow \text{OK}$$

La presión admisible del suelo, según estudio de suelos, es de 24 Tf/m<sup>2</sup>, pero se tomó la mitad para comparar con las presiones resultantes como factor de seguridad; por lo que las presiones debajo de la fundación son menores que la tensión admisible del suelo.

### *Análisis dinámico*

9. Cálculo de la relación largo/ancho de la fundación

$$\frac{a}{b} = \frac{9 \text{ m}}{4 \text{ m}} = \mathbf{2,25}$$

Como  $a/b > 2$  se pudo usar las ecuaciones propuestas por Richart y Whitman (1967) para la equivalencia de una fundación circular con una fundación rectangular.

10. Cálculo de los radios equivalentes

Se calculó el radio equivalente para los diferentes movimientos de la fundación.

Traslación:

$$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} = \sqrt{\frac{9 \text{ m} * 4 \text{ m}}{\pi}} = \mathbf{3,385 \text{ m}}$$

Balanceo alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$R_{\psi a} = \sqrt[4]{\frac{b^3 a}{3\pi}} = \sqrt[4]{\frac{(4 \text{ m})^3 * (4 \text{ m})}{3\pi}} = \mathbf{2,796 \text{ m}}$$

Balanceo alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$R_{\psi b} = \sqrt[4]{\frac{a^3 b}{3\pi}} = \sqrt[4]{\frac{(9 \text{ m})^3 * (4 \text{ m})}{3\pi}} = \mathbf{4,194 \text{ m}}$$

Torsión:

$$R_{\eta} = \sqrt[4]{\frac{ab(a^2 + b^2)}{6\pi}} = \sqrt[4]{\frac{9 \text{ m} * 4 \text{ m} * ((4 \text{ m})^2 + (9 \text{ m})^2)}{6\pi}} = \mathbf{3,689 \text{ m}}$$

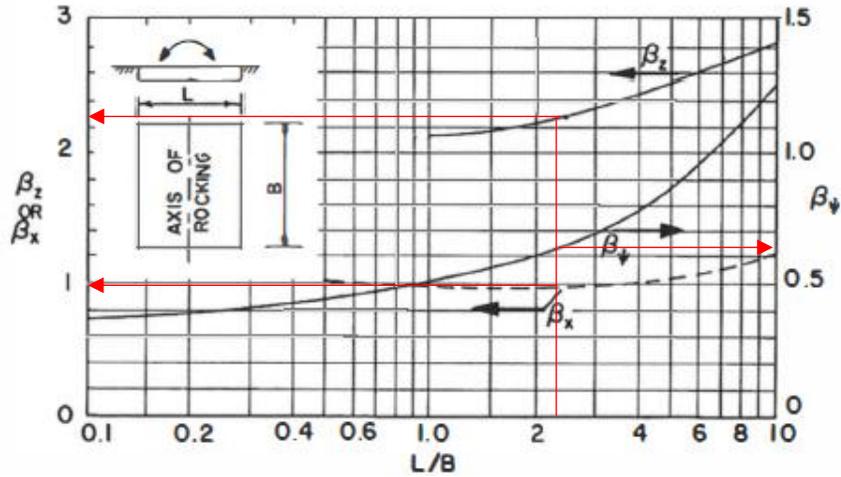
11. Cálculo de la frecuencia adimensional

$$a_o = \omega R \sqrt{\rho/G} = 375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 3,385 \text{ m} \sqrt{\frac{1,99 \text{ kN} * \frac{\text{s}^2}{\text{m}^4}}{2,29 * 10^8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}} = \mathbf{0,119 < 1}$$

Como el valor de frecuencia adimensional es menor a 1, se verificó la validez de las ecuaciones de Richart-Whitman.

12. Cálculo de la rigidez

Luego, se calcularon los valores de la rigidez del sistema suelo-fundación de cada grado de libertad, usando a su vez la gráfica que se muestra a continuación, para la obtención los coeficientes de fundación rectangular:



**Tabla 11: Coeficientes de fundación rectangular**

$\beta_v$	$\beta_u$	$\beta_\psi$
2,250	1,000	0,630

Fuente: elaboración propia (2023).

Rigidez vertical:

$$k_v = \frac{G}{(1-\nu)} \beta_v \sqrt{ab} = \frac{2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2}}{(1-0,35)} * 2,25 * \sqrt{9m * 4m}$$

$$k_v = 4,760 * 10^9 \text{ kN/m}$$

Rigidez horizontal:

$$k_u = 2(1+\nu)G\beta_u\sqrt{ab} = 2 * (1-0,35) * 2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2} * 1,0 * \sqrt{9m * 4m}$$

$$k_u = 3,710 * 10^9 \text{ kN/m}$$

Rigidez de balanceo alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$k_{\psi a} = \frac{G}{(1-\nu)} \beta_{\psi} b a^2 = \frac{22,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2}}{(1-0,35)} * 0,63 * 4m * (9m)^2$$

$$k_{\psi a} = 7,191 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

Rigidez de balanceo alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$k_{\psi b} = \frac{G}{(1-\nu)} \beta_{\psi} a b^2 = \frac{2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2}}{(1-0,35)} * 0,63 * 9m * (4m)^2$$

$$k_{\psi b} = 3,196 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

Rigidez torsional:

$$k_{\eta} = \frac{16}{3} G R_{\eta}^3 = \frac{16}{3} * 2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2} * (3,689 \text{ m})^3 = 6,133 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

13. Cálculo de la razón de masa y razón de amortiguamiento

Ahora, se debe calcular la relación de masa y amortiguamiento para cada grado de libertad.

En la componente vertical:

$$B_v = \frac{1-\nu}{4} * \frac{W}{\gamma R^3} = \frac{1-0,35}{4} * \frac{112,826 \text{ T} * 9,81 \text{ m/s}^2}{19,5 \text{ kN/m}^3 * (3,385 \text{ m})^3} = 2,375 * 10^{-1}$$

$$D_v = \frac{0,425}{\sqrt{B_v}} = \frac{0,425}{\sqrt{0,237}} = 8,720 * 10^{-1}$$

En la componente horizontal:

$$B_u = \frac{7 - 8v}{32(1 - v)} * \frac{W}{\gamma R^3} = \frac{7 - 8(0,35)}{32(1 - 0,35)} * \frac{112,826 T * 9,81 \frac{m}{s^2}}{\frac{19,5kN}{m^3} * (3,385 m)^3} = 2,952 * 10^{-1}$$

$$D_u = \frac{0,288}{\sqrt{B_u}} = \frac{0,288}{\sqrt{0,295}} = 5,301 * 10^{-1}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “a”:

**Tabla 12: Coeficientes de fundación rectangular**

Componente	m (T)	a (m)	b (m)	c (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	x' <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	y' <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	z' <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )
1 Bomba	3,112	-	-	-	1,850	2,000	2,270	7,023	0,000	5,153
2 Motor	14,000	-	-	-	7,075	2,000	2,270	6,631	0,000	5,153
3 Bomba de engranaje	2,200	-	-	-	4,150	2,000	2,270	0,123	0,000	5,153
4 Skid	4,700	-	-	-	4,193	1,863	1,337	0,094	0,019	1,788
5 Válvula automática	0,870	-	-	-	2,755	2,000	3,993	3,045	0,000	15,944
6 Work oil	0,694	-	-	-	3,370	3,500	2,270	1,277	2,250	5,153
7 Auxiliar	0,850	-	-	-	3,465	0,630	2,270	1,071	1,877	5,153
8 Bloque de fundación	86,400	9,000	4,000	1,000	4,500	2,000	0,500	0,000	0,000	0,250
Totales								19,263	4,146	43,746

Fuente: elaboración propia (2023).

$$I_{\psi a} = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{m_i}{12} (b_i^2 + h_i^2) + m_i * (y_i'^2 + z_i'^2) \right)$$

$$y' = Y_i - Y_{CR}$$

$$z' = Z_i - Z_{CR}$$

$$I_{\psi a} = \frac{86,400 T}{12} * ((9m)^2 + (4m)^2) + 112,826 T * (4,146 + 43,746) m^2$$

$$I_{\psi a} = 276,986 T - m^2$$

$$B_{\psi a} = \frac{3(1-\nu)}{8} * \frac{I_{\psi}}{\rho R_{\psi a}^5} = \frac{3(1-0,35)}{8} * \frac{276,986 T - m^2}{1,988 \frac{T}{m^3} * (2,796m)^5}$$

$$B_{\psi a} = 1,988 * 10^{-1}$$

$$D_{\psi a} = \frac{0,15}{(1 + B_{\psi a})\sqrt{B_{\psi a}}} = \frac{0,15}{(1 + 1,988 * 10^{-1})\sqrt{1,988 * 10^{-1}}} = 2,807 * 10^{-1}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$I_{\psi b} = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{m_i}{12} (a_i^2 + h_i^2) + m_i * (x_i'^2 + z_i'^2) \right)$$

$$x' = X_i - X_{CR}$$

$$z' = Z_i - Z_{CR}$$

$$I_{\psi b} = \frac{86,400 T}{12} * ((9m)^2 + (4m)^2) + 112,826 T * (19,263 + 43,746) m^2$$

$$I_{\psi b} = 861,583 T - m^2$$

$$B_{\psi b} = \frac{3(1-\nu)}{8} * \frac{I_{\psi}}{\rho R_{\psi b}^5} = \frac{3(1-0,35)}{8} * \frac{861,583 T - m^2}{1,988 \frac{T}{m^3} * (4,194m)^5}$$

$$B_{\psi b} = 8,142 * 10^{-2}$$

$$D_{\psi b} = \frac{0,15}{(1 + B_{\psi b})\sqrt{B_{\psi b}}} = \frac{0,15}{(1 + 8,142 * 10^{-2})\sqrt{8,142 * 10^{-2}}} = 4,861 * 10^{-1}$$

En la torsión (rotación alrededor del eje “z”):

$$I_{\eta} = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{m_i}{12} (a_i^2 + b_i^2) + m_i * (x'_i{}^2 + y'_i{}^2) \right)$$

$$x' = X_i - X_{CR}$$

$$y' = Y_i - Y_{CR}$$

$$I_{\eta} = \frac{86,400 T}{12} * ((9m)^2 + (4m)^2) + 112,826 T * (19,263 + 4,146) m^2$$

$$I_{\eta} = \mathbf{821,486 T - m^2}$$

$$B_{\eta} = \frac{I_n}{\rho R_{\eta}^5} = \frac{821,486 T - m^2}{1,988 \frac{T}{m^3} * (3,689 m)^5} = \mathbf{6,047 * 10^{-1}}$$

$$D_{\eta} = \frac{0,50}{(1 + 2B_{\eta})} = \frac{0,50}{(1 + 2 * 6,407 * 10^{-1})} = \mathbf{2,263 * 10^{-1}}$$

#### 14. Coeficiente de amortiguamiento

En la componente vertical:

$$c_v = 2D_v \sqrt{k_v m} = 2 * 8,720 * 10^{-1} \sqrt{4,756 * 10^9 \frac{kN}{m} * 112,826 T}$$

$$c_v = \mathbf{1,278 * 10^6 \frac{T}{s}}$$

En la componente horizontal:

$$c_u = 2D_u \sqrt{k_u m} = 2 * 5,301 * 10^{-1} \sqrt{3,710 * 10^9 \frac{kN}{m} * 112,826 T}$$

$$c_u = \mathbf{6,859 * 10^5 \frac{T}{s}}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$c_{\psi a} = 2D_{\psi a} \sqrt{k_{\psi a} I_{\psi a}} = 2 * 2,807 * 10^{-1} * \sqrt{7,191 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m} * 276,987 \text{ T} - \text{m}^2}$$

$$c_{\psi a} = 2,505 * 10^6 \frac{\text{T} - \text{m}^2}{\text{s}}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$c_{\psi b} = 2D_{\psi b} \sqrt{k_{\psi b} I_{\psi b}} = 2 * 4,861 * 10^{-1} \sqrt{3,196 * 10^{10} \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 861,583 \text{ T} - \text{m}^2}$$

$$c_{\psi b} = 5,102 * 10^6 \frac{\text{T} - \text{m}^2}{\text{s}}$$

En la torsión (rotación alrededor del eje “z”):

$$c_{\eta} = 2D_{\eta} \sqrt{k_{\eta} I_{\eta}} = 2 * 2,263 * 10^{-1} \sqrt{6,133 * 10^{10} \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 821,486 \text{ T} - \text{m}^2}$$

$$c_{\eta} = 3,213 * 10^6 \frac{\text{T} - \text{m}^2}{\text{s}}$$

15. Ajuste de la rigidez:

Se realizó el ajuste de la rigidez para tomar en cuenta la influencia de las características del suelo en este parámetro.

En la componente vertical:

$$k_v(\text{ajus}) = k_v - 2\beta_s \omega_m c_v$$

$$k_v(\text{ajus}) = 4,756 * 10^9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} - 2 * 0,05 * 375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * 1,278 * 10^6 \frac{\text{T}}{\text{s}}$$

$$k_v(ajus) = 4,708 * 10^9 \frac{kN}{m}$$

En la componente horizontal:

$$k_u(ajus) = k_u - 2\beta_s \omega_m c_u$$

$$k_u(ajus) = 3,684 * 10^9 \frac{kN}{m} - 2 * 0,05 * 375,839 \frac{rad}{s} * 6,859 * 10^5 \frac{T}{s}$$

$$k_u(ajus) = 3,684 * 10^9 \frac{kN}{m}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$k_{\psi a}(ajus) = k_{\psi a} - 2\beta_s \omega_m c_{\psi a}$$

$$k_{\psi a}(ajus) = 7,186 * 10^{10} kN * m - 2 * 0,05 * 375,839 \frac{rad}{s} * 2,505 * 10^6 kN * s * m$$

$$k_{\psi a}(ajus) = 7,182 * 10^{10} kN - m$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$k_{\psi b}(ajus) = k_{\psi b} - 2\beta_s \omega_m c_{\psi b}$$

$$k_{\psi b}(ajus) = 3,196 * 10^{10} kN * m - 2 * 0,05 * 375,839 \frac{rad}{s} * 5,102 * 10^6 kN - s - m$$

$$k_{\psi b}(ajus) = 3,177 * 10^{10} kN - m$$

En la torsión (rotación alrededor del eje “z”):

$$k_{\eta}(ajus) = k_{\eta} - 2\beta_s \omega_m c_{\eta}$$

$$k_{\eta}(ajus) = 6,133 * 10^{10} kN * m - 2 * 0,05 * 375,839 \frac{rad}{s} * 3,213 * 10^6 kN - s$$

- m

$$k_{\eta}(ajus) = 6,121 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

16. Ajuste del coeficiente de amortiguamiento

De igual manera, se ajustó el coeficiente de amortiguamiento para tomar en cuenta la influencia de las características del material (suelo) en el mismo.

En la componente vertical:

$$c_v(ajus) = c_v + \frac{2\beta_s k_v}{\omega_m} = 1,278 * 10^6 \frac{T}{s} + \frac{2 * 0,05 * 4,756 * 10^9 \frac{kN}{m}}{375,839 \frac{rad}{s}}$$

$$c_v(ajus) = 2,543 * 10^6 \frac{T}{s}$$

En la componente horizontal:

$$c_u(ajus) = c_u + \frac{2\beta_s k_u}{\omega_m} = 6,859 * 10^5 \frac{T}{s} + \frac{2 * 0,05 * 3,710 * 10^9 \frac{kN}{m}}{375,839 \frac{rad}{s}}$$

$$c_u(ajus) = 1,673 * 10^6 \frac{T}{s}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$c_{\psi a}(ajus) = c_{\psi a} + \frac{2\beta_s k_{\psi a}}{\omega_m}$$

$$c_{\psi a}(ajus) = 2,505 * 10^6 \frac{T - m^2}{s} + \frac{2 * 0,05 * 7,191 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}}{375,839 \frac{rad}{s}}$$

$$c_{\psi a}(ajus) = 2,164 * 10^7 \frac{T - m^2}{s}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$c_{\psi b}(ajus) = c_{\psi b} + \frac{2\beta_s k_{\psi b}}{\omega_m}$$

$$c_{\psi b}(ajus) = 5,102 * 10^6 \frac{T - m^2}{s} + \frac{2 * 0,05 * 3,196 * 10^{10} \text{ kN} - m}{375,839 \frac{rad}{s}}$$

$$c_{\psi b}(ajus) = 1,361 * 10^7 \frac{T - m^2}{s}$$

En la torsión (rotación alrededor del eje “z”):

$$c_{\eta}(ajs) = c_{\eta} + \frac{2\beta_s k_{\eta}}{\omega_m} = 3,213 * 10^6 \frac{T - m^2}{s} + \frac{2 * 0,05 * 6,133 * 10^{10} \text{ kN} - m}{375,839 \frac{rad}{s}}$$

$$c_{\eta}(ajs) = 1,953 * 10^7 \frac{T - m^2}{s}$$

## 17. Cálculo de la impedancia

Se obtuvo la impedancia para considerar el embebido de la fundación, teniendo en cuenta que el primer factor de la ecuación corresponde a la rigidez, el segundo al coeficiente de amortiguamiento, y que los factores  $S_{i1}$  y  $S_{i2}$  dependen del tipo de suelo, encontrándose en la figura a continuación:

**Table 5.4.1.2—Stiffness and damping parameters ( $D = 0$ )**

Motion	Soil	Side layer		Half space	
Horizontal	Cohesive	$S_{i1} = 4.1$	$S_{i2} = 10.6$	$C_{i1} = 5.1$	$C_{i2} = 3.2$
	Granular	$S_{i1} = 4.0$	$S_{i2} = 9.1$	$C_{i1} = 4.7$	$C_{i2} = 2.8$
Rocking	Cohesive	$S_{\psi 1} = 2.5$	$S_{\psi 2} = 1.8$	$C_{\psi 1} = 4.3$	$C_{\psi 2} = 0.7$
	Granular	$S_{\psi 1} = 2.5$	$S_{\psi 2} = 1.8$	$C_{\psi 1} = 3.3$	$C_{\psi 2} = 0.5$
Torsion	Cohesive	$S_{\eta 1} = 10.2$	$S_{\eta 2} = 5.4$	$C_{\eta 1} = 4.3$	$C_{\eta 2} = 0.7$
	Granular	$S_{\eta 1} = 10.2$	$S_{\eta 2} = 5.4$	$C_{\eta 1} = 4.3$	$C_{\eta 2} = 0.7$
Vertical	Cohesive	$S_{i1} = 2.7$	$S_{i2} = 6.7$	$C_{v1} = 7.5$	$C_{i2} = 6.8$
	Granular	$S_{i1} = 2.7$	$S_{i2} = 6.7$	$C_{v1} = 5.2$	$C_{i2} = 5.0$

Note:  $S$  values are valid for  $0.5 < a_v < 1.5$ ;  $C$  values are valid for  $a_v < 2.0$ .

Impedancia vertical:

$$k_{e_v}^* = G_s * h_e * [S_{v1} + ia_o S_{v2}]$$

$$k_{e_v} = G_s * h_e * S_{v1} = 2,29 * 10^8 \text{ kN/m}^2 * 0,700 \text{ m} * 2,7 = \mathbf{4,328 * 10^8 \text{ kN/m}}$$

$$c_{e_v} = G_s * h_e * a_o * S_{v2} = 2,29 * 10^8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 0,700 \text{ m} * 1,185 * 10^{-1} * 6,7$$

$$c_{e_v} = \mathbf{1,273 * 10^8 \text{ kN/m}}$$

Impedancia horizontal:

$$k_{e_u} = G_s * h_e * S_{u1} = 2,29 * 10^8 \text{ kN/m}^2 * 0,700 \text{ m} * 4,1 = \mathbf{6,572 * 10^8 \text{ kN/m}}$$

$$c_{e_u} = G_s * h_e * a_o * S_{u2} = 2,29 * 10^8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 0,700 \text{ m} * 1,185 * 10^{-1} * 10,6$$

$$c_{e_u} = \mathbf{2,014 * 10^8 \text{ kN/m}}$$

Impedancia de balanceo alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$k_{e_\psi}^* = G_s * R_\psi^2 * h_e * [S_{\psi1} + ia_o S_{\psi2}]$$

$$k_{e_\psi a} = G_s * R_{\psi a}^2 * h_e * S_{1\psi a} = 2,29 * 10^8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * (2,796 \text{ m})^2 * 0,700 \text{ m} * 2,5$$

$$k_{e_\psi a} = \mathbf{3,133 * 10^9 \text{ kN - m}}$$

$$c_{e_\psi a} = G_s * R_\psi^2 * h_e * a_o * S_{2\psi a}$$

$$c_{e_\psi a} = 2,29 * 10^8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * (2,796 \text{ m})^2 * 0,700 \text{ m} * 1,185 * 10^{-1} * 1,8$$

$$c_{e_\psi a} = \mathbf{2,674 * 10^8 \text{ kN - m}}$$

Impedancia de balanceo alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$k_{e\psi b} = G_s * R_{\psi b}^2 * he * S_{1\psi b} = 2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2} * (4,194 m)^2 * 0,700 m * 2,5$$

$$k_{e\psi b} = 7,049 * 10^9 kN - m$$

$$c_{e\psi b} = G_s * R_{\psi b}^2 * he * a_o * S_{2\psi a}$$

$$c_{e\psi b} = 2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2} * (4,194 m)^2 * 0,700 m * 1,185 * 10^{-1} * 1,8$$

$$c_{e\psi a} = 6,016 * 10^8 kN - m$$

Impedancia torsional (rotación alrededor del eje “z”):

$$k_{e\eta} = G_s * R_{\eta}^2 * he * S_{1\eta} = 2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2} * (3,689 m)^2 * 0,700 m * 10,2$$

$$k_{e\eta} = 2,225 * 10^{10} kN - m$$

$$c_{e\eta} = G_s * R_{\eta}^2 * he * a_o * S_{2\eta}$$

$$c_{e\eta} = 2,29 * 10^8 \frac{kN}{m^2} * (3,689 m)^2 * 0,700 m * 1,185 * 10^{-1} * 5,4$$

$$c_{e\eta} = 1,397 * 10^9 kN - m$$

#### 18. Cálculo de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento finales

Se calculó la rigidez y coeficiente de amortiguamiento final, sumando las obtenidas y ajustadas anteriormente por las características geométricas del sistema vibratorio, con los obtenidos a partir de la impedancia por el embebido de la fundación. Pero para que esto fuera posible, se dividió primero los coeficientes de amortiguamiento entre la frecuencia angular del equipo.

En la componente vertical:

$$c_{i_v} = \frac{c_{e_v}}{\omega_{eq}} = \frac{1,273 * 10^8 \frac{kN}{m}}{375,839 \frac{rad}{s}} = 3,387 * 10^5 \frac{T}{s}$$

En la componente horizontal:

$$c_{i_u} = \frac{c_{e_u}}{\omega_{eq}} = \frac{2,014 * 10^8 \frac{kN}{m}}{375,839 \frac{rad}{s}} = 5,359 * 10^5 \frac{T}{s}$$

En la rotación alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$c_{i_{\psi a}} = \frac{c_{e_{\psi a}}}{\omega_{eq}} = \frac{2,674 * 10^8 kN - m}{375,839 \frac{rad}{s}} = 7,114 * 10^5 \frac{T - m^2}{s}$$

En la rotación alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$c_{i_{\psi b}} = \frac{c_{e_{\psi b}}}{\omega_{eq}} = \frac{6,016 * 10^8 kN - m}{375,839 \frac{rad}{s}} = 1,601 * 10^6 \frac{T - m^2}{s}$$

En la componente torsional (rotación alrededor del eje “z”):

$$c_{i_{\eta}} = \frac{c_{e_{\eta}}}{\omega_{eq}} = \frac{1,397 * 10^9 kN - m}{375,839 \frac{rad}{s}} = 3,716 * 10^6 \frac{T - m^2}{s}$$

18.1 Coeficiente de rigidez final:

$$k_{v_f} = k_v(ajus) + k_{e_v} = (4,708 * 10^9 + 4,328 * 10^8) \frac{kN}{m} = 2,354 * 10^9 \frac{kN}{m}$$

$$k_{u_f} = k_u(ajus) + k_{e_u} = (3,684 * 10^9 + 6,572 * 10^8) \frac{kN}{m} = 4,341 * 10^9 \frac{kN}{m}$$

$$k_{\psi a_f} = k_{\psi a}(ajus) + k_{e_{\psi a}} = (7,182 * 10^{10} + 3,133 * 10^9) kN - m$$

$$k_{\psi a_f} = 7,495 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

$$k_{\psi b_f} = k_{\psi b}(ajs) + k_{e_{\psi b}} = (3,177 * 10^{10} + 7,049 * 10^9) \text{ kN} - \text{m}$$

$$k_{\psi b_f} = 3,882 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

$$k_{\eta_f} = k_{\eta}(ajs) + k_{e_{\eta}} = (6,121 * 10^{10} + 2,225 * 10^{10}) \text{ kN} - \text{m}$$

$$k_{\eta_f} = 8,356 * 10^{10} \text{ kN} - \text{m}$$

18.2 Coeficiente de amortiguamiento final:

$$c_{v_f} = c_v(ajus) + c_{i_v} = (2,543 * 10^6 + 3,387 * 10^5) \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 2,882 * 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$c_{u_f} = c_u(ajus) + c_{i_u} = (1,673 * 10^6 + 5,359 * 10^5) \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 2,209 * 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$c_{\psi a_f} = c_{\psi a}(ajus) + c_{i_{\psi a}} = (2,164 * 10^7 + 7,114 * 10^5) \text{ kN} - \text{m}$$

$$c_{\psi a_f} = 2,235 * 10^7 \text{ kN} - \text{m}$$

$$c_{\psi b_f} = c_{\psi b}(ajus) + c_{i_{\psi b}} = (1,361 * 10^7 + 1,601 * 10^6) \text{ kN} - \text{m}$$

$$c_{\psi b_f} = 1,521 * 10^7 \text{ kN} - \text{m}$$

$$c_{\eta_f} = c_{\eta}(ajs) + c_{i_{\eta}} = (1,953 * 10^7 + 3,716 * 10^6) \text{ kN} - \text{m}$$

$$c_{\eta_f} = 2,325 * 10^7 \text{ kN} - \text{m}$$

19. Cálculo de frecuencia natural

$$\omega_{n_v} = \left( \frac{k_{f_v}}{m} \right)^{1/2} = \left( \frac{2,354 * 10^9 \frac{kN}{m}}{112,826 T} \right)^{1/2} = 4567,778 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_{n_u} = \left( \frac{k_{f_u}}{m} \right)^{1/2} = \left( \frac{4,341 * 10^9 \frac{kN}{m}}{112,826 T} \right)^{1/2} = 6203,015 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_{n_{\psi a}} = \left( \frac{k_{f_{\psi a}}}{I_{\psi a}} \right)^{1/2} = \left( \frac{7,495 * 10^{10} kN - m}{276,987 T - m^2} \right)^{1/2} = 16449,828 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_{n_{\psi b}} = \left( \frac{k_{f_{\psi b}}}{I_{\psi b}} \right)^{1/2} = \left( \frac{3,882 * 10^{10} kN - m}{861,583 T - m^2} \right)^{1/2} = 6712,307 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_{n_{\eta}} = \left( \frac{k_{f_{\eta}}}{I_{\eta}} \right)^{1/2} = \left( \frac{8,346 * 10^{10} kN - m}{821,486 T - m^2} \right)^{1/2} = 10079,661 \frac{rad}{s}$$

## 20. Verificación de resonancia

Se verificó que la frecuencia natural calculada sea diferente a la frecuencia del equipo, por lo tanto

$$\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_v}} = \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{4567,778 \frac{rad}{s}} = 8,228 * 10^{-2}$$

$$\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_u}} = \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{6203,015 \frac{rad}{s}} = 6,059 * 10^{-2}$$

$$\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_{\psi a}}} = \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{16449,828 \frac{rad}{s}} = 2,285 * 10^{-2}$$

$$\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n\psi b}} = \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{6712,307 \frac{rad}{s}} = 5,599 * 10^{-2}$$

$$\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n\eta}} = \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{10079,661 \frac{rad}{s}} = 3,729 * 10^{-2}$$

Como ningún valor resultó dentro del rango de 0,60 a 1,40 el sistema no experimenta el fenómeno de resonancia, cumpliendo satisfactoriamente con este criterio.

## 21. Cálculo de las fuerzas y momentos dinámicos

Para el cálculo de la fuerza dinámica, se usó la tabla 4.3.1.2 de la ACI 351.3R-18 para obtener el factor Q, ya que el fabricante no proveyó el valor de la excentricidad de masa ( $e_m$ ), tomando en cuenta las características del equipo en cuestión.

**Table 4.3.1.2—Balance quality grades for selected groups of representative rigid rotors\***

Balance quality guide	Product of $e\omega$ , in./s (mm/s)	Rotor types—general examples
G1600	63 (1600)	Crankshaft/drives of rigidly mounted, large, two-cycle engines
G630	25 (630)	Crankshaft/drives of rigidly mounted, large, four-cycle engines
G250	10 (250)	Crankshaft/drives of rigidly mounted, fast, four-cylinder diesel engines
G100	4 (100)	Crankshaft/drives of fast diesel engines with six or more cylinders
G40	1.6 (40)	Crankshaft/drives of elastically mounted, fast four-cycle engines (gasoline or diesel) with six or more cylinders
G16	0.6 (16)	Parts of crushing machines; drive shafts (propeller shafts, cardan shafts) with special requirements; crankshaft/drives of engines with six or more cylinders under special requirements
G6.3	0.25 (6.3)	Parts of process plant machines; centrifuge drums, paper machinery rolls, print rolls; fans; flywheels; pump impellers; machine tool and general machinery parts; medium and large electric armatures (of electric motors having at least 3-1/4 in. [80 mm] shaft height) without special requirement
G2.5	0.1 (2.5)	Gas and steam turbines, including marine main turbines; rigid turbo-generator rotors; turbo-compressors; machine tool drives; medium and large electric armatures with special requirements; turbine driven pumps
G1	0.04 (1)	Grinding machine drives
G0.4	0.015 (0.4)	Spindles, discs, and armatures of precision grinders

\*Excerpted from ASA/ANSI S2.19.

Primero se obtuvo la fuerza dinámica correspondiente a cada componente rotativo, en este caso para el motor y bomba, con un peso de 14,000T y 3,112T respectivamente

$$F_{o\text{bomba}} = \frac{m_r Q \omega_o S_f}{1000} = \frac{3,112 T * 0,0063 \frac{m}{s} * 375,839 \frac{rad}{s} * 2}{1000}$$

$$F_{o\text{bomba}} = 1,474 * 10^{-2} \text{ kN}$$

$$F_{o_{motor}} = \frac{m_r Q \omega_o S_f}{1000} = \frac{14,000 T * 0,0063 \frac{m}{s} * 375,839 \frac{rad}{s} * 2}{1000}$$

$$F_{o_{motor}} = \mathbf{6,629 * 10^{-2} kN}$$

La fuerza resultante corresponde a la sumatoria de las fuerzas producidas por cada componente rotativo:

$$F_o = F_{o_{motor}} + F_{o_{bomba}} = 1,474 * 10^{-2} kN + 6,629 * 10^{-2} kN$$

$$F_o = \mathbf{8,108 * 10^{-2} kN}$$

Posteriormente es necesario calcular los momentos productos de las fuerzas dinámicas, para ello se obtuvo cada una de las distancias entre el punto de aplicación de las fuerzas y el centro de rigidez, ubicado en el centro geométrico de la huella del cimiento ( $X_{CR}=4,5m$  ;  $Y_{CR}= 2m$  ;  $Z_{CR}=0m$ ).

Excentricidad de la bomba:

$$e_{X_{bomba}} = X_{bomba} - X_{CR} = 1,850 m - 4,500 m = -2,650 m$$

$$e_{Y_{bomba}} = Y_{bomba} - Y_{CR} = 2,000 m - 2,000 m = 0,000 m$$

$$e_{Z_{bomba}} = Z_{bomba} - Z_{CR} = 2,270 m - 0,000 m = 2,270 m$$

Excentricidad del motor:

$$e_{X_{motor}} = X_{motor} - X_{CR} = 7,075 m - 4,500 m = -2,575 m$$

$$e_{Y_{motor}} = Y_{motor} - Y_{CR} = 2,000 m - 2,000 m = 0,000 m$$

$$e_{Z_{motor}} = Z_{motor} - Z_{CR} = 2,270 m - 0,000 m = 2,270 m$$

Momentos de la bomba:

$$M_{aa_{bomba}} = F_o(bomba) * \sqrt{e_y(bomba)^2 + e_z(bomba)^2}$$

$$M_{aa_{bomba}} = 1,474 * 10^{-2} \text{ kN} * \sqrt{(0,000\text{m})^2 + (2,270\text{m})^2}$$

$$M_{aa_{bomba}} = \mathbf{3,345 * 10^{-2} \text{ kN} - m}$$

$$M_{bb_{bomba}} = F_o(bomba) * \sqrt{e_x(bomba)^2 + e_z(bomba)^2}$$

$$M_{bb_{bomba}} = 1,474 * 10^{-2} \text{ kN} * \sqrt{(2,650\text{m})^2 + (2,270\text{m})^2}$$

$$M_{bb_{bomba}} = \mathbf{3,345 * 10^{-2} \text{ kN} - m}$$

$$M_{\eta\eta_{bomba}} = F_o(bomba) * \sqrt{e_x(bomba)^2 + e_z(bomba)^2}$$

$$M_{\eta\eta_{bomba}} = 1,474 * 10^{-2} \text{ kN} * \sqrt{(2,650\text{m})^2 + (0,000\text{m})^2}$$

$$M_{\eta\eta_{bomba}} = \mathbf{3,905 * 10^{-2} \text{ kN} - m}$$

Momento del motor:

$$M_{aa_{motor}} = F_o(bomba) * \sqrt{e_y(bomba)^2 + e_z(bomba)^2}$$

$$M_{aa_{motor}} = 6,629 * 10^{-2} \text{ kN} * \sqrt{(0,000\text{m})^2 + (2,270\text{m})^2}$$

$$M_{aa_{motor}} = \mathbf{1,505 * 10^{-1} \text{ kN} - m}$$

$$M_{bb_{motor}} = F_o(bomba) * \sqrt{e_x(bomba)^2 + e_z(bomba)^2}$$

$$M_{bb_{motor}} = 6,629 * 10^{-2} \text{ kN} * \sqrt{(2,575\text{m})^2 + (2,270\text{m})^2}$$

$$M_{bb_{motor}} = \mathbf{2,276 * 10^{-1} \text{ kN} - m}$$

$$M_{\eta\eta_{motor}} = F_o(bomba) * \sqrt{e_x(bomba)^2 + e_z(bomba)^2}$$

$$M_{\eta\eta_{motor}} = 6,629 * 10^{-2} kN * \sqrt{(2,575m)^2 + (0,000m)^2}$$

$$M_{\eta\eta_{motor}} = \mathbf{1,707 * 10^{-1} kN - m}$$

Se obtienen los momentos finales en cada dirección:

$$M_{aa} = M_{aa_{bomba}} + M_{aa_{motor}} = 3,345 * 10^{-2} kN - m + 1,505 * 10^{-1} kN - m$$

$$M_{aa} = \mathbf{1,839 * 10^{-1} kN - m}$$

$$M_{bb} = M_{bb_{bomba}} + M_{bb_{motor}} = 3,345 * 10^{-2} kN - m + 2,276 * 10^{-1} kN - m$$

$$M_{bb} = \mathbf{2,790 * 10^{-1} kN - m}$$

$$M_{\eta\eta} = M_{\eta\eta_{bomba}} + M_{\eta\eta_{motor}} = 3,905 * 10^{-2} kN - m + 1,707 * 10^{-1} kN - m$$

$$M_{\eta\eta} = \mathbf{2,098 * 10^{-1} kN - m}$$

## 22. Cálculo de amplitud de desplazamiento

Para el cálculo de la amplitud, se obtuvieron nuevamente los valores de la razón de amortiguamiento a partir de los nuevos valores del coeficiente de amortiguamiento.

En la componente vertical:

$$D_v = \frac{c_{vf}}{2\sqrt{k_{vf}m}} = \frac{2,882 * 10^6 \frac{T}{s}}{2 * \sqrt{2,354 * 10^9 \frac{kN}{m} * 112,826 T}} = \mathbf{2,796}$$

En la componente horizontal:

$$D_u = \frac{c_{uf}}{2\sqrt{k_{uf}m}} = \frac{2,209 * 10^6 \frac{T}{s}}{2 * \sqrt{4,341 * 10^9 \frac{kN}{m} * 112,826 T}} = \mathbf{1,578}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “a”:

$$D_{\psi a} = \frac{c_{\psi a}}{2\sqrt{k_{\psi a}I_{\psi a}}} = \frac{2,235 * 10^7 \frac{T}{s}}{2 * \sqrt{7,495 * 10^{10} \frac{kN}{m} * 276,987 T - m^2}} = \mathbf{2,453}$$

En la rotación (balanceo) alrededor de un eje paralelo a “b”:

$$D_{\psi b} = \frac{c_{\psi b}}{2\sqrt{k_{\psi b}I_{\psi b}}} = \frac{1,521 * 10^7 \frac{T}{s}}{2 * \sqrt{3,882 * 10^{10} \frac{kN}{m} * 861,583 T - m^2}} = \mathbf{1,315}$$

En la torsión (rotación alrededor del eje “z”):

$$D_{\eta} = \frac{c_{\eta}}{2\sqrt{k_{\eta}I_{\eta}}} = \frac{2,325 * 10^7 \frac{T}{s}}{2 * \sqrt{8,346 * 10^{10} \frac{kN}{m} * 821,486 T - m^2}} = \mathbf{1,404}$$

Para calcular las amplitudes traslacionales se utiliza la fuerza dinámica resultante, mientras que para las amplitudes rotacionales se emplea el momento resultante de la fuerza dinámica

$$A_{i \text{ tras}} = \frac{\frac{F_o}{k_i}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_i}}\right)^2\right)^2 + \left(2D_i \frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_1}}\right)^2}}$$

$$A_{i\text{rot}} = \frac{\frac{M_o}{k_i}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_i}}\right)^2\right)^2 + \left(2D_i \frac{\omega_{eq}}{\omega_{n_1}}\right)^2}}$$

$$A_v = \frac{\frac{8,108 * 10^{-2} \text{ kN}}{2,354 * 10^9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{4567,778 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)^2\right)^2 + \left(2 * 2,796 * \frac{375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{4567,778 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)^2}}$$

$$A_v = 3,147 * 10^{-11} \text{ m}$$

$$A_u = \frac{\frac{8,108 * 10^{-2} \text{ kN}}{4,341 * 10^9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{6203,015 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)^2\right)^2 + \left(2 * 1,578 * \frac{375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{6203,015 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)^2}}$$

$$A_v = 1,841 * 10^{-11} \text{ m}$$

$$A_{\psi a} = \frac{\frac{1,839 * 10^{-1} \text{ kN} - \text{m}}{7,495 * 10^{10} \frac{\text{kN}}{\text{m}}}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{16449,828 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)^2\right)^2 + \left(2 * 2,453 * \frac{375,839 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{16449,828 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)^2}}$$

$$A_{\psi a} = 2,440 * 10^{-12} \text{ rad}$$

$$A_{\psi b} = \frac{\frac{2,790 * 10^{-1} kN - m}{3,882 * 10^{10} \frac{kN}{m}}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{375,839 \frac{rad}{s}}{6712,307 \frac{rad}{s}}\right)^2\right)^2 + \left(2 * 1,315 * \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{6712,307 \frac{rad}{s}}\right)^2}}$$

$$A_{\psi b} = 7,133 * 10^{-12} \text{ rad}$$

$$A_{\eta} = \frac{\frac{2,098 * 10^{-1} kN - m}{8,346 * 10^{10} \frac{kN}{m}}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{375,839 \frac{rad}{s}}{10079,661 \frac{rad}{s}}\right)^2\right)^2 + \left(2 * 1,404 * \frac{375,839 \frac{rad}{s}}{10079,661 \frac{rad}{s}}\right)^2}}$$

$$A_{\eta} = 2,503 * 10^{-12} \text{ rad}$$

23. Verificación de parámetros vibratorios (amplitud y frecuencia)

$$\omega_{n_v} = 4567,578 \frac{rad}{s} = 43619,065 \text{ rpm}$$

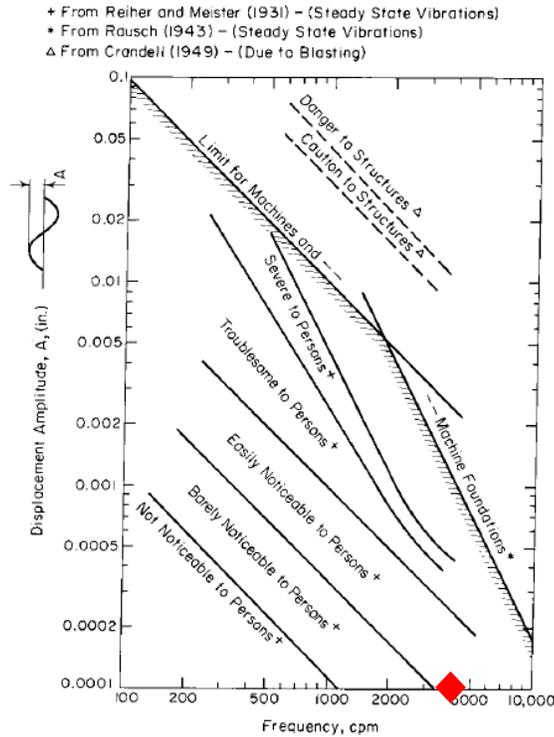
$$\omega_{n_u} = 6203,015 \frac{rad}{s} = 59234,429 \text{ rpm}$$

$$\omega_{n_{\psi a}} = 16449,828 \frac{rad}{s} = 157084,289 \text{ rpm}$$

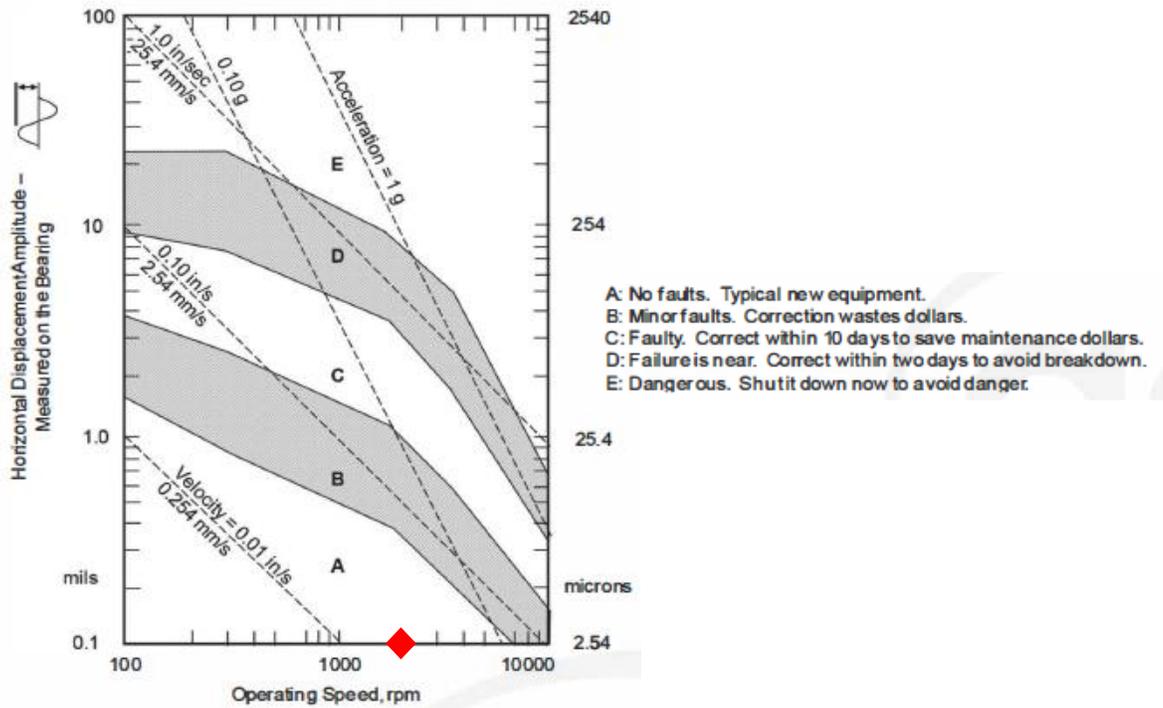
$$\omega_{n_{\psi b}} = 6712,307 \frac{rad}{s} = 64997,809 \text{ rpm}$$

$$\omega_{n_{\eta}} = 10079,661 \frac{rad}{s} = 96253,671 \text{ rpm}$$

Como el fabricante no indicó cual es la amplitud permisible se compara los valores obtenidos con las tablas que apliquen según el caso de estudio mostradas en el presente trabajo e identificadas desde la figura 35 a la 41.



La mayor amplitud se obtiene en la dirección vertical que es de  $3,147 \cdot 10^{-11}$  m, que equivale a  $1,239 \cdot 10^{-9}$  in, sabiendo que el menor valor del grafico es de  $1,000 \cdot 10^{-4}$  y el equipo cuenta con una frecuencia de operación de 3589rpm, se puede clasificar como levemente perceptible para las personas, lo cual es aceptable ya que el equipo no requiere personal trabajando en ella constantemente, solo por razones de mantenimiento.



Se obtuvo una amplitud horizontal de  $1,841 \cdot 10^{-11}$  m, equivalente a  $7,248 \cdot 10^{-9}$  in, por lo tanto, se encuentra en la zona A del gráfico que corresponde a una zona sin falla.

### *Diseño del acero de refuerzo*

#### 24. Cálculo del acero de refuerzo mínimo

Se calcula el acero mínimo con lo indicado en el ACI 350-06 con la cuantía por retracción y temperatura “p”, que será repartida en cada cara de la fundación, según la siguiente tabla:

**TABLE 7.12.2.1—MINIMUM SHRINKAGE AND TEMPERATURE REINFORCEMENT**

Length between movement joints, ft	Minimum shrinkage and temperature reinforcement ratio	
	Grade 40	Grade 60
Less than 20	0.0030	0.0030
20 to less than 30	0.0040	0.0030
30 to less than 40	0.0050	0.0040
40 and greater	0.0060*	0.0050*

Se selecciona la cuantía mínima para la prevención de daños por retracción y cambios de temperatura, en función de la longitud de las juntas de movimiento; para este caso, se seleccionó una longitud de juntas de vaciado de 3m (equivalente a 10ft) y barras de acero grado 40:

Como el vaciado no se realiza directamente al suelo esta cuantía puede disminuirse en un 50%

$$AS_{mín_i} = \rho_{mín} * L_i * h$$

$$AS_a = \frac{\rho}{2} * a * h = \frac{0,0030}{2} * 900 \text{ cm} * 100 \text{ cm} = 135 \text{ cm}^2$$

$$AS_b = \frac{\rho}{2} * b * h = \frac{0,0030}{2} * 400 \text{ cm} * 100 \text{ cm} = 60 \text{ cm}^2$$

## 25. Distribución del acero de refuerzo

- Número de capas de acero

En bloques de fundación con espesor igual o mayor que 90 cm, se deberá agregar capas de acero intermedio en ambas direcciones horizontales, con separaciones equitativas de una capa a otra que varían de 30 a 40 cm, guardando la misma distancia al acero superior e inferior.

$$N_{int} = \frac{h - 2r}{40 \text{ cm}} - 1 = \frac{(100 - 2 * 5) \text{ cm}}{40 \text{ cm}} - 1 = \frac{90 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} - 1 = 2,25 - 1 = 1,25 = 2$$

$$N = N_{int} + 2 = 2 + 2 = 4$$

Donde:

$N_{int}$ : número de capas intermedias de acero de refuerzo

$N$ : número de capas del acero de refuerzo

- Cálculo de la separación máxima entre barras

Para la separación entre las barras, se toma el menor valor entre:

$$s_1 = 38 * \frac{2800}{f_s} - 2,5r = 38 * \frac{2800 \frac{kgf}{cm^2}}{2800 \frac{kgf}{cm^2}} - 2,5 * 5 \text{ cm} = 25,50 \text{ cm}$$

$$s_2(\text{cm}) = 30 * \frac{2800}{f_s}$$

$$s_2 = 30 * \frac{2800}{f_s} = 30 * \frac{2800 \frac{kgf}{cm^2}}{2800 \frac{kgf}{cm^2}} = 30,00 \text{ cm}$$

$$s_{m\acute{a}x} = s_1 = 25,50 \text{ cm}$$

- Cálculo del área de acero por capa

Posteriormente se debe obtener el acero de refuerzo por capas, partiendo de la cantidad de capas “N” y acero de refuerzo mínimo obtenido previamente:

$$As_{a/capa} = \frac{As_a/capa}{N} = \frac{135 \text{ cm}^2}{4} = 33,75 \text{ cm}^2$$

$$As_{b/capa} = \frac{As_b/capa}{N} = \frac{60 \text{ cm}^2}{4} = 15,00 \text{ cm}^2$$

- Distribución del acero por capa

$$n_a = \frac{a - 2r}{s_a} + 1 = \frac{(900 - 2 * 5) \text{ cm}}{25,50 \text{ cm}} = 34,90 + 1 = 35,90 \sim 36 \text{ barras}$$

$$n_b = \frac{b - 2r}{s_b} + 1 = \frac{(400 - 2 * 5) \text{ cm}}{25,50 \text{ cm}} = 15,29 + 1 = 16,29 \sim 17 \text{ barras}$$

Teniendo en cuenta la aproximación en el número de barras en la dirección larga (a), se calcula la separación real:

$$s_a = \frac{a - 2r}{n_a - 1} = \frac{900 \text{ cm} - 2 * 5 \text{ cm}}{36 - 1} = 25,428 \text{ cm} < 25,50 \text{ cm} = s_{m\acute{a}x} \rightarrow \text{OK}$$

$$s_b = \frac{b - 2r}{n_b - 1} = \frac{400 \text{ cm} - 2 * 5 \text{ cm}}{17 - 1} = 24,375 \text{ cm} < 25,50 \text{ cm} = s_{m\acute{a}x} \rightarrow \text{OK}$$

Donde:

$n$ : número de barras

$L$ : longitud de la dimensión que se está armando (a o b, en cm)

$s$ : separación (cm)

$r$ : recubrimiento (cm)

$fs$ : tensiones sobre el acero de refuerzo para cargas de servicio  $fs = \frac{2}{3}fy$

Se decidió colocar barras de 1/2” de diámetro, con esto se debe verificar si se cumple el área de acero requerida para cada capa:

$$As_{a_{real}} = n_a * A_\phi = 36 * 1,27 \text{ cm}^2 = 45,72 \text{ cm}^2 > 45 \text{ cm}^2 = As_{a_{min}} \rightarrow \text{OK}$$

$$As_{b_{real}} = n_b * A_\phi = 17 * 1,27 \text{ cm}^2 = 21,59 \text{ cm}^2 > 20 \text{ cm}^2 = As_{b_{min}} \rightarrow \text{OK}$$

## 26. Verificación del acero de refuerzo

Tomando en cuenta que se buscó una longitud de solape entre el acero superior e inferior no menor de 30 cm, se diseñaron ganchos de 60 cm para las barras en la superficie, y 15 cm para barras de acero intermedio.

En la tabla que se presenta a continuación, se encuentran los cálculos del acero para la fundación en cuestión.

**Tabla 13: Cálculos del acero de refuerzo**

Tipo	n	$\phi$ (")	L (m)	r (m)	l (m)	g (m)	Lt (m)	W/L (kgf/m)	W (kgf)
------	---	------------	-------	-------	-------	-------	--------	-------------	---------

1	72	1/2	b=4,00	0,05	3,90	0,60	5,10	0,994	365,00
2	34	1/2	a=9,00	0,05	8,90	0,60	10,10	0,994	341,34
3	72	1/2	b=4,00	0,05	3,90	0,15	4,20	0,994	300,59
4	34	1/2	a=9,00	0,05	8,90	0,15	9,20	0,994	310,92
Total									1317,85

Fuente: elaboración propia (2023).

Cálculo tipo:

$$l_i = L_i - 2r_i$$

$$l_1 = L_1 - 2r_1 = (4,00 - 2 * 0,05)m = \mathbf{3,90\ m}$$

$$Lb_i = l_i + 2g_i$$

$$Lb_1 = l_1 + 2g_1 = (3,90 + 2 * 0,60)m = \mathbf{5,10\ m}$$

$$W_i = n_i * Lb_i * \left(\frac{W}{L}\right)_i$$

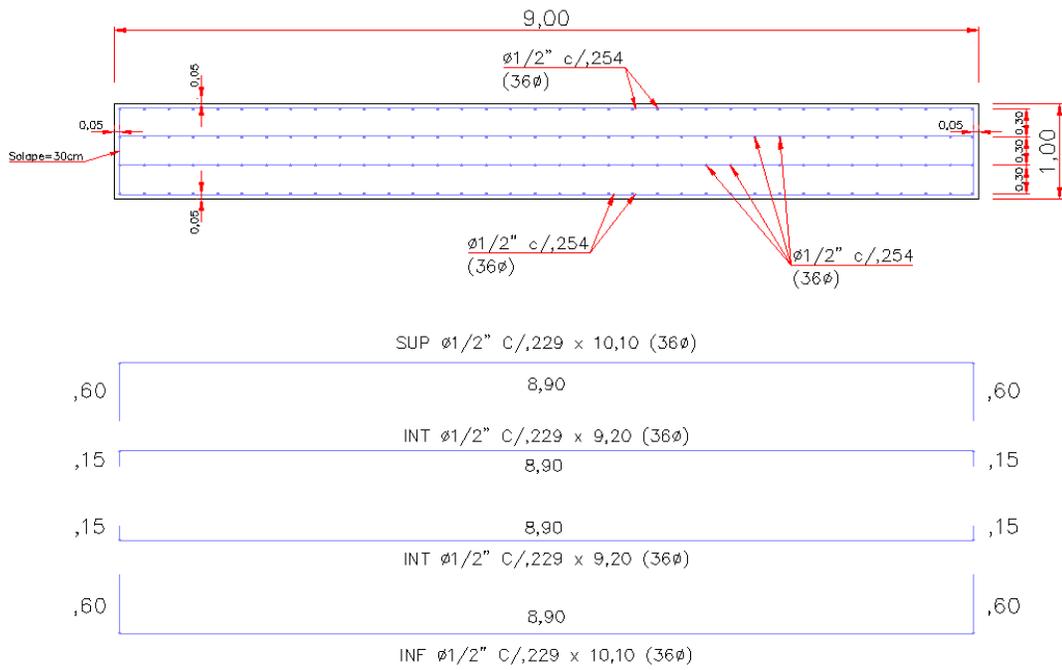
$$W_1 = n_1 * Lb_1 * \left(\frac{W}{L}\right)_1 = 72 * 5,10\ m * 0,994 \frac{kgf}{m} = \mathbf{365,00\ kgf}$$

$$\sum_{i=1}^4 W_i = \mathbf{1317,85\ kgf}$$

Ya teniendo el peso total del acero de refuerzo, se calculó el volumen del bloque de fundación, y luego la relación peso/volumen entre el acero y el concreto:

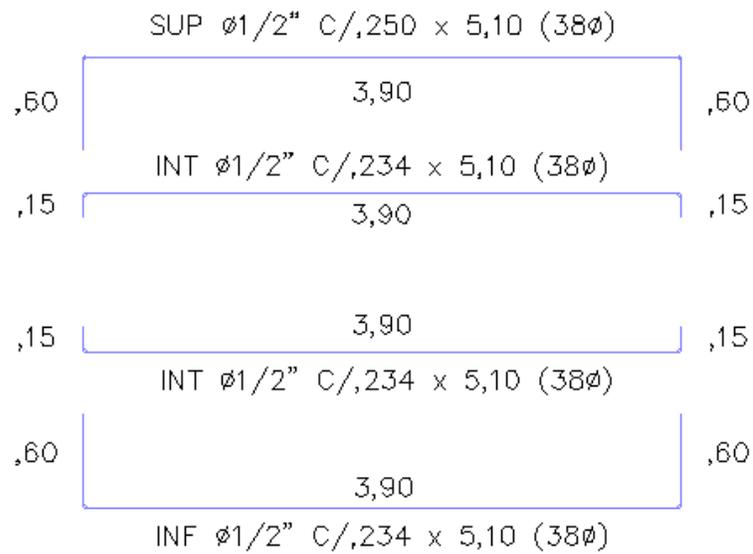
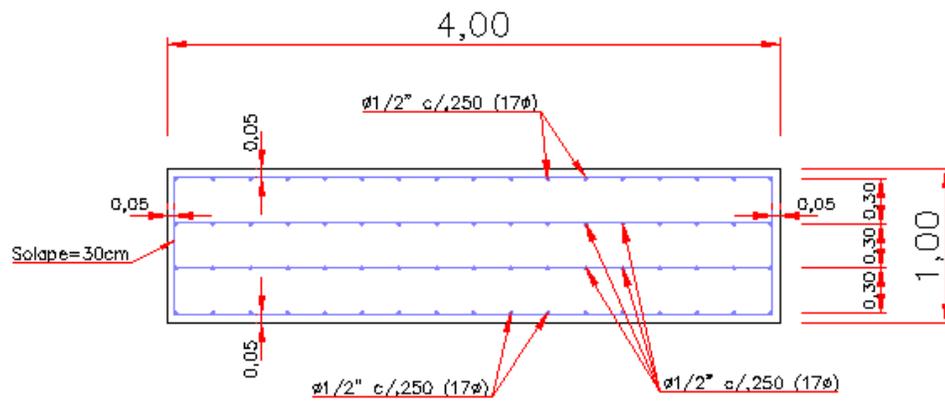
$$Vf = a * b * h = 9,00m * 4,00m * 1,00m = 36,00\ m^3$$

$$\frac{Ws}{Vc} = \frac{1317,85\ kgf}{36\ m^3} = \mathbf{36,607\ \frac{kgf}{m^3}} < 30\ \frac{kgf}{m^3} \rightarrow \mathbf{OK}$$



**Figura 76: Diseño del acero de refuerzo en dirección “a”**

Fuente: Elaboración propia (2023).



**Figura 77: Diseño del acero de refuerzo en dirección “b”**

Fuente: Elaboración propia (2023).