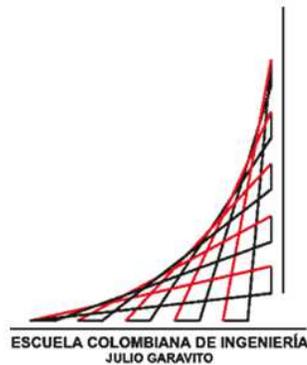


CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO PARA EQUIPOS DINÁMICOS

Ing. DAVID LEONARDO GONZÁLEZ



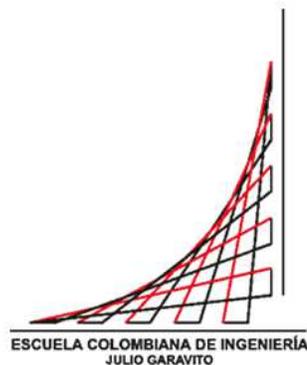
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ D.C.
2014

**CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO PARA
EQUIPOS DINÁMICOS**

**Presentado por:
DAVID LEONARDO GONZÁLEZ**

PROYECTO DE GRADO

**Director:
Ing. NANCY TORRES CASTELLANOS**



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BOGOTÁ D.C.
2014**

Bogotá D.C., Febrero 04 de 2014.

Señor:

Ing. PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA

Director Programa de Especialización en Estructuras

Escuela Colombiana de Ingeniería

La Ciudad

Ref.: Proyecto de Grado

Apreciado Ingeniero:

Por medio del siguiente documento me permito presentar el informe final del Proyecto de Grado del aspirante al título de Especialista en Estructuras, David Leonardo González con C.C. 93.298.871 de Líbano, denominado "CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO PARA EQUIPOS DINÁMICOS", que fue dirigido por la Ing. Nancy Torres Castellanos.

Atentamente,

Ing. David Leonardo González

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El Proyecto de Grado denominado “CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO PARA EQUIPOS DINÁMICOS” presentado para optar al Título de Especialista en Estructuras otorgado por la Escuela Colombiana de Ingeniería, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Ing. Nancy Torres Castellanos
DIRECTOR

Ing. Pedro Nel Quiroga Saavedra

Bogotá D.C., Febrero de 2014.

A Dios por iluminarme y guiarme para convertirme en la persona que soy actualmente.

A mi madre por su confianza y constante atención y colaboración en la obtención de mis logros personales y profesionales.

A Alexandra por su amor y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

- Nancy Torres, Ingeniera Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander, Master de la Universidad Nacional de Colombia y PhD. C de la Universidad Nacional, profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería y Directora del Trabajo de Grado, por sus valiosas enseñanzas, su constante colaboración y dedicación.
- Juan Carlos Reyes, Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander, Master de la Universidad de los Andes y Ph.D. de la Universidad de California, Berkeley, por compartir sus amplios conocimientos en dinámica estructural; así como por su valiosa colaboración en la conceptualización y desarrollo de esta tesis.
- A la Escuela Colombiana de Ingeniería y su formidable equipo de profesores de la Especialización en Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil; especialmente a los Ingenieros Luis Enrique Aycardi y Jaime Garzón, por los conocimientos transmitidos en sus clases.
- Las personas y entidades que de una u otra manera brindaron orientación en el desarrollo del trabajo.
- A mi esposa, Alexandra Ibagón quien es el ejemplo de la persona e ingeniero que debo ser todos los días. Sin su amor, apoyo e insistencia constante no hubiera podido obtener este logro.
- A toda mi familia; especialmente a mi madre y mis tíos, que me han apoyado y dado su confianza durante mi desarrollo personal y profesional.
- Al Ingeniero Jorge Ignacio Segura Franco, como ingeniero de gran conocimiento y experiencia, por ser mi mentor desde el pregrado y haber despertado en mí el amor por las estructuras y promover la disciplina, dedicación y el trabajo.
- A INELECTRA International por el apoyo técnico y de tiempo otorgado durante el desarrollo de esta tesis; en especial a los Ingenieros Stefan Pardo, Saúl Perilla y Erik Garrido.
- A los ingenieros y colegas, Fabio Gelvez, José Luis Velasco, Gustavo López, Guillermo Rubio y Daniel Santander.

“CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO PARA EQUIPOS DINÁMICOS”

DAVID LEONARDO GONZÁLEZ

RESUMEN

Las cimentaciones de máquinas son parte fundamental de todo complejo industrial. En este trabajo se presentan las consideraciones principales y los criterios de diseño para proyectar cimentaciones seguras y eficientes. La diferencia con las cimentaciones convencionales, radica en el análisis dinámico que se debe desarrollar para garantizar que las frecuencias del sistema máquina fundación sean distintas de la frecuencia de operación normal de la máquina y que las amplitudes del sistema se enmarquen dentro de los límites admisibles.

Como complemento, este trabajo presenta un ejemplo práctico donde se estudia el comportamiento de una cimentación tipo pórtico para un turbogenerador, la cual es dimensionada y se realiza su análisis y diseño. El ejemplo es desarrollado analíticamente y por elementos finitos utilizando una herramienta computacional de diseño. Finalmente, se realizaron comparaciones de los resultados teóricos y experimentales con excelentes aproximaciones. Los resultados obtenidos se muestran secuencialmente para facilitar su entendimiento y el contenido está ordenado para presentar al lector la importancia de la medición de las vibraciones en el sistema equipo-cimentación. La idea es que el lector comprenda el significado práctico de las frecuencias y amplitudes en el análisis de cimentaciones tipo pórtico para equipos dinámicos.

El presente trabajo se justificó por cuanto este posee un valor práctico y relevancia educativa. Además se establecieron bases fuertes para familiarizar al estudiante con el diseño de equipos dinámicos, mostrando que hoy en día la tecnología establece mejores rendimientos a la hora de realizar modelos matemáticos pero siempre con la precaución y consiente que se debe tener una buena caracterización de los datos de entrada.

Palabras clave:

Análisis dinámico, Amplitud, Amortiguamiento, Cimentación tipo pórtico, Elementos finitos, Frecuencia, Masa, Resonancia, Vibraciones.

“DESIGN CONSIDERATIONS OF FRAMED FOUNDATIONS FOR DYNAMIC EQUIPMENT”

DAVID LEONARDO GONZÁLEZ

ABSTRACT

The equipment foundations are essential part of any industrial complex. In this document are presented the main considerations and design criteria to project safe and efficient foundations. The difference with conventional foundations lies in the dynamic analysis that need be developed to ensure that frequencies of machine foundation system are different that the normal operating frequency of the machine and the amplitudes of the system are within permissible limits.

In addition, this document includes a practical example where is studied the behavior of a framed foundation for a turbo-generator, which is sized and performed their analysis and design. The example is developed analytically and by finite elements using a design computational tool. Finally, comparisons were made of theoretical and experimental results with excellent approximations. The results obtained are shown sequentially for ease it's understanding and the content is arranged to show to the reader the importance of measuring vibrations in the machine-foundation system. The idea is that the reader understands the practical significance of the frequencies and amplitudes in the analysis of framed foundations for dynamic equipment.

The present work is justified because it has a practical value and a educational importance. In addition were established strong bases to acquaint to the student with the design of dynamic equipments, showing that technology today provides better performance when are made mathematical models but always with caution to do a good characterization of input data.

Keywords:

Dynamic analysis, Amplitude, Damping, Framed foundations, Finite elements, Frequency, Mass, Resonance, Vibrations.

1. GENERALIDADES

La gran importancia de las cimentaciones de equipos en el sector energético y a nivel nacional ha creado la necesidad de realizar un manual de diseño de fundaciones para equipos dinámicos que reúna y explique el procedimiento adecuado, de análisis y que a su vez considere los requerimientos, lineamientos y normatividad de este tipo de fundaciones.

Para tal fin, se planteó, este trabajo, el cual representa un fragmento de dicho manual y se concentra en plantear la metodología de análisis y diseño de *fundaciones tipo pórtico* y en complemento se presentan las consideraciones principales y los criterios de diseño para que tales cimentaciones sean proyectadas de forma segura y eficiente.

1.1 INTRODUCCIÓN

Las fundaciones de máquinas forman parte vital y extensa de cualquier complejo industrial. El auge que ha tenido el sector energético en los últimos años ha conducido a un crecimiento significativo de la industria, evidentemente las cimentaciones de máquinas han adquirido una gran importancia en el contexto de la economía nacional.

En el diseño de una cimentación para maquinaria debe definirse el tipo de cimentación, sus dimensiones y su refuerzo, de modo que se logre un grado razonable de seguridad contra la falla estructural y la falla del suelo, y que las vibraciones debidas al funcionamiento de la máquina no sean perjudiciales a la propia máquina, ni causen molestias o daños en las inmediaciones.

Desde el punto de vista exclusivo del cálculo, cuanto mayor sea el peso de la cimentación, más reducidas serán las amplitudes de las vibraciones. Pero este efecto positivo tiene sus límites. Por un lado, el terreno de fundación no tiene una capacidad de carga ilimitada y, por el otro, los costos de una cimentación aumentan exponencialmente cuanto mayor sea el peso de ésta.

Es necesario entonces proyectar cimentaciones seguras y eficientes, para esto se debe realizar un análisis estático y dinámico, este último permite chequear que la frecuencia del sistema formado por la máquina, cimentación y suelo, sea distinta de las frecuencias de operación de la máquina, para evitar la resonancia, y además determinar la amplitud de vibración de la cimentación y no permitir que ésta sobrepase un cierto límite permisible, definido para cada máquina.

En la mayoría de los casos, debido a razones de funcionamiento y operación, la forma estructural de la cimentación se encuentra determinada de antemano; en

este trabajo se presentan criterios generales y recomendaciones básicas para cimentaciones tipo pórtico, las cuales son exclusivas para máquinas que trabajan a altas velocidades, como turbogeneradores.

Se recomienda que al diseñar la cimentación se consideren los puntos de vista del fabricante de la máquina, de los técnicos que la instalarán y de los que la operarán, así como de responsables del diseño y construcción de las facilidades del proyecto.

1.2 ANTECEDENTES

La dinámica del sistema máquina-fundación es un tema complicado y la consideración de otros efectos incrementa su complejidad. El desempeño, la seguridad y la estabilidad de las máquinas dependen en gran medida de su diseño, la fabricación y la interacción con el medio ambiente. En principio, las fundaciones deben ser diseñadas para que las fuerzas dinámicas de las máquinas sean transmitidas al suelo a través de la fundación de tal manera que todos los tipos de efectos perjudiciales sean eliminados. En el pasado, se utilizaban métodos simples de cálculo, el más usual implicaba la multiplicación de las cargas estáticas por un factor dinámico estimado y el resultado era tratado como una carga estática amplificada sin ningún conocimiento del factor de seguridad real. Debido a esta incertidumbre, el valor del factor dinámico adoptado era generalmente demasiado alto, y sin embargo la práctica demostró que durante la operación aparecían deformaciones perjudiciales a pesar de la utilización de tales factores excesivos. Esto hizo necesaria una investigación científica más profunda del tema. Por lo tanto, se hizo urgente un estudio más detallado debido al desarrollo de máquinas de capacidades más altas (Prakash, 1981).

Las máquinas de mayor capacidad dieron lugar a esfuerzos considerablemente mayores y de este modo surgieron problemas con relación al desempeño y la seguridad. En parte esto condujo al desarrollo del conocimiento en el campo de las vibraciones y también al de la mecánica de suelos. Por lo tanto, se han desarrollado nuevos procedimientos teóricos para el cálculo de la respuesta dinámica de las fundaciones (Rao, 2011).

De acuerdo con las investigaciones científicas realizadas en las últimas décadas se ha establecido que no es suficiente basar el diseño sólo en cargas verticales multiplicadas por un factor dinámico, incluso si este factor representa una carga dinámica muchas veces mayor que la real. Se debe recordar que el funcionamiento de las máquinas no sólo genera fuerzas verticales, sino también fuerzas que actúan perpendicularmente al eje, y por lo tanto, igualmente deben ser consideradas (Bathia, 2008). También se ha encontrado que la idoneidad de las fundaciones de máquinas no sólo depende de las fuerzas a las que estarán sometidas, sino también de su comportamiento cuando son expuestas a cargas dinámicas, las cuales dependen de la velocidad de la máquina y la frecuencia

natural de la fundación; por lo tanto, se vuelve necesario un análisis de vibraciones.

Todas las fundaciones de máquinas requieren un análisis de vibraciones detallado que proporcione información sobre su comportamiento dinámico y el de sus componentes para garantizar un desempeño satisfactorio de la máquina. El conocimiento completo del mecanismo de transferencia de carga de la máquina a la fundación y también de las fuerzas de excitación y las frecuencias asociadas son una necesidad para la correcta evaluación del desempeño de la máquina.

Todas las fundaciones de máquinas, independientemente de su tamaño y el tipo de máquina, deben ser consideradas como problemas de ingeniería y su diseño debe estar basado en las prácticas actuales. Las cargas dinámicas de las máquinas que causan vibraciones deben ser debidamente tenidas en cuenta para proporcionar una solución que sea técnica y económicamente viable. Aunque actualmente hay disponibles herramientas computacionales avanzadas para la evaluación precisa de las características dinámicas de los sistemas máquina - fundación y su uso es bastante común, en el pasado se limitó su aplicación en las oficinas de diseño.

1.3 ESTADO DEL ARTE

La maquinaria pesada con masas reciprocantes, rotatorias o de impacto, requiere un sistema de apoyo que pueda resistir fuerzas dinámicas y las vibraciones resultantes. Cuando son excesivas, tales vibraciones pueden ser perjudiciales para la maquinaria, su sistema de apoyo, y el personal de operación a cargo de ellas.

Muchos ingenieros están comprometidos con el análisis, diseño, construcción, mantenimiento y reparación de fundaciones de máquinas. Por lo tanto, es importante que el propietario/operador, el ingeniero geotecnista, el ingeniero estructural, y el proveedor del equipo colaboren durante el proceso de diseño. Cada uno de estos actores tiene aportes y asuntos que son importantes y deben ser comunicados eficazmente entre sí, sobre todo teniendo en cuenta que los procedimientos y los criterios de diseño de fundaciones de máquinas generalmente no se tratan en los códigos y normas nacionales o internacionales de diseño y construcción.

Algunas compañías y personas han desarrollado sus propios estándares y especificaciones, como resultado de las actividades de investigación y desarrollo, estudios de campo, muchos años de ingeniería exitosa o prácticas de construcción. Desafortunadamente, la mayoría de esta información no está disponible para muchos profesionales pues son documentos privados o confidenciales.

Como una ayuda de ingeniería para las personas que participan en el diseño de fundaciones de máquinas, este documento presenta algunas de las prácticas actuales de ingeniería y construcción para cimentaciones de equipos dinámicos.

Varias organizaciones e instituciones cuentan dentro de su documentación lineamientos propios para el análisis y diseño de fundaciones convencionales y algunas otras son específicas en el diseño de fundaciones de equipos. A continuación se indican aquellas:

- *American Concrete Institute (ACI)*
- *American Petroleum Institute (API)*
- *American Society of Civil Engineers (ASCE)*
- *American Society for Testing and Materials (ASTM)*
- *Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS)*
- *Deutsches Institut für Normung (DIN)*
- *Federal Emergency Management Administration (FEMA)*
- *International Conference of Building Officials (ICBO)*
- *International Standards Organization (ISO)*

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Precisar la metodología para el análisis y diseño de cimentaciones tipo pórtico de concreto reforzado mediante el método de los elementos finitos, acorde a los principios de la dinámica estructural, criterios de diseño, y la normatividad vigente nacional e internacionalmente.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Citar los documentos y normas elaborados por organizaciones nacionales e internacionales que por años han investigado las fundaciones de equipos dinámicos y pueden ser usados de referencia en la industria.
- Exponer los fundamentos teóricos que definen las vibraciones libres y vibraciones forzadas, y que son la base para entender las vibraciones en equipos dinámicos y su efecto sobre fundaciones. Presentar los requerimientos generales para el análisis, diseño y construcción de fundaciones tipo pórtico de acuerdo con lo establecido por la bibliografía y normatividad especializada en este tema.
- Exponer las incertidumbres, hipótesis, limitaciones y aproximaciones que pueden presentarse en un modelo matemático y definir la forma de considerarlas en las herramientas de análisis computacionales empleadas para el análisis y diseño de la fundación.

- Exponer las solicitaciones de carga que se pueden presentar en una fundación tipo pórtico, su filosofía de análisis incluyendo los efectos de cargas estáticas y de cargas dinámicas comunes a este tipo de estructuras y equipos; definir las combinaciones de carga en función de la probabilidad de ocurrencia de las cargas.
- Realizar el análisis de una fundación tipo pórtico de concreto reforzado por el método analítico y realizar la comparación de resultados con un modelo tridimensional con elementos finitos mediante una herramienta computacional que permita modelar estructuras tipo pórtico para equipos dinámicos con un comportamiento más cercano a la realidad.
- Presentar los criterios disponibles en la literatura para controlar la respuesta del sistema máquina-fundación y garantizar la seguridad y vida útil de la estructura y de la máquina y proteger la integridad física de los operarios.
- Exponer los principales aspectos que deben ser considerados en la construcción de fundaciones tipo pórtico. Mostrar mediante fotografías casos reales de fundaciones tipo pórtico ejecutados en proyectos nacionales e internacionales.

1.5 ALCANCE

El presente trabajo está limitado a los requerimientos de fundaciones tipo pórtico para equipos dinámicos basados en la normatividad vigente.

Con el presente proyecto de investigación se busca presentar una metodología simplificada mediante el uso de los elementos finitos, que permita realizar el análisis de estas fundaciones de una manera sencilla y confiable; y a su vez, que sea aplicable a una herramienta de uso común como lo es una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel. Como complemento a lo anterior, se consignan los lineamientos básicos que permitan realizar el análisis y diseño de fundaciones tipo pórtico de concreto reforzado, teniendo en cuenta los requisitos de la nueva norma NSR-10, e incluyendo aquellos aspectos faltantes de las normas internacionales, pero adaptados a Colombia.

A continuación se presenta la tabla de contenido, el listado de figuras y de tablas, en los cuales se condensó o detalló la metodología para este tipo de fundaciones.

En la siguiente tabla de contenido se presenta los diferentes capítulos en que fue desarrollado el manual y cada uno de los capítulos está relacionado al cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados.

CONTENIDO

	Pág.
1.	GENERALIDADES 29
1.1	INTRODUCCIÓN 29
1.2	ANTECEDENTES 30
1.3	ESTADO DEL ARTE 31
1.4	OBJETIVOS 32
1.4.1	OBJETIVO GENERAL 32
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS 32
1.5	ALCANCE 33
2.	NOTACIÓN Y DEFINICIONES 35
2.1	NOTACIÓN USADA 35
2.2	DEFINICIONES 39
3.	NORMATIVIDAD 47
3.1	NORMAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN 48
3.2	OTROS DOCUMENTOS DE REFERENCIA 51
4.	PRINCIPIOS DE VIBRACIONES 53
4.1	INTRODUCCIÓN 53
4.2	VIBRACIONES LIBRES DE UNA PARTÍCULA 54
4.3	VIBRACIONES FORZADAS 58
4.4	VIBRACIONES LIBRES AMORTIGUADAS 63
4.5	VIBRACIONES FORZADAS AMORTIGUADAS 65
5.	PARÁMETROS DE DISEÑO DE FUNDACIONES 69
5.1	TIPO DE FUNDACIÓN 69
5.2	MATERIALES DE LA FUNDACIÓN 70
5.2.1	CONCRETO 71
5.2.2	ACERO DE REFUERZO 73
5.3	EXCENTRICIDAD DE LA FUNDACIÓN 74
5.4	SINTONÍA DE LA FUNDACIÓN 75
5.4.1	FUNDACIONES DE BAJA SINTONÍA 76
5.4.2	FUNDACIONES DE ALTA SINTONÍA 77
5.5	AISLAMIENTO DE ESTRUCTURAS ADYACENTES 77
5.6	OTROS EFECTOS DIVERSOS 78
5.7	LÍMITES DE VIBRACIÓN EN EL DISEÑO FUNDACIONES DE MÁQUINAS 78
5.8	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA FUNDACIONES TIPO PÓRTICO 79
5.8.1	DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACIÓN 80
5.8.2	PARÁMETROS DE RIGIDEZ PARA LA FUNDACIONES TIPO PÓRTICO 82

5.8.2.1	CARTELAS	82
5.8.2.2	DEFORMACIÓN POR CORTANTE.....	84
5.8.3	RESISTENCIA DE DISEÑO.....	84
5.8.4	REFUERZO MÍNIMO	85
6.	PRINCIPIOS DE DISEÑO.....	87
6.1	RESUMEN DE LOS PASOS DE DISEÑO	89
6.1.1	PROCESO DE ANÁLISIS Y DISEÑO	89
6.1.2	DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS.....	89
6.2	SISTEMA MÁQUINA – FUNDACIÓN	90
6.3	ANÁLISIS DINÁMICO:	91
6.3.1	CARGAS EN LAS VIGAS DE LOS PÓRTICOS	92
6.3.2	MASA DE LA MÁQUINA EN UNA POSICIÓN FUERA DEL CENTRO DE LA VIGA	95
6.3.3	CÁLCULO DE CARGAS SOBRE LAS VIGAS DE LOS PÓRTICOS Y PARTE SUPERIOR DE LAS COLUMNAS	96
6.4	MODO LATERAL DE VIBRACIÓN A LO LARGO DE X.....	98
6.5	MODO VERTICAL DE LA VIBRACIÓN A LO LARGO DE Y	100
6.6	VIBRACIONES LATERALES ACOPLADAS A LAS VIBRACIONES TORSIONALES.....	105
7.	MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	113
7.1	MODELACIÓN Y ANÁLISIS.....	113
7.1.1	MÉTODO DE CÁLCULO MANUAL.....	113
7.1.1.1	FUNDACIONES TIPO BLOQUE.....	113
7.1.1.2	EXCENTRICIDAD DE LA FUNDACIÓN	114
7.1.1.3	FUNDACIONES TIPO PÓRTICO	114
7.1.2	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	115
7.1.2.1	MÁQUINA.....	116
7.1.2.2	FUNDACIÓN.....	117
7.1.2.3	SUELO	120
7.2	PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LAS VIBRACIONES	124
7.2.1	INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LOS PARÁMETROS DEL SUELO	125
7.2.1.1	LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DEL SUELO	125
7.2.1.2	PARTICIPACIÓN DE LA MASA DE SUELO.....	126
7.2.1.3	EFEECTO DEL EMPOTRAMIENTO	126
7.2.1.4	AMORTIGUAMIENTO DEL SUELO	127
7.2.2	INCERTIDUMBRES ASOCIADAS CON LOS PARÁMETROS DE LA FUNDACIÓN.....	128
7.2.3	INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LOS PARÁMETROS DE LA MÁQUINA.....	128
8.	CARGAS Y COMBINACIONES DE CARGA	131
8.1	CONDICIONES DE CARGA	131
8.2	CARGAS	131
8.3	COMBINACIONES DE CARGA.....	132
8.4	HIPÓTESIS DE CARGA	134

8.4.1	CARGA MUERTA	134
8.4.1.1	CARGA MUERTA DE LA FUNDACIÓN (DF)	134
8.4.1.2	CARGA MUERTA DE LA MÁQUINA (DM)	134
8.4.1.3	CARGA MUERTA DE OTROS EQUIPOS Y TUBERÍAS SOBRE LA FUNDACIÓN (DE).....	135
8.4.2	CARGA VIVA (LL)	135
8.4.2.1	CARGA DEL CONDENSADOR	135
8.4.2.2	CARGA MUERTA DEL CONDENSADOR (CD)	136
8.4.2.3	CARGA DE VACÍO DEL CONDENSADOR (CV).....	136
8.4.3	CARGA DE TORQUE NORMAL (QN)	137
8.4.4	CARGA TÉRMICA	137
8.4.4.1	CONTRACCIÓN-EXPANSIÓN DE LA MÁQUINA (TM).....	137
8.4.4.2	GRADIENTE TÉRMICO EN LA FUNDACIÓN DEBIDO A LA OPERACIÓN (TF).....	139
8.4.5	CARGAS DEBIDO A CONTRACCIÓN Y FLUJO PLÁSTICO (SC) ...	140
8.4.6	REACCIONES DE TUBERÍAS Y VÁLVULAS, EXCLUYENDO DL (TP) 141	
8.4.6.1	FUERZAS DE TUBERÍAS DE LA CARCASA DE LA TURBINA	141
8.4.6.2	CARGA POR TUBERÍAS DE EQUIPOS CONECTADOS A LA FUNDACIÓN	141
8.4.7	CARGA NORMAL DE DESBALANCEO DE LA MÁQUINA (NB)	142
8.4.7.1	FUNCIÓN DE FUERZA DINÁMICA	142
8.4.7.2	CARGA PSEUDODINÁMICA.....	144
8.4.7.3	CORRELACIÓN DE LAS CARGAS DINÁMICAS Y PSEUDODINÁMICAS	145
8.4.8	CARGA SÍSMICA (EE).....	146
8.4.9	TORQUE POR EMERGENCIA DEL GENERADOR (QE)	148
8.4.10	CARGA DEBIDO A LA DESVIACIÓN DEL ROTOR (AB).....	149
8.4.11	CARGA DEBIDO A LA PÉRDIDA DE UN ALABE DEL ROTOR (AM) 150	
8.4.12	COMBINACIONES DE CARGA	151
8.4.12.1	HIPÓTESIS DE CARGA	151
8.4.12.2	FACTORES DE CARGA.....	152
8.4.12.3	CONDICIÓN DE OPERACIÓN NORMAL.....	152
8.4.12.4	CONDICIONES DE OPERACIÓN ANORMAL O ACCIDENTE	153
9.	EJEMPLO ANALÍTICO DE UNA FUNDACIÓN TIPO PÓRTICO.....	155
9.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	155
9.2	INFORMACIÓN DE LA MÁQUINA.....	158
9.3	DATOS DE LA FUNDACIÓN	161
9.4	DATOS DEL SUELO.....	162
9.5	OTRAS CARGAS.....	162
9.6	EVALUACIÓN DE MASAS Y RIGIDECES	162
9.6.1	MASA DE LA MÁQUINA SOBRE LOS PÓRTICOS	162
9.6.2	DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACIÓN	164
9.6.3	EXCENTRICIDAD DEL PISO SUPERIOR:.....	165
9.6.4	MASAS ASOCIADAS CON CADA PÓRTICO	166

9.6.5	CENTRO DE MASA	168
9.7	EXCENTRICIDAD DEL PISO SUPERIOR.....	169
9.8	ANÁLISIS DINÁMICO	169
9.8.1	VIBRACIÓN LATERAL (EN X).....	169
9.8.2	VIBRACIÓN VERTICAL (SISTEMA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD)	169
9.8.3	VIBRACIÓN LATERAL Y TORSIONAL ACOPLADA.....	175
9.8.4	AMPLITUDES DE VIBRACIÓN.....	177
10.	MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN SAP2000.....	185
10.1	INTRODUCCIÓN	185
10.2	CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN.....	185
10.3	MODELO SAP2000.....	188
10.4	ANÁLISIS	190
10.5	ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	190
10.6	PERIODOS Y FRECUENCIAS NATURALES.....	191
10.7	MODOS DE VIBRACIÓN	191
10.7.1	CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA.....	191
10.7.2	FORMAS DE LOS MODOS	193
10.8	REVISIÓN DE RESONANCIA	196
10.9	RESPUESTA DE LA FUNDACIÓN Y REVISIÓN DE AMPLITUDES	197
10.10	FUNCIÓN TIME HISTORY (VIBRACIÓN FORZADA)	200
10.11	RESPUESTA DEL SISTEMA.....	206
10.12	OTRAS CARGAS.....	211
10.12.1	FUERZAS SÍSMICAS	211
10.12.2	CARGAS DE FALLA EN LOS APOYOS DE LA MAQUINA	213
10.12.3	CARGAS TÉRMICAS.....	213
10.13	DERIVAS.....	214
10.14	DISEÑO.....	216
10.14.1	DIAGRAMAS DE CORTANTE Y MOMENTO.....	216
10.14.2	DIAGRAMAS DE DISEÑO A FLEXO COMPRESIÓN DE LAS COLUMNAS.....	222
10.14.3	DISEÑO A CORTANTE DE LAS COLUMNAS	223
10.14.4	DISEÑO DE LA LOSA DE CONCRETO	231
11.	CARTAS PARA LA VERIFICACIÓN DE FACTORES DE SERVICIO	241
11.1	CARTA DE SEVERIDAD DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS.	241
11.2	CARTA DE CRITERIOS DE VIBRACIÓN PARA MÁQUINAS ROTATIVAS.....	243
11.3	CARTA DE LÍMITES FISIOLÓGICOS EN SERES HUMANOS.....	245
12.	ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.....	247
12.1	DETALLES DEL CONCRETO	247
12.2	DETALLES DEL REFUERZO	247
12.3	JUNTAS DE EXPANSIÓN	249
12.4	PERNOS DE ANCLAJE Y ACCESORIOS.....	250
12.5	CONEXIÓN CON EL PISO Y PROTECCIÓN DE LOS BORDES	254
12.6	FUNDACIONES DE CONCRETO PRESFORZADO	255
12.7	PROVISIONES PARA SINTONIZACIÓN DE FUNDACIONES	256

13.	RESEÑA FOTOGRÁFICA.....	259
14.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	265
14.1	CONCLUSIONES.....	265
14.2	RECOMENDACIONES	266
15.	BIBLIOGRAFÍA	269
16.	ANEXOS - PLANOS.....	271

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 5.1 Dimensiones de las barras de refuerzo.....	73
Tabla 5.2 Amplitudes admisibles (Bathia, 2008).....	79
Tabla 8.1 Clasificación de cargas para diseño por resistencia última.....	133
Tabla 8.2. Carga pseudodinámica de desbalanceo de la máquina para $G=2.5$ mm/s (0.1 in/s).....	146

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 4.1	Vibración libre de la partícula P (Beer & Johnson, 2010)	55
Figura 4.2	Curva desplazamiento-tiempo (Beer & Johnson, 2010)	56
Figura 4.3	Movimiento de un punto Q que describe un círculo auxiliar de radio (Beer & Johnson, 2010)	57
Figura 4.4	Sistema sometido a una fuerza periódica (Beer & Johnson, 2010)..	59
Figura 4.5	Sistema conectado elásticamente a un apoyo que tiene un movimiento alternante (Beer & Johnson, 2010).....	59
Figura 4.6	Vibración de estado estable y vibración libre transitoria (Beer & Johnson, 2010)	60
Figura 4.7	Factor de amplificación en función de (Beer & Johnson, 2010)	62
Figura 4.8	Representación del amortiguamiento viscoso (Beer & Johnson, 2010)	63
Figura 4.9	Vibración libre amortiguada (Beer & Johnson, 2010)	65
Figura 4.10	Factor de amplificación (Beer & Johnson, 2010)	67
Figura 5.1	Bloque de Fundación típico	69
Figura 5.2	Fundación tipo Pórtico	70
Figura 5.3	Vibración lateral de una fundación tipo pórtico – Fundación con y sin excentricidad del piso superior.....	75
Figura 5.4	Factor de magnificación vs. Relación de frecuencias	76
Figura 5.5	Pórtico típico con cartelas	83
Figura 5.6	Pórtico típico que soporta la masa de una maquina en el centro de la viga.....	83
Figura 6.1	Fundación tipo pórtico típica	88
Figura 6.2.	Diagrama esquemático de un sistema máquina-fundación sometido a cargas dinámicas.	91
Figura 6.3	Planta típica de un piso de operación (cargas de la máquina en el piso superior y peso propio de la losa)	92
Figura 6.4	Pórtico transversal representativo con las cargas de la máquina y el peso propio del piso superior	93
Figura 6.5	a) Factor de participación de la masa cuando la masa de la máquina está fuera del centro de la viga del pórtico b) y c) Sistema de masa equivalente.....	96
Figura 6.6	Cargas de la máquina en el piso superior y peso propio de la losa .	96
Figura 6.6	a) Pórtico típico b) Modelo matemático para vibración lateral	99
Figura 6.7	a) Pórtico típico – Modelo matemático para vibración vertical.....	100
Figura 6.7	b) Pórtico típico – Modelo matemático para vibración vertical.....	102

Figura 6.8	Vibración lateral de una fundación tipo pórtico – Fundación con y sin excentricidad del piso superior.....	106
Figura 6.9	Vibración Lateral de una Fundación tipo pórtico – Fundación con y sin excentricidad del piso superior.....	108
Figura 6.10	Fundación tipo pórtico con n pórticos sujetos a una fuerza y momento dinámico aplicados en el centro de masa – Movimiento en el plano Z-X con vibración lateral en X y vibración torsional alrededor de Y...	110
Figura 7.1.	Modelación de la máquina con la fundación:.....	117
Figura 7.2.	Bloque de fundación - Modelo sólido y malla de elementos finitos.	118
Figura 7.3.	Fundación tipo pórtico - Modelo de elementos sólidos y modelo de elementos planos y tipo viga.....	120
Figura 7.4.	Métodos de representación del suelo para modelación con elementos finitos.....	122
Figura 7.5.	Varios métodos de representación del suelo modelado por elementos finitos.....	124
Figura 7.6.	Máquina que tiene dos rotores con fuerzas desbalanceadas fuera de fase en cada rotor	129
Figura 8 1	Casos de Carga	132
Figura 8-2	Principales métodos de soporte del condensador	136
Figura 8 3	Planta del piso de operación del turbo-generador (transversal)	138
Figura 8-4	Planta del turbo-generador sobre el piso de operación (Longitudinal)	139
Figura 8-5	Fuerzas de desbalanceo a lo largo del eje con soportes múltiples	143
Figura 8-6	Masa excéntrica de rotación	144
Figura 8 7	Carga debido a la falla de un álabe del rotor	151
Figura 9-1.	Arreglo general y sección de la fundación	156
Figura 9-2.	Eje de la planta y elevación del pórtico.....	158
Figura 9-3.	Cargas de la máquina y fuerzas de desbalanceo en la parte superior del Piso	160
Figura 9-4	Cargas de la máquina y excentricidad.....	164
Figura 10.1.	Modelo 3D SAP2000.	188
Figura 10.2.	Modelo 3D SAP2000.	189
Figura 10.3	Factor de magnificación vs. Relación de frecuencias	197
Figura 10.4.	Fuerza de desbalanceo en el rotor durante el encendido y apagado de la máquina.....	198
Figura 10.5.	Identificación de puntos de análisis	199
Figura 10.6.	Cuadro de diálogo de la función Time History Functions	201
Figura 10.7.	Cuadro de diálogo de la subfunción “Sine Function” para los puntos de apoyo del Generador	203
Figura 10.8.	Cuadro de diálogo de la subfunción “Sine Function” para el apoyo 1 de la Turbina	204
Figura 10.9.	Cuadro de diálogo de la subfunción “Sine Function” para el apoyo 2 de la Turbina	205
Figura 10.10.	Cargas térmicas en el modelo	214

Figura 11.1	Carta de severidad de vibraciones en máquinas (Baxter and Bernhard 1967).....	242
Figura 11.2.	Carta de criterios de vibración en máquinas rotativas (Blake 1964, as modified by Arya, O'Neill, and Pincus 1979).....	244
Figura 11.3.	Carta de límites fisiológicos en seres humanos (Richart, Hall, and Woods 1970).....	245
Figura 12.1.	Refuerzo típico en la losa de una fundación tipo pórtico	248
Figura 12.2.	Refuerzo alrededor de (a) una abertura rectangular y (b) una abertura circular.....	248
Figura 12.3.	Refuerzo típico en vigas longitudinales con proyección en voladizo.	249
Figura 12.4.	Detalle en una unión viga-columna.....	249
Figura 12.5.	Posicionamiento de la placa base	250
Figura 12.6.	Fijación de los pernos de anclaje mediante una plantilla perforada, los orificios corresponden con los de la placa base.....	251
Figura 12.7.	Agujeros de los pernos accesibles para la limpieza de conductos.	252
Figura 12.8.	Detalles de accesorios en pernos de anclaje.	253
Figura 12.9	(a) Conexión de la fundación de la máquina y el piso: (b) incorrecta, (c) correcta.	254
Figura 12.10.	Bordes de esquina y de junta.....	255
Figura 12.11.	Esfuerzos de los tendones en los conductos en una fundación de concreto presforzado para un martillo.	256

15. BIBLIOGRAFÍA

- 15.1 ACI 351.3R-04, "Foundations for Dynamic Equipment", Reported by ACI Committee 351, 2004
- 15.2 AIS 180-13 "Recomendaciones para Requisitos Sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones"
- 15.3 ASCE, "Design-of-Large-Steam-Turbine-Generator-Foundations", 1987.
- 15.4 ASCE, "Foundations for Dynamic Loads", 2008.
- 15.5 ARYA, S. C.; O'Neill, M. W.; and Pincus, G., "Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines" – Arya, O'Neill and Pincus – Gulf Publishing Co -1979.
- 15.6 BARKAN, D.D, "Dynamics of bases and Foundations", Mc.Graw-Hill Book Company, Inc 1967.
- 15.7 BATHIA, K G, "Foundations for Industrial Machines and Earthquake Effects", ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 495, 2008.
- 15.8 BATHIA, K G, "Foundations for Industrial Machines: Handbook for Practising Engineers", D-CAD Publishers, 2008.
- 15.9 BEER & JOHNSON., "Dinámica, Mecánica vectorial para ingenieros", 9th Edition, McGraw-Hill, 2010.
- 15.10 BOWLES, J. E., "Foundation Analysis and Design", 5th Edition, McGraw-Hill, 1996.
- 15.11 CCDSP-95 "Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes"
- 15.12 CLOUGH et al, (1975) – "Dynamics of Structures" – Clough, R.W.- Penzien, J. - Mc Graw Hill – 1975
- 15.13 DAS, B. M., "Principles of Soil Dynamics, Boston, Mass"., PWS-Kent Publishers, 1993.
- 15.14 FRATELLI, M. G., "Suelos, Fundaciones y Muros", Caracas, 1993.
- 15.15 GAZETAS, G., "Analysis of Machine Foundation Vibrations: State of the Art," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V. 2, No. 1, Jan., 1983.

- 15.16 NSR-10 “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”
- 15.17 PRAKASH, Shamsheer. “Soil Dynamics”, McGraw Hill, 1981.
- 15.18 RAO, Kameswara. “Foundation Design Theory and Practice”, John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- 15.19 RICHART, F. E., Jr.; Hall, J. R., Jr.; and Woods, R. D., “Vibrations of Soils and Foundations”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1970.
- 15.20 SARAM, Swami, “Soils Dynamics and Machine Foundations”, Galgotia Publications, 1999.
- 15.21 SRINIVASULU, Vaidyanathan V., “Handbook of Machine Foundation”, bulletin, 1983.

16. ANEXOS - PLANOS