

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENEIRÍA CIVIL

**“ MANUAL DE DISEÑO DE CIMENTACIÓN TIPO
PÓRTICO PARA EQUIPO DINÁMICO ”**

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

EDUARDO SEBASTIÁN LÓPEZ MORENO

SANGOLQUÍ, JUNIO 28 DEL 2010

RESUMEN

Las cimentaciones de máquinas son parte fundamental de todo complejo industrial. 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 determinar que las frecuencias del sistema máquina cimentación sean distintas de la frecuencia de operación normal de la máquina y que las amplitudes del sistema se enmarquen dentro de los límites permisibles.

Se presenta además un ejemplo práctico del diseño de una Cimentación Tipo Pórtico utilizando SAP 2000, para un Equipo Turbogenerador de 25 MW y 3000 rpm

ABSTRACT

Foundations of machines are a fundamental part of every industrial complex. We present the main considerations, and project design criteria for a secure and efficient foundations. The difference with conventional foundations lies in the dynamic analysis should be developed to determine the frequencies of machine foundation system are different from the normal operating frequency of the machine and that the amplitudes of the system is framed within the permissible limits.

It also presents a practical example of designing a Framed Foundation using SAP 2000, for a 25 MW turbo-generator equipment and 3000 rpm

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el **Sr. EDUARDO SEBASTIÁN LÓPEZ MORENO** como requerimiento parcial a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**.

Sangolquí, Junio del 2010

Ing. Marcelo Guerra Avendaño

DIRECTOR

Ing. Ernesto Pro Zambrano

CODIRECTOR

REVISADO POR

Ing. Jorge Zuñiga Gallegos

DIRECTOR DE LA CARRERA

DEDICATORIA

A toda mí querida familia, en especial a mis padres y hermanos de los cuales he recibido incontables veces su apoyo incondicional a lo largo del desarrollo de este proyecto de grado y de la carrera.

A mis amigos por tener la suerte de compartir junto a ellos esta etapa de la vida.

Eduardo Sebastián López Moreno

AGRADECIMIENTO

A la Virgen Dolorosa, por cuidar siempre de mí y mi familia al mismo tiempo que nos llena de incontables bendiciones.

A mis padres Milton y Teresa, los ángeles de la guarda de mi vida, de quienes he aprendido los principios que rigen a una persona de bien.

Agradezco el tiempo y conocimiento que recibí de parte de mi Director de Tesis Ing. Marcelo Guerra y Codirector Ing. Ernesto Pro.

Eduardo Sebastián López Moreno

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	REQUERIMIENTOS GENERALES.....	2
1.3	CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO.....	3
1.4	DATOS DE DISEÑO.....	3
1.5	CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO.....	4
i.	Estado límite de falla.....	4
ii.	Estado límite de servicio.....	4
1.6	AMPLITUDES PERMISIBLES.....	7
1.7	PRESIONES PERMISIBLES.....	9
1.7.1	SUELO.....	9
i.	Consideraciones Generales.....	9
ii.	Presión permisible en función de la velocidad de propagación de las ondas.....	9
iii.	Presión permisible para cargas dinámicas aplicando un factor de reducción.....	12
1.7.2	OTROS MATERIALES.....	13
1.8	TRASMISIÓN DE VIBRACIONES Y COMO DISMINUIRLAS.....	13
1.9	RESONANCIA Y SUS EFECTOS.....	14

CAPITULO 2

“TIPOS DE CIMENTACIONES PARA EQUIPO DINÁMICO”

2.1.	CLASIFICACIÓN DE EQUIPO DINÁMICO	
2.1.1.	EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN.....	18
i.	Frecuencias bajas a medias 0 – 500 rpm.....	18
ii.	Frecuencias medias a altas 500 – 1000 rpm.....	18
iii.	Frecuencias muy altas > 1000 rpm.....	18
2.1.2.	EN FUNCIÓN DE LA MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE VIBRACIONES.....	19

2.1.3.	BASADAS EN EL CRITERIO DE DISEÑO DE SUS FUNDACIONES	19
i.	Las que producen fuerzas de impacto	19
ii.	Las que producen fuerzas periódicas	20
iii.	Maquinaria de velocidad alta	20
iv.	Otras máquinas misceláneas.....	20
2.2.	TIPOS DE CIMENTACIONES.	21
2.2.1.	TIPO BLOQUE	21
i.	Hipótesis básicas para el análisis de cimentaciones tipo bloque para máquinas de impacto	21
ii.	Hipótesis básicas para el análisis de cimentaciones tipo bloque para máquinas de fuerzas periódicas.....	21
2.2.2.	TIPO CAJA	22
2.2.2.	TIPO MURO	22
2.2.4.	TIPO PÓRTICO.....	22
2.3.	CIMENTACIÓN TIPO PÓRTICO.....	23
2.3.1.	USOS.....	23
i.	Función y tecnología de los Turbogeneradores.....	23
2.3.2.	VENTAJAS	26
2.3.3.	TIPOS DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO.....	26
i.	Tipo 1.....	29
ii.	Tipo 2.....	30
iii.	Tipo 3.....	31
iv.	Tipo 4.....	32
v.	Tipo 5.....	33

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO

3.1	DATOS DE DISEÑO	34
3.1.1.	DATOS DE LA MÁQUINA.....	34
3.1.2.	DATOS DEL SUELO.....	35
3.2.	CONSIDERACIONES ESPECIALES AL PROYECTAR	35
3.3.	CRITERIOS PRINCIPALES DE DISEÑO	38
3.4.	ANÁLISIS DINÁMICO	38

3.4.1.	MÉTODO DE LA RESONANCIA	40
i.	Determinación de las Frecuencias naturales	40
ii.	Fuerzas Dinámicas.....	44
3.4.2.	MÉTODO DE LA AMPLITUD	45
i.	Fuerzas Desbalanceantes.....	46
ii.	Frecuencia Natural Vertical y Amplitud Vertical.....	50
iii.	Frecuencia Natural Horizontal y Amplitud Horizontal.....	57
iv.	Fuerzas Dinámicas.....	62
3.4.3.	MÉTODO COMBINADO	63
i.	Frecuencia Vertical.....	63
ii.	Frecuencia Horizontal.....	63
iii.	Amplitudes	64
iv.	Fuerzas Dinámicas	66
3.4.4.	COMENTARIO DE LOS VARIOS MÉTODOS	68
3.5.	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	69
3.5.1.	CASOS DE CARGA.....	69
i.	Cargas Muertas.....	69
ii.	Cargas de Construcción	70
iii.	Cargas Dinámicas	70
iv.	Cargas Debidas a la Baja Presión en el Condensador.....	71
v.	Efectos de Temperatura y Contracción	72
vi.	Fuerza Debida al Efecto Sísmico	72
3.5.2.	DISEÑO DE LOS PÓRTICOS TRANSVERSALES	72
3.5.3.	DISEÑO DE LOS PÓRTICOS LONGITUDINALES	74
3.5.4.	DISEÑO DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN.....	75
3.6.	DETALLES CONSTRUCTIVOS	75
3.6.1.	HORMIGÓN	76
3.6.2.	REFUERZO.....	77
3.6.3.	JUNTAS DE EXPANSION	78
3.6.4.	ELEMENTOS DE SUJECIÓN.....	78

CAPÍTULO IV
CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN TIPO PÓRTICO
MEDIANTE UN MODELO EN SAP 2000

4.1.	ANTECEDENTES	80
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO ESTRUCTURAL.....	80
4.3.	SOLICITACIONES.....	81
4.4.	MATERIALES.....	82
4.4.1.	HORMIGÓN	82
4.4.2.	ACERO	82
4.5.	DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS LATERALES DE DISEÑO MÍNIMAS	82
4.6.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	83
4.6.1.	CREACIÓN DEL MODELO	83
4.6.1.1.	Tipología Geométrica	83
4.6.1.2.	Definición de Materiales.....	85
4.6.1.3.	Definición de Secciones.....	86
i.	Geometría de elementos tipo shell.....	86
ii.	Clases de elementos tipo shell.....	87
iii.	Creación de la sección del elemento Shell.....	88
iv.	Secciones definidas para el modelo de la cimentación	89
4.6.1.4.	Asignación de Cargas	91
i.	Peso propio.....	91
ii.	Carga estática (peso del turbogenerador).....	92
iii.	Carga de operación normal del turbogenerador	94
iv.	Par de corto circuito.....	96
v.	Fuerzas sísmicas en los cojinetes en sentido X	98
vi.	Fuerzas sísmicas en los cojinetes en sentido Y	100
vii.	Carga viva	103
viii.	Peso del suelo de relleno.....	103
ix.	Acción Dinámica	103
4.6.1.5.	Combinaciones de Carga	106
4.6.2.	ESFUERZOS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN	107
i.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMB1	109

ii.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMB2	110
iii.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMBu1.....	111
iv.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMBu2.....	112
v.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMBu3.....	113
vi.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMBux.....	114
vii.	Esfuerzos para la combinación de cargas COMBuy.....	115
4.6.3.	AMPLITUDES MEDIDAS EN LOS COJINETES	116
4.6.4.	MODELACIÓN DE ACCIONES DINÁMICAS	116
4.6.5.	DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS DE DISEÑO	117
i.	Determinación de la combinación de cargas crítica.	117
ii.	Determinación de esfuerzos sobre los elementos debido a la combinación de cargas COMBu2.....	119
4.6.5.1.	Determinación de momentos y cortantes en la losa de cimentación debido a la combinación de cargas COMBu2.....	120
4.6.5.2.	Determinación de momentos y cortantes en la losa del generador debido a la combinación de cargas COMBu2.....	125
4.6.5.3.	Determinación de momentos y cortantes en la losa de la turbina debido a la combinación de cargas COMBu2.....	128
4.6.5.4.	Determinación de esfuerzos en muros	131
4.6.6.	DISEÑO A FLEXIÓN.....	135
4.6.7.	CHEQUEO DE CORTE.....	136

CAPITULO V

“PLANOS DE INGENIERÍA DE DETALLE”

CAPITULO VI

“CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”

6.1	CONCLUSIONES.....	137
6.2	RECOMENDACIONES.....	138

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Figura 1.1 Límites permisibles para amplitudes de vibraciones verticales.....	7
Figura 1.2 Resorte con oscilación forzada.....	15

CAPÍTULO II

TIPOS DE CIMENTACIONES PARA EQUIPO DINÁMICO

Figura 2.1 Cimentación tipo bloque.....	21
Figura 2.2 Cimentación tipo caja.....	22
Figura 2.3 Cimentación tipo muro.....	22
Figura 2.4 Cimentación tipo pórtico.....	23
Figura 2.5 Disposición general del equipo de un turbogenerador.....	24
Figura 2.6 Turbina de vapor.....	24
Figura 2.7 Turbogenerador con cimentación tipo pórtico, 6,000kW = 6MW de capacidad.....	29
Figura 2.8 Turbogenerador con cimentación tipo pórtico, 24,000kW = 24 MW de capacidad.....	30
Figura 2.9 Turbogenerador con cimentación tipo pórtico, 50,000kW = 50 MW de capacidad.....	31
Figura 2.10 Turbogenerador con cimentación de muro y pórticos, 100,000kW = 100 MW de capacidad.....	32
Figura 2.11 Cimentación combinada (losa de hormigón armado y estructura de acero), Turbogenerador 30,000kW = 30 MW de capacidad.....	33

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO

Figura 3.1 Diagrama de Cargas para una Fundación de Turbogenerador (a) Planta (b) Elevación.....	34
Figura 3.2 Típica Cimentación tipo Pórtico.....	36
Figura 3.3 Sistema modelo para un pórtico transversal.....	41
Figura 3.4 Sistema acoplado para vibraciones verticales.....	41
Figura 3.5 Modelo del Sistema para Vibraciones Verticales.....	45
Figura 3.6 Fuerza Excitadora Debida al Desbalanceo Dinámico.....	47
Figura 3.7 Frecuencias límite.....	55
Figura 3.8 Masas Actuantes y Movimientos de la Estructura.....	57
Figura 3.9 Modelo Simplificado Para Vibraciones Horizontales.....	58
Figura 3.10 Casos de Carga.....	69
Figura 3.11 Sección Típica de un Pórtico Transversal (a) Con Acartelamiento (b) Sin Acartelamiento.....	73
Figura 3.12 Grafica para Determinar el Coeficiente α para Pórticos Acartelados.....	74

CAPÍTULO IV

CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN TIPO PÓRTICO MEDIANTE UN MODELO EN SAP 2000

Figura 4.1 Definición de grilla.....	83
Figura 4.2 Grilla en 3D.....	84
Figura 4.3 Geometría de cimentación tipo pórtico.....	84
Figura 4.4 Definición de material.....	85
Figura 4.5 Geometría de elementos Shell (a) De 4 nodos (b) De 3 nodos.....	86
Figura 4.6. Grados de libertad elemento membrana.....	87

Figura 4.7. Elemento tipo placa (a) Grados de libertad elemento placa, (b) Deformaciones elemento placa.....	87
Figura 4.8 Secciones definidas para el modelo.....	89
Figura 4.9 Propiedades de cada sección tipo shell definida para el modelo.....	90
Figura 4.10 Definición de estados de carga.....	91
Figura 4.11 Cargas estáticas en la cimentación.....	93
Figura 4.12 Cargas de operación en la cimentación.....	95
Figura 4.13 Par de corto circuito.....	97
Figura 4.14 Fuerzas sísmicas en sentido X.....	99
Figura 4.15 Fuerzas sísmicas en sentido Y.....	101
Figura 4.16 Asignación del cortante basal a los elementos área de la losa de turbina y generador.....	102
Figura 4.17 Acción Dinámica.....	104
Figura 4.18 Función definida en el modelo.....	105
Figura 4.19 Caso de carga dinámica definida en el modelo.....	105
Figura 4.20 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMB1.....	109
Figura 4.21 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMB2.....	110
Figura 4.22 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMBu1.....	111
Figura 4.23 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMBu1.....	112
Figura 4.24 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMBu3.....	113
Figura 4.25 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMBux.....	114
Figura 4.26 Esfuerzos en el suelo, combinación de carga COMBuy.....	115
Figura 4.27 Configuración de ventana para presentación de esfuerzos.....	117
Figura 4.28 Sección de corte.....	119
Figura 4.29 Dimensión de discretizaciones y numeración de franjas Losa de Cimentación.....	120
Figura 4.30. Losa de Cimentación (a) Momentos X (M1) (b) Momentos Y (M2) (t,m) - Cargas factoradas COMBU2.....	121

Figura 4.31. Losa de Cimentación (a) Cortantes X (V13) (b) Cortantes Y (V23) (t.) - Cargas factoradas COMBU2.....	122
Figura 4.32 Dimension de discretizaciones y numeración de franjas “Losa de Generador”.....	125
Figura 4.33. Losa de Generador (a) Momentos X (M1) (b) Momentos Y (M2) (t.m) Cargas factoradas COMBU2.....	125
Figura 4.34. Losa de Cimentación (a) Cortantes X (V13) (b) Cortantes Y (V23) (t) Cargas factoradas COMBU2.....	126
Figura 4.35 Dimensión de discretizaciones y numeración de franjas “Losa de Turbina”.....	128
Figura 4.36. Losa de Turbina (a) Momentos X (M1) (b) Momentos Y (M2) (t.m) Cargas factoradas COMBU2.....	128
Figura 4.37. Losa de Turbina (a) Cortantes X (V13) (b) Cortantes Y (V23) (t.) Cargas factoradas COMBU2.....	129
Figura 4.38 Vista en planta de los tipos de muros de la estructura de cimentación....	131
Figura 4.39. Elevación Muro Tipo 1. (a) Corte A, esfuerzos sentido X (t/m ²) (b) Corte A' , esfuerzos en sentido X (t/m ²).....	131
Figura 4.40. Elevación Muro Tipo 2 y Tipo 3. (a) Corte B, esfuerzos sentido X (t/m ²) (b) Corte B' , esfuerzos en sentido X (t/m ²).....	132
Figura 4.41. Elevación Muro Tipo 1. (a) Corte C, esfuerzos sentido Y (t/m ²) (b) Corte C' , esfuerzos en sentido Y (t/m ²).....	133
Figura 4.42. Elevación Muros Tipo 2. (a) Corte D, esfuerzos sentido Y (t/m ²).....	133
Figura 4.43. Elevación Muros Tipo 2. (a) Corte E, esfuerzos sentido Y (t/m ²).....	134

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1 Amplitudes permisibles para máquinas de alta velocidad.....	8
Tabla 1.2 Relaciones entre los valores aproximados de la velocidad de propagación de las ondas y la tensión admisible estática.....	10
Tabla 1.3 Modulo de Poisson recomendado.....	11
Tabla 1.4 Peso Específico para varios tipos de suelos.....	11
Tabla 1.5 Modulo de Elasticidad para varios tipos de suelos.....	11
Tabla 1.6 Esfuerzo admisible referencial para cargas estáticas para varios tipos de suelos.....	13

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO

Tabla 3.1 Espesores recomendados de losas de cimentación directamente apoyadas sobre suelo.....	36
Tabla 3.2 Excentricidad del rotor en función de su velocidad.....	48
Tabla 3.3 Balanceo de Rotores de Máquinas a 1500 rpm.....	49
Tabla 3.4 Balanceo de Rotores de Máquinas a 3000 rpm.....	50
Tabla 3.5 Peso de los Rotores de Turbo-Generadores de Diferente Capacidad.....	70
Tabla 3.6 Cantidad Aproximada de Hormigón Armado en m ³	77

CAPÍTULO IV

CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN TIPO PÓRTICO MEDIANTE UN MODELO EN SAP 2000

Tabla 4.1 Peso específico de cargas muertas.....	81
---	----

Tabla 4.2 Cargas estáticas en la cimentación.....	92
Tabla 4.3 Cargas de operación en la cimentación.....	94
Tabla 4.4 Par de corto circuito.....	96
Tabla 4.5 Fuerzas sísmicas en sentido X.....	98
Tabla 4.6 Fuerzas sísmicas en sentido Y.....	100
Tabla 4.7 Acción Dinámica.....	104
Tabla 4.8 Amplitudes en los cojinetes.....	116
Tabla 4.9 Frecuencias del sistema y suma de la masa participativa modal.....	117
Tabla 4.10 Determinación de combinación de cargas crítica.....	118
Tabla 4.11. Momentos y Cortante en Dirección X en Franjas de Losa de Cimentación.....	123
Tabla 4.12. Momentos y Cortante en Dirección Y en Franjas de Losa de Cimentación.....	123
Tabla 4.13. Momentos y Cortante en Dirección X en Franjas de “Losa de Generador”.....	126
Tabla 4.14. Momentos y Cortante en Dirección Y en Franjas de “Losa de Generador”.....	127
Tabla 4.15. Momentos y Cortante en Dirección X en Franjas de “Losa de Turbina”..	129
Tabla 4.16. Momentos y Cortante en Dirección Y en Franjas de “Losa de Turbina”..	130
Tabla 4.17 Momentos y cargas actuantes en el “Muro Tipo 1”.....	134
Tabla 4.18 Momentos y cargas actuantes en el “Muro Tipo 2”.....	134
Tabla 4.19 Momentos y cargas actuantes en el “Muro Tipo 3”.....	135
Tabla 4.20 Diseño a flexión de losas.....	136
Tabla 4.21 Chequeo de cortante.....	136

NOMENCLATURA UTILIZADA

a	Amplitud
ad	Amplitud
Av	Aceleración de las vibraciones, expresada como proporción de la gravedad
A_b	Área de la sección transversal de cada viga
A_c	Área de la sección trasversal de cada columna
C_i	Magnitud de las fuerzas excitadoras
C	Fuerza centrífuga
D	Diámetro de la carcasa del generador
E	Modulo de elasticidad (kg/cm ²)
e	Excentricidad del rotor
e	Distancia entre el centro de gravedad y el centro de rigidez horizontal
Σ	Sumatoria
F	Fuerza
F	Fuerza dinámica
F_{max}	Fuerza dinámica máxima
f_v	Frecuencia natural vertical del sistema (rad/seg)
f_i	Frecuencia natural vertical del pórtico transversal i (rad/seg)
f_h	Frecuencia natural horizontal
G	Coefficiente de resistencia al corte
g	Aceleración de la gravedad
h	Altura efectiva de las columnas
I	Importancia de la estructura.
IS	Codigo Estándar Indu
I_b	Momento de inercia centroidal de la sección transversal de la viga
I_c	Momento de inercia centroidal de la sección trasversal de las columnas
K	Rigidez del sistema

K	Relación de rigidez
K_h	Rigidez horizontal de cada pórtico transversal (t/m)
K_s	Coefficiente de balasto
l	Longitud efectiva de la viga
M	Momento excitador
m	Masa del sistema
m_a	Masa de las vigas longitudinales que se apoyan en cada nudo y la del equipo mecánico que se apoya en ellas
m_b	Masa de la viga transversal
m_c	Masa de cada columna
N	Frecuencia de operación de la máquina (rpm)
N	Carga que transmiten las vigas longitudinales a cada columna del pórtico i .
η	Relación de frecuencias ω_m / ω_n
n	Número de pórticos transversales
φ	Momento total de inercia de las masas m_i respecto al centro de masas.
\emptyset_P	Factor de configuración estructural en planta
\emptyset_E	Factor de configuración estructural en elevación
P	Peso de la maquinaria
P_v	Fuerza dinámica vertical
P_h	Fuerza dinámica horizontal
q	Presión de contacto de estructura de cimentación en el suelo
q	Peso propio por unidad de longitud
Q	Peso de la estructura de cimentación que carga la viga del pórtico i
R	Peso del rotor del turbogenerador
R	Factor de reducción de respuesta estructural
r	Radio de giro
S	Factor de suelo.
T	Periodo de vibración.
μ	Factor dinámico

V	Fuerza cortante en la base
V	Velocidad de propagación de las ondas (m/s^2)
v	Modulo de Poisson
W	Peso del sistema
W	Cargas de operación normal en los cojinetes y el peso de la estructura
ω_m	Frecuencia de operación de la máquina (Hz)
ω_n	Frecuencia natural del sistema
$\overline{\omega_{n1}^2}$	Frecuencias limite
$\overline{\omega_{n2}^2}$	Frecuencias limite
X_{Gi}	Distancia al centro de gravedad
X_{Hi}	Distancia al centro de rigidez
Z	Factor de zona sísmica, Quito = 0.40
σ_{st}	Presión admisible del suelo para cargas estáticas (kg/cm^2)
σ_d	Presión admisible del suelo para cargas dinámicas (kg/cm^2)
δ	Desplazamiento, asiento de la estructura de cimentación.
δ_{st}	Desplazamiento estático
δ_v	Desplazamiento estático vertical el centro del claro
δ_1	Deflexión debido a la carga concentrada
δ_2	Deflexión debido a la carga uniformemente distribuida
δ_3	Deflexión debido al corte
δ_4	Compresión de la columna debido a la carga axial
δ_h	Desplazamiento lateral debido a una fuerza horizontal unitaria
γ	Peso específico del suelo (t/m^3)
γ	Rigidez torsional del sistema
λ	Frecuencia de los diferentes modos de vibración del sistema
Δ	Decremento logarítmico de amortiguamiento

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.

Las cimentaciones de máquinas forman parte vital y extensa de cualquier complejo industrial, si en el país se orientan los recursos a la reactivación productiva, existirá un crecimiento de la industria, evidentemente las cimentaciones de máquinas asumirán gran importancia en el contexto de la economía nacional.

En el diseño de una cimentación para maquinaria debe definirse la forma estructural de la 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 costes 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 manual se presentan criterios generales y recomendaciones básicas para cimentaciones tipo bloque para máquinas de fuerzas periódicas y para máquinas de impacto, y se hace un estudio más amplio 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 los autores del proyecto general de esas instalaciones.

1.2 REQUERIMIENTOS GENERALES.

Los siguientes requerimientos deberán cumplirse para el diseño:

- i.** La cimentación debe ser capaz de soportar las cargas superpuestas, sin causar fallas de corte o aplastamiento. Así, en el caso de macizos aislados de máquinas debe utilizarse siempre el hormigón armado, ya que posee una gran resistencia a la flexión y da garantías contra la rotura, permitiendo igualmente disminuir las dimensiones del macizo, lo que asegura un aumento de la superficie útil y reduce el costo.
- ii.** Para evitar la falla del suelo, los asentamientos de la estructura deben inducir presiones de contacto menores que la presión admisible del suelo. Los asentamientos permisibles están indicados en el informe de mecánica de suelos, normalmente hasta 25 mm.
- iii.** El centro de gravedad combinado de la cimentación y de la máquina debe estar en la medida de lo posible en la misma línea vertical del centro de gravedad del plano base.
- iv.** Para evitar que se presente el fenómeno de la resonancia, la frecuencia natural del sistema cimentación-suelo, debe ser más grande ó más pequeña comparada con la frecuencia de operación de la máquina. Para máquinas de velocidad baja, la frecuencia natural del sistema debe ser alta, y viceversa. El fenómeno de la resonancia se caracteriza por producir desplazamientos excesivos, de ahí que debe evitarse siempre.
- v.** Las amplitudes en condiciones de servicio deben estar entre los límites permisibles. Los límites permisibles generalmente son prescritos por los fabricantes de las máquinas.
- vi.** Todas las partes giratorias y oscilantes de la máquina, deben estar balanceadas, para minimizar fuerzas y momentos desestabilizadores, esto es generalmente responsabilidad del ingeniero mecánico. El desbalanceo o desequilibrio de un rotor, se define comúnmente como la distribución desigual de peso de un rotor alrededor de su línea central de rotación. El desbalanceo es una de las principales causas de vibración en maquinaria rotativa. Este efecto indeseable, induce fuerzas nocivas en máquina y estructura, lo cual puede provocar falla prematura en rodamientos, acoples, carcasas, estructuras, etc. Además la vibración puede ser transmitida a través de pisos, paredes, ductos, etc., con su consecuente efecto negativo sobre equipos externos, oficinas y personal.
- vii.** Cuando sea posible, la fundación debe planificarse de tal manera que permita una modificación posterior de su frecuencia natural, cuando esto sea necesario, se logra modificando la masa(m) o rigidez(k), debido a que frecuencia natural, está en función de estos parámetros

Desde el punto de vista práctico, los siguientes requerimientos se deberán cumplir:

- i.** El nivel freático debe ubicarse por debajo del plano de la base de la estructura, se recomienda por lo menos igual a una cuarta parte del ancho de

la cimentación. Esto limita la propagación de las vibraciones, debido a que las aguas subterráneas son buenos conductores de las ondas vibratorias.

- ii. La cimentación de máquinas debe estar separada de los componentes de edificios o estructuras adyacentes, mediante juntas de expansión.
- iii. Alguna emisión de vapor o tubería de aire caliente, embebida en la cimentación debe tener recubrimiento aislante.
- iv. La cimentación debe estar protegida de emisiones de aceite de la máquina, con un recubrimiento antiácido o algún tratamiento químico.
- v. La cimentación de la máquina deberá estar en un nivel más bajo que el nivel de cimentaciones de edificios colindantes.

1.3 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO.

Las dimensiones de la cimentación de la máquina son fijadas en concordancia con los requerimientos de operación de la máquina.

Las dimensiones de esquema de la cimentación son generalmente proporcionadas por los fabricantes de máquinas. Si la elección de las dimensiones se asigna a la de diseño, debe revisarse que estas sean, por lo menos, igual que las dimensiones mínimas posibles de la cimentación, para que cumplan con los criterios de diseño seleccionados.

Dadas las dimensiones de la cimentación y las condiciones del sitio en particular, el diseñador debe determinar la frecuencia natural del sistema cimentación-suelo y la amplitud de sus vibraciones en condiciones de funcionamiento. Para el diseño satisfactorio, los requerimientos expuestos en el subcapítulo 1.2 deberán cumplirse. Si los requisitos de diseño no se cumplen, el diseñador puede sugerir alteraciones en las dimensiones de la cimentación proporcionada por los proveedores de la máquina.

1.4 DATOS DE DISEÑO.

Los datos específicos requeridos para el diseño varían de acuerdo al tipo de máquina. Los datos generales requeridos para el diseño de una cimentación para máquina son:

- i. Diagrama o plano dimensional y localización de equipos y accesorios.
- ii. Diagrama de localización y magnitud de las cargas estáticas y dinámicas sobre la cimentación.
- iii. Potencia y velocidades de operación de la máquina.
- iv. Tipo de suelo de cimentación.

1.5 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

Toda cimentación para maquinaria deberá ser diseñada cumpliendo los siguientes criterios generales.

i. Estado límite de falla

a) Estado límite por falla del suelo

El terreno sobre el cual se apoya la cimentación no deberá presentar ningún estado de falla cuando esté sujeto a las solicitaciones estáticas y dinámicas producidas por la cimentación que soporta.

b) Estado límite por falla de la estructura de cimentación

La estructura de cimentación no deberá presentar ningún estado de falla cuando se le someta a las solicitaciones estáticas y dinámicas producidas por la maquinaria que soporta.

ii. Estado límite de servicio

a) Estado límite por vibración de la máquina

Para funcionar correctamente, tanto las máquinas alternantes como las giratorias requieren que, bajo condiciones de operación, no se encuentren sujetas a movimientos excesivos. En la mayoría de los casos, los movimientos máximos aceptables son definidos por el fabricante del equipo, comúnmente estableciendo límites para los desplazamientos en direcciones y puntos específicos. En otros casos, se proporcionan límites superiores para la velocidad y/o aceleración. Vibraciones excesivas en este tipo de máquinas pueden llevar a desgastes heterogéneos y prematuros, que aumentan el costo del mantenimiento y disminuyen la vida útil del equipo.

En el caso de máquinas que producen impacto como los martillos mecánicos, es deseable mantener los desplazamientos de la cimentación misma en valores mínimos, a causa de que a mayores movimientos de la cimentación, menos es la energía del impacto que se aprovecha en el trabajo propio de la máquina, y disminuye en consecuencia su eficiencia. Las máquinas que producen impacto son en general la principal fuente de transmisión de vibraciones al terreno adyacente.

b) Estado límite por resonancia

Cuando alguna de las frecuencias de operación (la fundamental o las armónicas) de una maquinaria coincide con alguna de las frecuencias naturales del sistema cimentación-suelo, se presenta la resonancia. El fenómeno de la resonancia se caracteriza por amplificar los desplazamientos, de ahí que debe evitarse siempre.

c) Estado límite por transmisión de vibraciones

Los movimientos que se presentan en la cimentación de una máquina introducen energía al suelo, la cual se propaga en forma de ondas, las vibraciones de la máquina transmitida al suelo a través de su cimentación bajo condiciones de servicio, no deberán ser molestas a personas que requieran permanecer cerca del equipo, ni deberán afectar el funcionamiento de otras máquinas o estructuras vecinas. Los efectos de estos movimientos pueden estimarse utilizando la figura 1.1.

Cuando la máquina produzca en el suelo vibraciones excesivas, es posible reducir la energía transmitida al suelo, colocando la cimentación sobre una cama de elementos elásticos, por ejemplo un conjunto de resortes. Debe notarse que en estos casos la energía que hubiera sido transmitida al suelo de no haber existido los resortes tiene que ser absorbida por el conjunto máquina-cimentación, por lo que son entonces los movimientos de la máquina misma los que aumentan.

Otra forma en la que es posible disminuir las vibraciones de la cimentación y, por tanto, la energía transmitida al suelo es mediante el uso de un amortiguador dinámico. Un amortiguador dinámico consiste en una pequeña masa y un resorte con valores particulares tales que, al sujetarse a la cimentación, atrae gran parte de la energía de vibración. Lo anterior hace que la pequeña masa tenga movimientos grandes pero logra que se reduzcan los de la cimentación.

Tratándose de aparatos de precisión que pueden ser afectados aun por vibraciones pequeñas, en ocasiones es preferible aislar el aparato del medio en el cual se propagan las vibraciones, en vez de tratar de reducir la intensidad de la fuente que las produce. Lo anterior se puede lograr si el apoyo del aparato sobre el suelo se hace a través de porciones de hule o elastómero que trabaje fundamentalmente a corte.

Como guía a fin de proponer una cimentación que cumpla con los requisitos anteriores para condiciones de servicio, se aplicarán los criterios básicos que siguen:

i. Máquinas de velocidad baja, $\omega_m < 500$ rpm.

Para esta clase de máquina, se debe usar un cimientado de alta frecuencia. La primera frecuencia natural del sistema debe ser 40 por ciento a 50 por ciento mayor que la frecuencia de operación de la máquina.

ii. Máquinas de velocidad intermedia, $500 < \omega_m < 1000$ rpm.

Se podrá usar un cimientado de baja o alta frecuencia, el que sea más práctico. La primera frecuencia natural del sistema debe ser de 40 por ciento a 50 por ciento más pequeña que la frecuencia de excitación en el primer caso, y de 40 por ciento a 50 por ciento mayor que la frecuencia de excitación en el segundo caso.

iii. Máquinas de alta velocidad, $\omega_m > 1000$ rpm.

Para máquinas de alta velocidad, es obligatorio un cimiento de baja frecuencia. La primera frecuencia natural del sistema debe ser de 40 por ciento a 50 por ciento más baja que la frecuencia de operación de la máquina. Durante la puesta en marcha y detención, el sistema pasará a través de varias frecuencias naturales, y las amplitudes del sistema pueden resultar excesivas. Otra desventaja de esta solución es la posibilidad de resonancia en un modo de vibración.

iv. Máquinas de velocidad variable

Para una máquina de velocidad variable, la mejor solución, cuando sea práctico, es un cimiento de alta frecuencia. Si tuviera que usarse un cimiento de baja frecuencia, es importante considerar la posibilidad de resonancia en modos superiores. Esto es crítico puesto que las fuerzas dinámicas serán más grandes por ser proporcionales al cuadrado de la frecuencia de excitación.

En un diseño conservador, se recomienda un análisis de vibración forzada, después de obtener las frecuencias naturales del sistema. Para máquinas de velocidad baja, es suficiente un análisis de vibración libre si la primera frecuencia natural del sistema es cuando menos 50 por ciento más alta que la velocidad de operación de la máquina.

1.6 AMPLITUDES PERMISIBLES.

La amplitud es la separación de un punto específico con respecto a su posición de equilibrio ante una fuerza aplicada. Las amplitudes permisibles son generalmente especificadas por los proveedores de las máquinas. La amplitud permisible de una cimentación de máquina, está en función de la importancia relativa de la máquina y por la sensibilidad a la vibración de las estructuras vecinas.

Los valores permisibles de las amplitudes de vibración no pueden establecerse en función de premisas teóricas. Más bien estos valores se establecen partiendo de datos de operación, a falta de información de parte del fabricante del equipo, o para diseños preliminares, pueden utilizarse los siguientes criterios que limitan los movimientos máximos.

- i.** Para máquinas alternantes o giratorias sobre cimentación de bloque, las amplitudes verticales máximas permisibles en el equipo se muestran en la figura 1.1 Los valores descritos en esta figura indican únicamente límites por “seguridad” y no para una operación totalmente satisfactoria de la máquina.

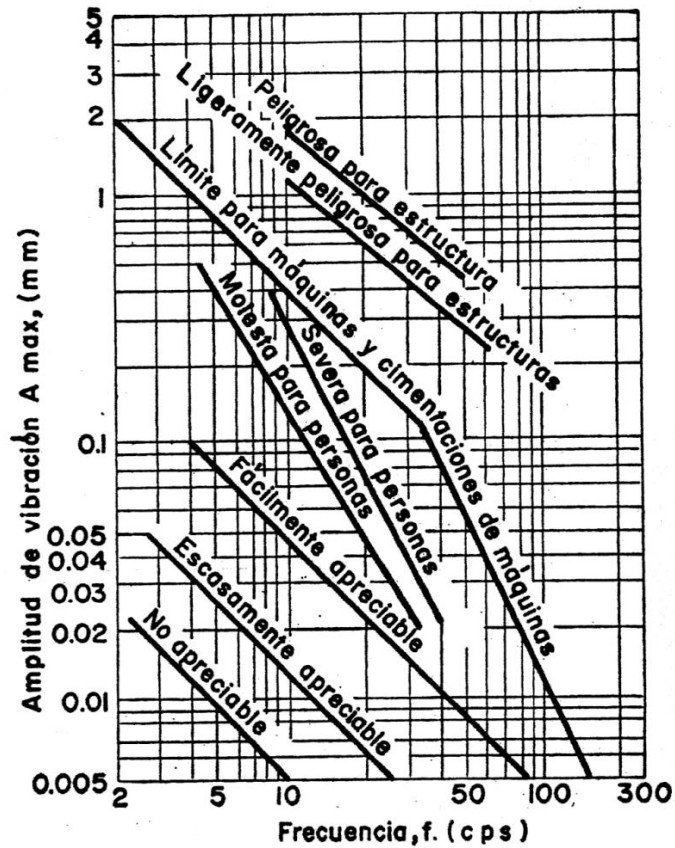


Figura 1.1 Límites permisibles para amplitudes de vibraciones verticales (After Richart, Vibration of Soil and Foundations, Prentice-Hall Inc. New Jersey, USA 1970)

- ii. Para maquinaria con velocidad de operación baja, alrededor de 500 rpm, la amplitud permisible está comprendida entre 0,2 mm a 0,25 mm
- iii. La amplitud vertical permisible en la cimentación de martillos mecánicos sobre cimentación de bloque, cuando en los alrededores no se aceptan vibraciones excesivas, está comprendida entre 1 mm a 1,2 mm
- iv. Para máquinas giratorias de alta velocidad desplantadas sobre cimentaciones tipo pórtico. Barkan, D. D. en el texto Dynamic of Bases and Foundations, propuso las siguientes amplitudes permisibles, medidas en los cojinetes de la máquina (en cojinetes centrales la amplitud permisible es del orden del 75% de la amplitud en cojinetes extremos)

Tabla 1.1 Amplitudes permisibles para máquinas de alta velocidad

Velocidad de operación	Amplitudes permisibles (mm)	
3000 rpm	Vibración vertical	0.02 a 0.03
	Vibración horizontal	0.04 a 0.05

1500 rpm	Vibración vertical	0.04 a 0.06
	Vibración horizontal	0.07 a 0.09
<750 rpm	Vibración vertical	0.08 a 0.12
Velocidad de operación	Tipo de balanceo	Amplitudes permisibles (mm)
3000 rpm	Excelente	0.01
	Bueno	0.02
	Regular	0.03
1500 rpm	Excelente	0.02
	Bueno	0.025
	Regular	0.05

La vibración a alta frecuencia es peligrosa, por este motivo observamos en la tabla que la amplitud permisible es inversamente proporcional a la velocidad de operación

1.7 PRESIONES PERMISIBLES.

1.7.1 SUELO

i. Consideraciones Generales

La naturaleza del terreno presenta una gran importancia, pues los terrenos de diferente calidad transmiten muy desigualmente las vibraciones. Aunque cada terreno no posea su propia frecuencia, siempre existe un intervalo de frecuencia de vibración preferente para cada uno de los mismos. Esta frecuencia aumenta con la resistencia del terreno, disminuyendo por el contrario con el contenido en agua. En el frecuente caso de terrenos que absorban el agua, la frecuencia disminuye con la carga, pues ésta reduce el contenido en agua. Si se excluyen los casos extremos de terrenos de muy débil resistencia (turba, limo, etc.), la frecuencia preferente se sitúa entre 17 a 40 Hz, o sea que se trata de una frecuencia relativamente baja que raramente coincide con la de las máquinas.

La existencia de vibraciones es tan nociva para el terreno como para la estructura que soporta, aun cuando estén alejadas de su frecuencia propia. Un terreno sin compactar va asentándose, y si es húmedo tiende hacia la consolidación hundiéndose los elementos sólidos, mientras que el agua fluye hacia la superficie disminuyendo la capacidad portante.

En consecuencia, el terreno debe estar seco, compactado y homogéneo, se recomienda que el nivel freático se encuentre por debajo de la cimentación de una máquina por lo menos a una profundidad mínima igual a una cuarta parte de la mayor dimensión de la cimentación. En caso contrario, es preciso recurrir a cimentaciones profundas, pero jamás a pilotes flotantes. En ciertos casos se puede también aumentar la resistencia del terreno y secarlo definitivamente mediante un silicatado o inyecciones de cemento.

En cuanto a la estratificación del suelo, esta ha sido estudiada por varios investigadores, que han llegado a la conclusión de que la frecuencia no se ve afectada cuando la cimentación descansa sobre un estrato de espesor no menor de tres veces el ancho de la cimentación. Para estratos de menor espesor se afecta el amortiguamiento, y la frecuencia natural es mayor, ya que en este caso no hay radiación importante de energía del bulbo de presiones.

La presión de apoyo en el suelo debería ser evaluada por una adecuada exploración del subsuelo y ensayos en concordancia con: IS 1892 y IS 1904 ó especificaciones equivalentes.

ii. Presión permisible en función de la velocidad de propagación de las ondas

La velocidad de propagación de las ondas produce información útil sobre la capacidad de carga relativa del suelo. Cuanto mayor sea la velocidad de propagación de las ondas, mayor es la capacidad de carga del suelo. Esto corresponde, sin embargo, sólo aproximadamente a las condiciones reales, como se muestra en la tabla 1.2, la velocidad de la onda debe ser considerado preferentemente como característico del módulo de elasticidad del suelo, y sólo en el supuesto de que el suelo es un material isotrópico.

Tabla 1.2 Relaciones entre los valores aproximados de la velocidad de propagación de las ondas y la tensión admisible estática

Tipo de Suelo	V m/s	σ_{st} kg/cm ²
Tres metros de turba sobre arena	80	0.0
Arena limosa	110	1.0
Arena húmeda	140	2.0
Arena seca	160	2.0
Arena limosa sobre arcilla	170	2.5
Grava gruesa	180	2.5
Arcillas aluviales	190	3.0
Arena Homogénea	220	4.0
Grava bajo cuatro metros de arena	330	4.5

Grava gruesa compacta	420	4.5
-----------------------	-----	-----

Para determinar la velocidad de propagación de la onda, se tiene la fórmula siguiente:

$$V = K_{sl} \sqrt{\frac{G}{\gamma}} \quad [m/s] \quad (1.1)$$

$$G = \frac{\nu}{2(\nu + 1)} E \quad (1.2)$$

Donde: K_{sl} = Constante dependiendo de la onda

G = Coeficiente de resistencia al corte del suelo

E = Modulo de elasticidad del suelo

γ = Peso específico del suelo

ν = Modulo de Poisson

Los siguiente valores pueden ser considerados para valorar el modulo de Poisson

Tabla 1.3 Modulo de Poisson recomendado

Tipo de Suelo	Modulo de Poisson (ν)
Suelos cohesivos	0.4
Suelos no cohesivos	0.3
Arcilla	0.5
Arena	0.3 a 0.35
Roca	0.15 a 0.25

Para el peso específico de los suelos se puede usar como referencia la tabla 1.4:

Tabla 1.4 Peso Específico para varios tipos de suelos

Tipo de Suelo	Peso específico (γ) kg/m ³
Roca dura	2800 a 3000
Esquistos o roca blanda	1800 a 2000
Grava con arena compactada	2000
Arena fina seca	1700
Arena arcillosa mediana y densa	1900

Arcilla blanda	1700
Limos	1700
Fango, lodo o turba inorgánica	900

Para el modulo de elasticidad se tiene:

Tabla 1.5 Modulo de Elasticidad para varios tipos de suelos

Tipo de Suelo	Modulo de Elasticidad (E) kg/cm ²
Plástica, Arena arcillosa con algunos sedimentos	310
Arena arcillosa, saturada	440
Arena arcillosa, densa	2950
Arena húmeda, de tamaño mediano	540
Arena gris con estrato de grava	540
Arena fina, saturada	850
Arena de tamaño mediano	830
Marga	1000 a 1300
Marga-semejante a arena arcillosa	1200

iii. Presión permisible para cargas dinámicas aplicando un factor de reducción

El esfuerzo en el suelo debido a la cimentación de la máquina depende no sólo del desplazamiento máximo producido por las vibraciones, determinando la amplitud y la frecuencia, sino también de la presión estática a la cual está sometido el suelo. El asentamiento provocado por las vibraciones incrementa con la presión estática. *Por lo tanto, la presión admisible debe ser menor que la permitida para las cargas estáticas.* El factor de reducción depende de la aceleración de las vibraciones. Así, por ejemplo, para las cimentaciones de martillo, donde la aceleración de vibración es muy importante – puede ser de hasta 1.5 g – un factor de reducción de 0.4 a 0.5 debe ser tomado. Para máquinas de alta velocidad (por encima de 3000 rpm), donde la amplitud de las vibraciones es sólo unas micras (1 micra = 0.001 mm), un factor de reducción de 0.8 es suficiente. Un factor de reducción no siempre es necesario, se puede tomar un valor equivalente a la unidad cuando la aceleración de las vibraciones es inferior a 0.2 g. Tales vibraciones son producidas por las máquinas de velocidad baja.

El uso de un factor de reducción se indica también cuando el suelo de apoyo de la cimentación de la máquina está sujeto a vibraciones distintas a las que trasmite la propia fundación, la ampliación del factor de reducción debe ser tomado de acuerdo a la distancia de la fuente de vibraciones.

Para las vibraciones con una aceleración considerable (superior a 2 g) el esfuerzo admisible, debe reducirse en la proporción de 0.2/Av, La tensión admisible para el suelo es en consecuencia.

$$\sigma_d = \frac{0.2}{A_v} \sigma_{st} \quad (1.3)$$

Donde: A_v = Aceleración de las vibraciones, expresada como proporción de la gravedad

σ_{st} = Esfuerzo admisible para cargas estáticas, los valores referenciales pueden ser tomados de la tabla 1.6

Tabla 1.6 Esfuerzo admisible referencial para varios tipos de suelos
bajo cargas estáticas

No	Tipo de Suelo	σ_{st} [kg/cm ²]
I	Suelos de baja resistencia (arcillas y arcillas limosas con área en estado plástico. Arenas arcillas y arenas limosas; suelos de la categoría 2a y 3a con extractos de limos orgánicos y turbas)	< 1.5
II	Suelos de resistencia media (arcillas y arcillas limosas con arena, con una consistencia cercana al límite plástico; arena)	1.5 - 3.5
III	Suelos de alta resistencia (arcillas y arcillas limosas con arena de elevada consistencia, gravas y arenas con grava loes y suelos con loes)	3.5 - 5
IV	Rocas	> 5

1.7.2 OTROS MATERIALES

Las presiones permisibles sobre otros materiales elásticos como el fieltro, corcho y el caucho son proporcionados generalmente por las empresas de fabricación de estos materiales, en consecuencia no se sugieren valores específicos..

1.8 TRASMISIÓN DE VIBRACIONES Y COMO DISMINUIRLAS

Las vibraciones que una máquina en operación induce a la cimentación son transmitidas al suelo en forma de ondas que se propagan a su alrededor. La magnitud de los movimientos de las zonas vecinas a la cimentación depende de la magnitud de las vibraciones de la cimentación, de su forma de apoyo y de las características del suelo.

Entre los tipos de movimientos que se presentan en el terreno, los movimientos verticales de la superficie producidos por vibraciones verticales de la cimentación resultan ser los más importantes.

En el caso de macizos de máquinas es muy importante no arriesgarse a ampliar las vibraciones al principio, pues luego sería muy difícil filtrarla, además la cimentación debe tener una frecuencia propia tan diferente como sea posible de las vibraciones que son de temer, esto debe cumplir no solamente la cimentación, sino también el conjunto de la obra y cada uno de sus elementos.

En ocasiones el problema de las vibraciones continua, debido a que estas condiciones, son necesarias pero no suficientes para evitar inconvenientes. La solución consiste en intercalar entre el origen de las vibraciones y los edificios a aislar un dispositivo elástico absorbente, cuya frecuencia propia sea netamente diferente de la de las vibraciones a filtrar (como mínimo el 30% aproximadamente). El principio más antiguo consiste en intercalar resortes o muelles entre el órgano generador de las vibraciones y su soporte. Pero este método presenta un cierto número de inconvenientes para un soporte de máquina. La gran elasticidad de estos dispositivos es molesta para las máquinas que deben ser acopladas a tuberías. Tampoco es posible su utilización en máquinas que operan por choques, como las prensas o los martillos pilones, ya que no se obtiene un forjado o una impresión correcta. Además la rotura de un solo resorte puede tener consecuencias perjudiciales, y deben tener libre acceso para su mantenimiento. Finalmente los resortes no absorben en absoluto el ruido.

Los sistemas de resorte pueden ser mejorados mediante sistemas amortiguadores, por ejemplo, el aceite, pero se llega así a soluciones complejas, sin eliminar totalmente los inconvenientes de los resortes.

Otro método consiste en la utilización de un acolchado de fieltro, de lana mineral, fibra de vidrio u otros materiales aislantes, que absorben mucho los ruidos. Efectivamente, estos materiales aíslan eficazmente los sonidos emitidos en un espacio cerrado. Pero su ausencia de elasticidad los vuelve poco eficaces, cuando se trata de filtrar vibraciones de notable amplitud, siendo transmitidos directamente, lo mismo ocurre con el cartón asfáltico.

El corcho aglomerado parece ser en la actualidad el material cuya utilización ha sido más generalizada. Es elástico y aislante, y además prácticamente imputrescible, inatacable por el agua y por el aceite.

1.9 RESONANCIA Y SUS EFECTOS

Para ilustrar algunos de los aspectos más relevantes del fenómeno de la resonancia, es conveniente desarrollar el análisis de un sistema sencillo como es el de una masa m ligada a un resorte de constante elástica K , ya que este caso, pese a su sencillez ilustra conceptos básicos del fenómeno que se presentan en casos más complejos.

Para describir la dinámica de una masa acoplada a un resorte se parte de la 2ª Ley de Newton

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -Ky \quad (1.4)$$

Se propone como solución para su posición en función del tiempo un movimiento armónico simple

$$y(t) = a_d \cos \omega_0 t \quad (1.5)$$

Donde
ad amplitud

Al sustituir esta función en la ecuación 1.4 se tiene que la frecuencia angular con que en el estado estacionario se moverá la masa es

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1.6)$$

Es de hacer notar que la frecuencia angular no depende de la amplitud sino solo de la constante K del resorte y de la masa, por tanto, este sistema tiene una sola frecuencia que “adopta” en forma espontánea en cuanto se le deja oscilar libremente, por ello se le denomina “frecuencia natural del sistema”.

Se analiza ahora el caso de un oscilador forzado, para ello se aplica sobre la masa otra fuerza más la cual tendrá un carácter periódico con una amplitud F , frecuencia angular ω_m y actuando en la dirección del eje del resorte, tal como se observa en la figura 1.2

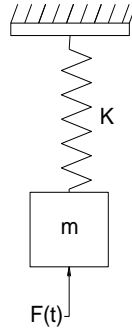


Figura 1.2 Resorte con oscilación forzada.

Si la fuerza externa periódica tiene la forma $F = P_0 \cos \omega_m t$, entonces la fuerza total que actúa sobre la masa m es

$$F = -Ky + P_0 \cos \omega_m t \quad (1.7)$$

Ahora la segunda ley de Newton toma la forma

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -Ky + P_0 \cos \omega_m t \quad (1.8)$$

Si al igual que el caso anterior se propone como solución de la anterior ecuación $y = a_d \cos \omega_m t$, con ω_m la frecuencia angular de la fuerza externa, al sustituir este valor de y , así como de su segunda derivada respecto al tiempo se tiene que

$$-m a_d \omega_m^2 \cos \omega_m t = -K a_d \cos \omega_m t + P_0 \cos \omega_m t \quad (1.9)$$

y al despejar el valor a_d de la amplitud de la oscilación ésta tiene el valor

$$a_d = \left[\frac{P_0}{K - m \omega_m^2} \right] \quad (1.10)$$

Pero de acuerdo a (1.6) $K = m \omega_n^2$, así es que sustituyendo este valor en la anterior relación se obtiene finalmente que

$$a_d = \frac{P_0}{m [\omega_n^2 - \omega_m^2]} \quad (1.11)$$

Se observa que cuando ω_m tiende a ω_n , el valor absoluto de la amplitud a_d tiende a infinito. En esta situación en que el sistema elástico tiende a oscilar con una máxima amplitud se dice que el sistema entra en un estado de Resonancia.

Si nos aproximamos a la frecuencia natural con valores mayores que ω_n . El valor de la amplitud tendrá valores negativos; para evitar este comportamiento anómalo se introduce en la solución propuesta un ángulo de fase α

$$y = a_d \cos(\omega_m t + \alpha) \quad (1.12)$$

En consecuencia α será igual a 0 para valores de ω_m menores que ω_n , y π para valores mayores.

Para que este comportamiento sea un modelo más realista se toma en cuenta la fricción. Que es proporcional a la velocidad de la masa, entonces la segunda ley de Newton que es:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -Ky + P_0 \cos \omega_m t - b \frac{dy}{dt} \quad (1.13)$$

siendo b una constante de proporcionalidad, la amplitud resultante es

$$a_d = \frac{P_0 / m}{\left[(\omega_n^2 - \omega_m^2) + \left(\frac{b}{m} \omega_m \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (1.14)$$

Aunque ahora la amplitud máxima ya no ocurre cuando la frecuencia de la fuerza externa es exactamente la frecuencia natural ω_n , para muchos problemas de interés la diferencia no es considerable.

El fenómeno de la resonancia requiere por tanto:

- a. De un sistema elástico que presente frecuencias naturales de vibración,
- b. De una fuerza externa de tipo periódico que actúe sobre el sistema elástico,
- c. De una coincidencia entre ambos tipos de frecuencia.

En una máquina que produce un espectro ancho de energía de vibración, la resonancia se podrá ver en el espectro, como un pico constante aunque varíe la velocidad de la máquina. El pico puede ser agudo o puede ser ancho, dependiendo de la cantidad de amortiguamiento que tenga la estructura en la frecuencia en cuestión.

Para evitar estados de resonancia, se define la relación de frecuencias η ,

$$\eta = \frac{\omega_m}{\omega_n} \quad (1.15)$$

Es deseable que en el diseño de estructuras sometidas a cargas dinámicas, la relación de frecuencia este alejado de la unidad. De acuerdo al IS 2974 (Cap.I), el rango de la relación de frecuencia está dado por la siguiente inecuación.

$$1.4 < \eta < 0.5 \quad (1.16)$$

Bajo ninguna circunstancia se debe opera una máquina a la frecuencia de resonancia.

CAPÍTULO II

TIPOS DE CIMENTACIONES PARA EQUIPO DINÁMICO.

2.1. CLASIFICACIÓN DE EQUIPO DINÁMICO

Una máquina es un conjunto de [piezas](#) o elementos móviles y fijos, cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar [energía](#) o realizar un [trabajo](#). Pueden realizarse diferentes [clasificaciones](#) de equipo dinámico dependiendo del [aspecto](#) bajo el cual se las considere. Atendiendo a nuestros intereses se pueden realizar las siguientes clasificaciones:

- En función de la velocidad de operación
- En función de la medición y evaluación de vibraciones
- Basadas en el criterio de diseño de sus fundaciones

2.1.1. EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN

Basadas en su frecuencia de operación, las máquinas pueden ser clasificadas en tres categorías.

- | | | |
|-------------|----------------------------|----------------|
| i. | Frecuencias bajas a medias | 0 – 500 rpm |
| ii. | Frecuencias medias a altas | 500 – 1000 rpm |
| iii. | Frecuencias muy altas | > 1000 rpm |

El grupo i, se compone de grandes motores alternativos, compresores y ventiladores de gran tamaño. Los motores alternativos suelen operar a frecuencias que

van de 50-250 rpm. Para este grupo, las fundaciones de tipo bloque con gran superficie de contacto con el suelo son adoptadas generalmente.

El grupo ii, consta de motores alternativos de tamaño medio, tales como motores a diesel y de gas. Fundaciones tipo bloque descansando sobre resortes o adecuados camas elásticas son generalmente sugeridos para este grupo, a fin de mantener las frecuencias naturales de la fundación considerablemente por debajo de la frecuencia de operación.

El grupo iii, incluye los motores de combustión interna a gran velocidad, motores eléctricos y equipos turbogeneradores. Donde son usadas cimentaciones de bloque macizo. Es deseable que exista poco contacto con la superficie y adecuada aislación con camas elásticas, para reducir las frecuencias naturales. Turbo maquinaria requiere fundaciones tipo pórtico, en las cuales es necesario acomodar equipo auxiliar entre las columnas.

2.1.2. EN FUNCIÓN DE LA MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE VIBRACIONES

- i.** Máquinas de movimiento alternativo con componentes tanto rotativos como alternativos (motores a diesel y ciertos tipos de bombas y compresores). En estos casos, la vibración se mide normalmente en la estructura principal de la máquina a bajas frecuencias
- ii.** Máquinas rotativas con rotores rígidos (ciertos tipos de motores eléctricos, bombas mono-etapa y bombas de baja velocidad). La vibración habitualmente se mide en la estructura principal de la máquina (tapas de cojinetes o soportes) donde los niveles de vibración resultan indicativos de las fuerzas de excitación generadas en el rotor como consecuencia de desequilibrios, rozamientos, deformaciones térmicas, vórtices y otros tipos de excitación.
- iii.** Máquinas rotativas con rotores flexibles (grandes generadores de turbina de vapor, bombas multi-etapa y compresores). La máquina puede vibrar de acuerdo con más de un modo de vibración según pasa por una o más de sus velocidades críticas hasta alcanzar la velocidad correspondiente al régimen de servicio. En este tipo de máquinas, la medida de la amplitud de vibración en un elemento de la estructura puede no ser indicativa del estado vibracional del rotor. Por ejemplo, un rotor flexible puede experimentar desplazamientos en vibración de gran amplitud que den lugar a un rápido fallo de la máquina, aunque el nivel de vibración medido en la tapa del cojinete resulte ser muy pequeño. En estos casos, por tanto, puede resultar esencial medir directamente la vibración en el eje

- iv. Máquinas rotativas con rotores semirígidos (turbinas de vapor de baja presión, compresores de flujo axial y ventiladores). En este tipo de máquinas, el tipo de rotor flexible que les caracteriza permite que la medida de amplitud de vibración en la tapa del cojinete resulte indicativa de la vibración del eje.

2.1.3. BASADAS EN EL CRITERIO DE DISEÑO DE SUS FUNDACIONES

i. Las que producen fuerzas de impacto

Se llama máquinas de impacto a aquellas que producen fuerzas de muy corta duración en comparación con los intervalos a los que se repiten. En estas máquinas se puede considerar que los efectos de un pulso ya han cesado cuando se presenta el siguiente, por lo que sólo requieren del análisis para un impacto. Como ejemplo podemos citar los martillos mecánicos, prensas, taladros, etc.

Las máquinas de impacto más importantes son los martillos mecánicos. La acción del martillo sobre el yunque podrá ser descrita por la forma del pulso que define la fuerza en el tiempo. La descripción del pulso se solicitará al fabricante del equipo.

ii. Las que producen fuerzas periódicas

Dentro de las máquinas que producen fuerzas periódicas se incluyen las máquinas rotativas y las máquinas alternantes. Las solicitaciones producidas por máquinas rotatorias deberán calcularse tomando en cuenta posibles desbalances debidos al desgaste de piezas de la maquinaria. En las máquinas alternantes deberán tomarse en cuenta las fuerzas primaria y secundaria. Para ambos tipos de máquinas, la descripción de las solicitaciones deberá tratarse de obtener directamente del fabricante del equipo. Como ejemplo podemos citar los compresores.

iii. Maquinaria de velocidad alta

Máquinas de alta velocidad, a las que se refiere colectivamente como "turbo-máquinas", pueden ser clasificadas según su finalidad, de la forma siguiente:

- a) Los Turbo generadores que producen energía eléctrica
- b) Turbo compresores rotativos y turbo-ventiladores que entregan aire comprimido u otros gases
- c) Turbo bombas rotativas

Las turbinas y equipos auxiliares tienen, en la mayoría de los casos, un eje común y por lo tanto la misma velocidad. A veces, sin embargo, un engranaje de reducción se ha instalado entre la turbina y el equipo auxiliar. Por otra parte, algunos

engranajes están diseñados para incrementar la velocidad, como por ejemplo, para compresores con accionamiento eléctrico. La velocidad de la máquina montada sobre un eje común oscila en general, desde 1500 hasta 1800 rpm.

La velocidad de los ventiladores rotativos y bombas pueden depender de la demanda, variando entre límites bastante amplios. Los ventiladores, por ejemplo, pueden tener velocidades de 2.000 hasta 4.000 rpm.

iv. Otras máquinas misceláneas.

Ciertamente las máquinas que inducen muy pequeñas fuerzas dinámicas, pueden ser colocadas directamente sobre el piso sin cimentaciones especiales.

2.2. TIPOS DE CIMENTACIONES.

Atendiendo a su rigidez, las estructuras de cimentación para maquinaria se pueden clasificar en cuatro tipos.

2.2.1. TIPO BLOQUE

Consiste en un bloque macizo o con huecos generalmente de hormigón reforzado que soporta a la máquina en su parte superior, figura 2.1 Para fines de análisis puede ser considerado como un cuerpo rígido.

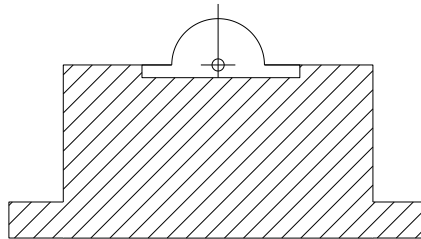


Figura 2.1 Cimentación tipo bloque

i. Hipótesis básicas para el análisis de cimentaciones tipo bloque para máquinas de impacto

Se supondrá que el yunque y el bloque son cuerpos rígidos y que el yunque se ha colocado sobre el bloque de tal manera que el centro de masas del conjunto yunque-bloque se aloja sobre la vertical que pasa por el centro de rigidez vertical de la cimentación. Se supondrá también que la caída del martillo es a lo largo de esta vertical, con lo que no se presentará excentricidad en el choque y por lo tanto no habrá acoplamiento de las vibraciones verticales con ningún otro tipo de vibración. Deberán tomarse las precauciones necesarias para que la máquina se construya realmente satisfaciendo las hipótesis anteriores. En estas condiciones bastará el análisis de las vibraciones verticales.

Se supondrá también que el bloque descansa sobre el suelo o sobre pilotes y que, por tanto, el apoyo queda representado por un conjunto de resortes y amortiguadores equivalentes.

ii. Hipótesis básicas para el análisis de cimentaciones tipo bloque para máquinas de fuerzas periódicas

Se supondrá que la máquina y el bloque se encuentran rígidamente unidos. Para modelar una cimentación de este tipo podrá aceptarse que el sistema máquina-bloque forma un solo cuerpo rígido y que el bloque descansa sobre resortes y sobre amortiguadores de tipo viscoso. Se supondrá, además, que el centro de masa del conjunto bloque-máquina se aloja sobre la vertical que contiene al centro de rigidez vertical y horizontal del suelo

2.2.2. TIPO CAJA

Consiste en un bloque hueco de hormigón armado que soporta a la máquina en su parte superior, figura 2.2

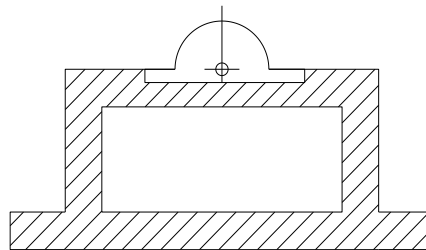


Figura 2.2 Cimentación tipo caja

2.2.3. TIPO MURO

Consiste en un par de muros de hormigón armado que aloja a la máquina en su parte superior, figura 2.3

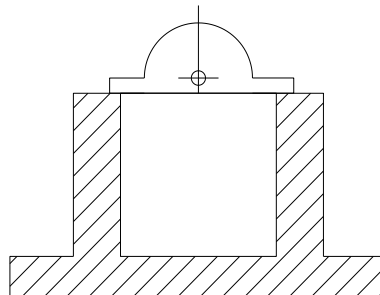


Figura 2.3 Cimentación tipo muro

2.2.4. TIPO PÓRTICO

En general, una cimentación de este tipo está formada por una pesada losa de cimentación apoyada en el terreno o en pilotes, en la cual se apoyan una serie de columnas. Las columnas están unidas en sus extremos superiores por vigas transversales y longitudinales formando pórticos en ambas direcciones. Sobre las vigas hay una losa con huecos que soporta la turbina y el generador. El condensador generalmente va abajo de la turbina, apoyado sobre la losa de cimentación, figura 2.4

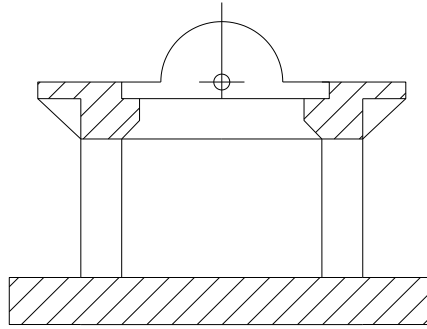


Figura 2.4 Cimentación tipo pórtico

2.3. CIMENTACIÓN TIPO PÓRTICO

2.3.1. USOS

Las cimentaciones tipo pórtico se usan para alojar máquinas de alta velocidad, generalmente llamadas turbo máquinas, las cuales fueron clasificadas en el subcapítulo 2.1.3 numeral iii, sin duda, de este grupo los más comunes son los turbogeneradores, en consecuencia se realiza una pequeña explicación de su función y tecnología.

i. Función y tecnología de los Turbogeneradores

Los turbogeneradores son parte fundamental de una central termoeléctrica, que es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de calor. Este calor puede obtenerse tanto de combustibles fósiles ([petróleo](#), [gas natural](#) o [carbón](#)) como de la [fisión nuclear](#) del [uranio](#) u otro [combustible nuclear](#), en su forma más clásica, las centrales termoeléctricas consisten en una [caldera](#) en la que se quema el combustible para generar calor que se transfiere a unos tubos por donde circula agua, la cual se evapora. El vapor obtenido, a alta presión y temperatura, se expande a continuación en una [turbina de vapor](#), cuyo movimiento impulsa un alternador que genera la electricidad. Luego el vapor es enfriado en un [Condensador](#) donde circula por tubos agua fría de un caudal abierto de un río o por [torre de refrigeración](#).

Un turbogenerador consta de una turbina y un generador eléctrico a los cuales, en caso necesario, un condensador es adjuntado, figura 2.5

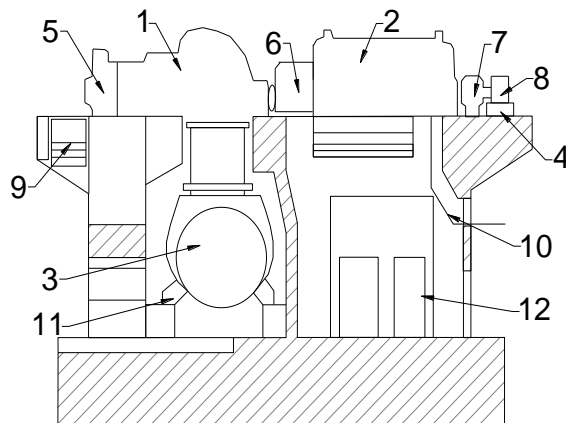


Figura 2.5 Disposición general del equipo de un turbogenerador

1-turbina, 2-generator, 3-condensador, 4-soporte, 5-primer cojinete de la turbina, 6-cojinete central de la turbina, 7-cojinete del generador, 8-encendedor, 9-tanque de combustible, 10-salida del generador, 11-salida del condensador, 12-enfriador de aire circular.

La energía térmica de vapor generada en la caldera y pasando por los canales guías se convierte en energía cinética, tras lo cual se dirige a las aspas de la turbina figura 2.6. El rotor de la turbina, está junto y conectado con el generador, por lo tanto se pone en rotación y posteriormente genera electricidad.



Figura 2.6 Turbina de vapor

El vapor se mueve a gran velocidad a través de los pasajes formados por las aspas se ve obligado a cambiar su dirección original y, al mismo tiempo, su velocidad. Así, el impulso (el producto de la masa y velocidad) del vapor que pasa a través de la turbina se cambia y este cambio ejerce un empuje en los impulsores que se establecen en la rotación. Mientras que en los motores alternativos de vapor, la conversión del calor en trabajo se realiza en una etapa (el vapor dirigido hacia el cilindro de la máquina de vapor impulsa el pistón y el trabajo directo se hace), Las turbinas convierten la

energía térmica en trabajo en varias etapas. A fin de garantizar una conversión económica de la energía térmica de vapor, se usa una serie de aspas. Cada parte contiene todos los elementos estructurales necesarios para transformar energía calorífica en energía cinética y la energía cinética en trabajo mecánico. Los elementos estructurales por el cual la energía calorífica se convierte en energía cinética se denominan canales de guía, mientras que los elementos por el cual la energía cinética se transforma en trabajo mecánico son los conjuntos de aspas. Ambos grupos de elementos en conjunto, constituyen una etapa.

Las turbinas diseñadas para convertir la energía calorífica en energía cinética sólo en el canal de guía son las turbinas acción. Si el proceso anterior se lleva a cabo en parte en el canal de guía y en parte en las aspas, la turbina se llama una turbina de reacción. La forma del canal guía fue desarrollada primero por Laval en 1883.

Así, en la turbina de acción la rotación de las aspas convierte solo la energía cinética en el trabajo, pero ningún cambio se produce en la presión y el volumen del vapor. En una turbina de reacción el vapor se somete a ciertos cambios en los canales guía, como consecuencia de la expansión.

Las turbinas de vapor se dividen en tres tipos: a contrapresión, a extracción y a condensación.

En las turbinas de contrapresión la principal característica es que, el vapor cuando sale de la turbina, se envía directamente al proceso sin necesidad de un condensador y de un equipo periférico, como son torres de enfriamiento.

En la turbina de extracción/condensación, una parte del vapor puede extraerse en uno o varios puntos de la turbina antes de la salida al condensador, obteniendo así, vapor a proceso a varias presiones, mientras que el resto del vapor se expande hasta la salida al condensador a una presión, generalmente, inferior a la presión atmosférica.

Con efecto de ilustrar el espacio requerido, se muestra las dimensiones principales, típicas de los equipos de turbogeneradores, dependiendo de su capacidad.

Los equipos de generación de 1 a 50 MW de capacidad, son usualmente de 8 a 20 m de longitud. Los equipos de 100 a 150 MW tienen una longitud alrededor de 25 a 30 m. El ancho requerido varía entre 3 a 6 m, el tope generalmente es 7 m.

La distancia vertical desde la base hasta el tope, para turbinas de hasta 25 MW de capacidad, es de alrededor de 4.5 a 7 metros. Para capacidades más altas este valor puede ser incrementado a 10 m

Para el diseño, un espacio sin obstruir de cerca de 3 a 5 m debe siempre dejarse en el lado del generador para la retirar y dar mantenimiento a la bobina.

2.3.2. VENTAJAS

Los turbogeneradores pueden arreglarse más convenientemente en una cimentación estructurada con pórticos que en las otras cimentaciones aquí mencionadas, debido a que se encuentran las siguientes ventajas.

- i. El ahorro de espacio y de materiales
- ii. Con una estructura tipo pórtico, se puede lograr un arreglo estructural más económico debido a que el diseño y localización de sus elementos, columnas y vigas, pueden siempre ser ajustadas a las cargas actuantes.
- iii. La localización de los condensadores, redes de tuberías, lumbreras, alumbrado eléctrico puede llevarse a cabo fácilmente a través de la propia estructura.
- iv. Permite el acceso e inspección a las diversas partes de la máquina.
- v. Facilita el servicio y mantenimiento del equipo.
- vi. En relación con el comportamiento estructural, resulta que los hundimientos diferenciales en las cimentaciones masivas, debido a su extremada rigidez a la flexión, frecuentemente dan lugar a agrietamientos que no son usuales en una cimentación de marcos correctamente reforzada. (Para un cierto hundimiento diferencial, el daño es mayor mientras más grande es la rigidez de una estructura)
- vii. El efecto de los asentamientos producidos por la sobrecarga, se disminuye en las cimentaciones estructuradas, como consecuencia del menor peso de la cimentación y por la compensación parcial implícita en la excavación que se realiza para localizarla.
- viii. En las cimentaciones tipo pórtico puede realizarse un análisis más exacto.

2.3.3. TIPOS DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO

Los tipos más comunes de cimentaciones tipo pórtico deben analizarse junto con sus turbo-máquinas ya que están en función de estas.

Para conocer las características de las cimentaciones y los datos de salida de la turbina, se puede utilizar el sistema de notaciones utilizado en la URSS, que es el siguiente:

- **La primera letra del símbolo denota la presión de vapor**
H = presión alta
M = presión media
L = presión baja (a base de vapor de escape)
- **La siguiente letra indica el tipo de turbina**
C = turbina condensadora o sin escape libre
H = turbina de extracción para fines de calefacción

I = turbina de extracción para fines industriales

B = turbina de contra presión

- **Los números denotan la capacidad de la turbina por 1000 kW.**
Por ejemplo 25 = 25,000 kW
- **El tipo de cimentación se representa después de las cifras por las letras siguientes**
R = cimentación plana (balsa o poco profunda)
B = cimentación tipo bloque
W = cimentación tipo muro
F = cimentación tipo pórtico
- **Los materiales utilizados para la construcción de la cimentación, se denota por las letras siguientes:**
Co = hormigón
Rc = hormigón armado
St = acero
Br = ladrillo

Por ejemplo, MC-25-FRC denota una presión media, turbina condensadora de 25,000 kW de capacidad, con la cimentación tipo pórtico de hormigón armado. Para los conjuntos de máquinas combinadas, los elementos individuales de la combinación serán mencionados. (No se da indicación en los casos en que algunos de los datos de la turbina no estén disponibles).

Cuando se habla de los tipos estructurales de cimentaciones de turbo-generador, debemos tratar con las fundaciones que constan de estructura de acero y las que comprenden una combinación de acero y hormigón armado. La parte subterránea de los dos tipos son generalmente hechas de hormigón armado. Los marcos de acero tienen las siguientes ventajas:

- La estructura puede ser armada en el taller, entonces el tiempo de montaje y el tiempo de construcción se pueden reducir con ello. Esta ventaja puede ser utilizada incluso mejor si en la planta de fabricación de las turbinas fueran fabricados los elementos de acero para la fundación y así entregarlos con las máquinas.
- Los pórticos de acero son de dimensiones mínimas, por lo tanto el espacio disponible para los equipos mecánicos es mayor
- Por último, la estructura de acero si es necesario se puede modificar fácilmente, reconstruir o reforzar.

- La frecuencia natural se puede determinar con un grado bastante alto de precisión, el módulo de elasticidad es constante y las condiciones de fijación conocidas.
- Las frecuencias naturales (incluso los armónicos primero) son más bajos - tanto en los planos horizontal y vertical - que la velocidad de la máquina, lo que significa que toda la estructura, será más flexible y de pequeña masa. Se exige que el cálculo de la frecuencia natural sea muy preciso, y debe incluir no sólo las vibraciones de base, los armónicos también.

Referente a las desventajas de los marcos de acero tenemos:

- En cuanto a las vibraciones, las estructuras de acero no se comparan muy favorablemente con las de hormigón armado. Sin duda, un peligro creciente con estructuras de acero, es la resonancia y este es uno de los problemas vitales que enfrenta el ingeniero de diseño.
- Otra desventaja de estas fundaciones es su creciente demanda de acero, en comparación con cimientos de hormigón reforzado. Los materiales no se encuentran comúnmente en el mercado local, los perfiles a utilizarse deben ser importados, consecuente estas estructuras son más costosas que las de hormigón armado.
- Aunque la resistencia al fuego de la estructura de acero es menor que la del hormigón armado, esto no debe ser considerado como una desventaja, ya que en condiciones normales de operación, el rápido equilibrio del diferencial de temperatura y una distribución uniforme de la temperatura prácticamente eliminan la posibilidad de acumulación de esfuerzos en la estructura.
- Debe considerarse también que el repetido efecto de los esfuerzos dinámicos puede ser mucho más nocivo para los materiales que el de un esfuerzo estático aplicado de manera continua.
- Este es el fenómeno de fatiga que puede conducir, por ejemplo en el caso de el acero, a una rotura después de algunos millones de ciclos, aunque el esfuerzo por ciclo sea netamente inferior al límite elástico.

Así, pues, en el caso de cimentaciones para turbogeneradores de gran capacidad deberá utilizarse siempre el hormigón armado, que posee una gran resistencia a la flexión y da garantías contra la rotura.

A continuación se presenta los tipos más frecuentemente utilizados:

i. Tipo 1

Esta es una de las formas más simples de las fundaciones tipo pórtico. El condensador se erige en sentido transversal y sólo los dos pares de columnas laterales no tienen conexión de vigas transversales. Las conexiones intermedias se consiguen por medio de muros transversales. La plataforma en voladizo aumenta la rigidez de la construcción en una dirección horizontal. El conjunto es de $6,000 \text{ kW} = 6 \text{ MW}$ de capacidad a una velocidad de $3,000 \text{ rpm}$

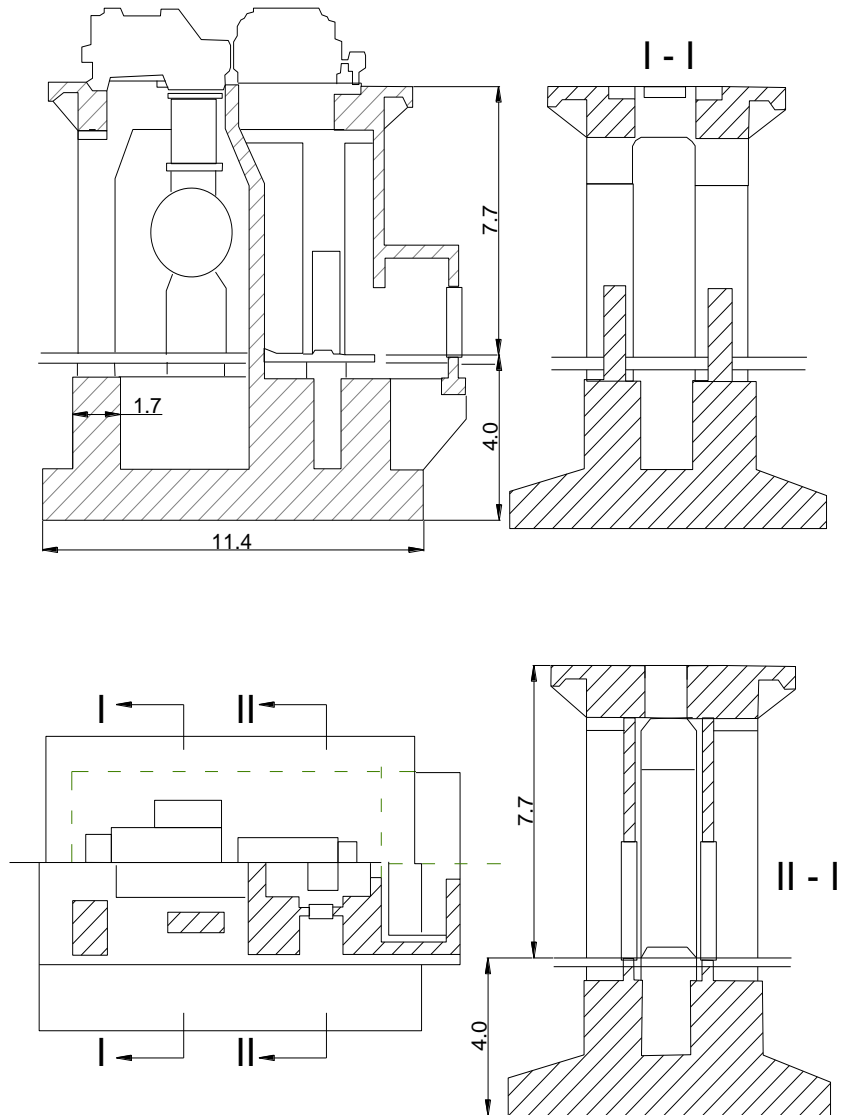


Figura 2.7 Turbogenerador con cimentación tipo pórtico, $6,000 \text{ kW} = 6 \text{ MW}$ de capacidad

ii. Tipo 2

Una cimentación para un turbo-generador de capacidad de 24,000 kW = 24 MW. Ambos condensadores dispuestos transversalmente se encuentran entre los pórticos de la fundación. Tener grandes luces requiere de vigas muy altas, dejando menos espacio alrededor de los pórticos para los condensadores. Nada especial de la cámara de aire de refrigeración se ha proporcionado.

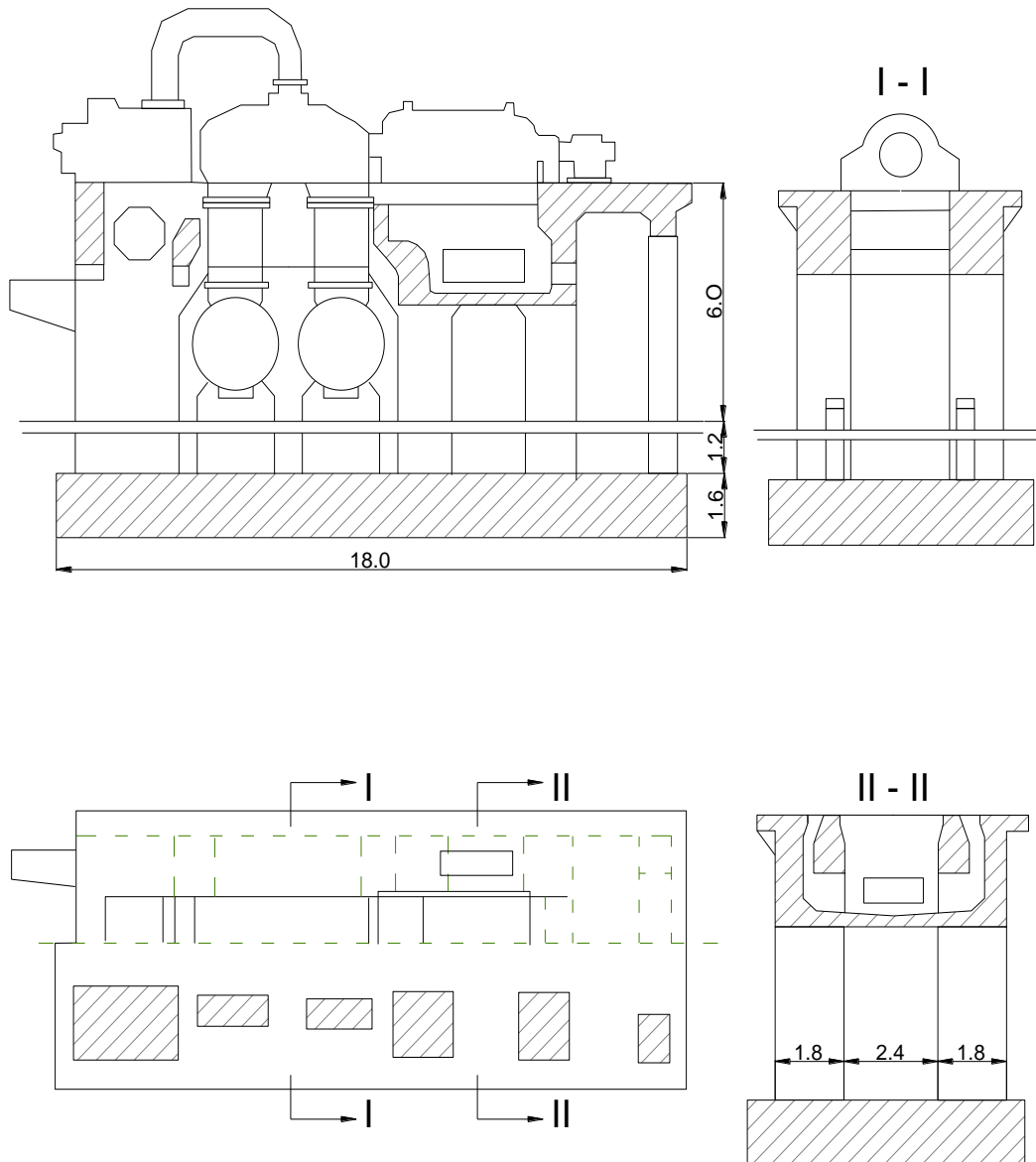


Figura 2.8 Turbogenerador con cimentación tipo pórtico, 24,000kW = 24 MW de capacidad

iii. Tipo 3

Este turbo-generador de 50,000 kW = 50 MW se apoya en tres pórticos. Entre la turbina y el generador se ha proporcionado un muro rígido de separación. Que también

aumenta la rigidez en la dirección horizontal. Uno de los pórticos laterales tiene un arreglo de pisos. (Tipo MC-50-FRC)

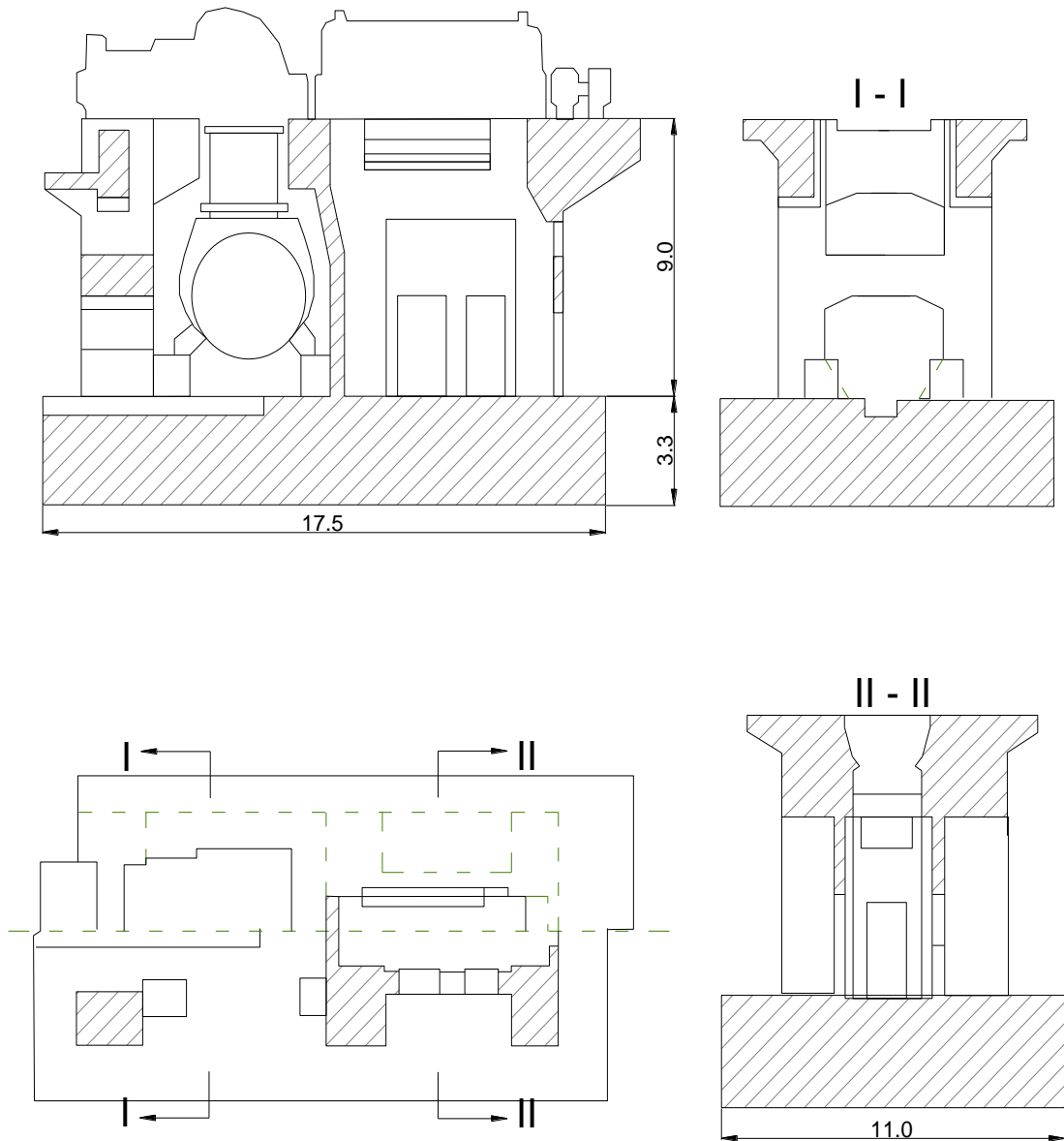


Figura 2.9 Turbogenerador con cimentación tipo pórtico, 50,000kW = 50 MW de capacidad

iv. Tipo 4

Esta muestra la fundación de un turbo generador de alta presión de 100,000 kW = 100 MW. Los soportes del muro son perpendiculares al eje de la máquina. La parte de la cimentación que soporta el generador es un pórtico de hormigón armado. Las partes situadas por debajo de la de la turbina y el generador están conectados con vigas longitudinales por encima de los condensadores. Este arreglo, sin

embargo, no ha resultado satisfactorio porque estas vigas no pueden hacerse lo suficientemente rígidas para los equipos mecánicos. Los voladizos extensos son poco comunes y también una desventaja. (HC-100-WFRc)

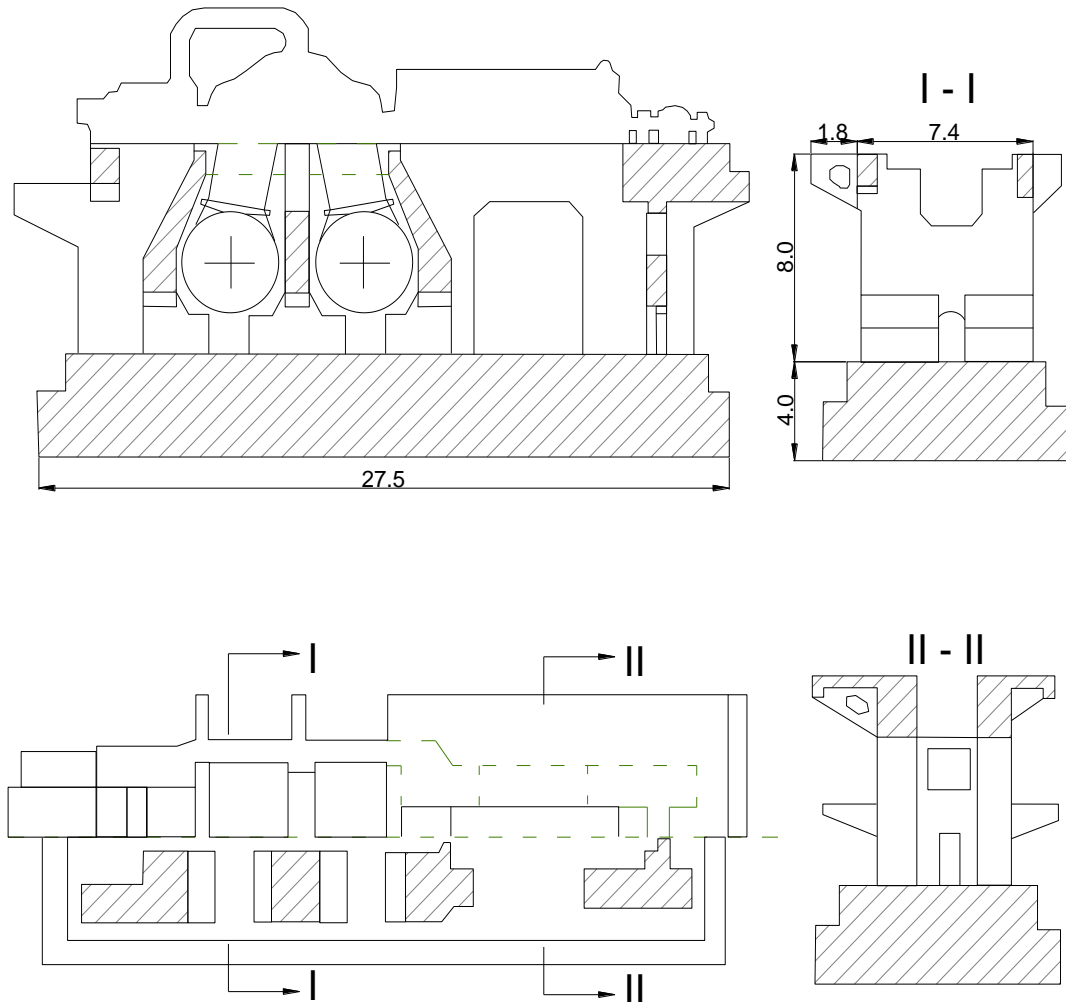
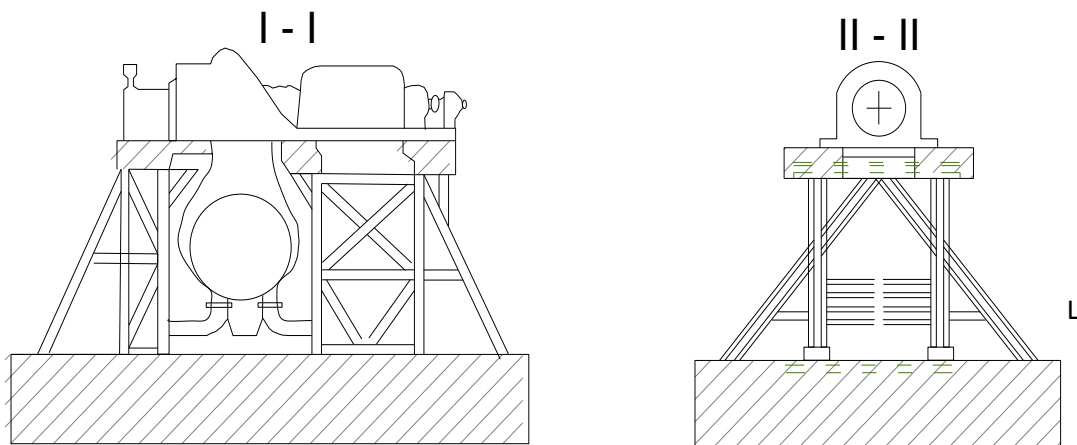


Figura 2.10 Turbogenerador con cimentación de muro y pórticos, 100,000kW = 100 MW de capacidad

v. Tipo 5

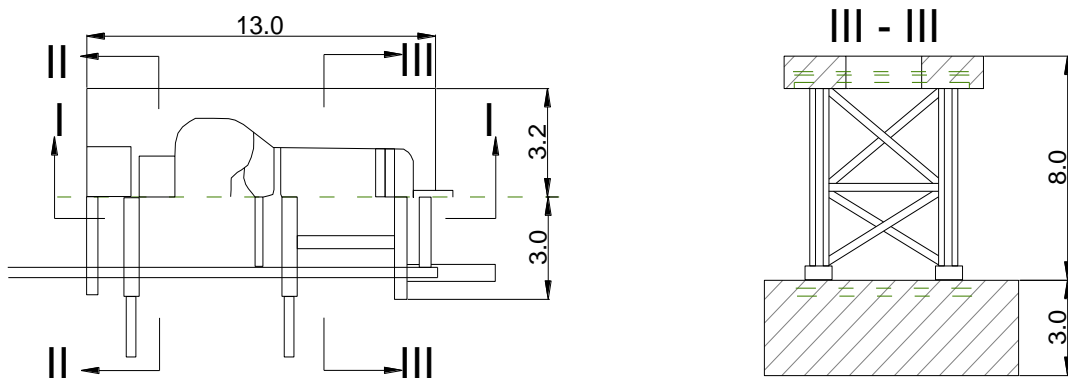
Esta es una estructura tipo pórtico con elementos de acero, además se le proporciona una losa de hormigón reforzado, con el fin de aumentar el peso de la



fundación de este turbo-generador de $30,000 \text{ kW} = 30 \text{ MW}$.

Figura 2.11 Cimentación combinada (losa de hormigón armado y estructura de acero) ,
Turbogenerador $30,000 \text{ kW} = 30 \text{ MW}$ de capacidad

CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES TIPO PÓRTICO



3.1 DATOS DE DISEÑO

3.1.1. DATOS DE LA MÁQUINA

- i. Diagrama dimensional y de localización de equipos accesorios. Diagramas de la red de tuberías, canales, ranuras, aberturas, anclajes, placas, etc.
- ii. Diagrama de las plantas de condensación y piso del turbo sistema.
- iii. Diagramas de localización y magnitud de las cargas estáticas y dinámicas sobre la cimentación. Ver diagrama típico de cargas en la figura 3.1
- iv. Potencia y velocidades de la máquina.

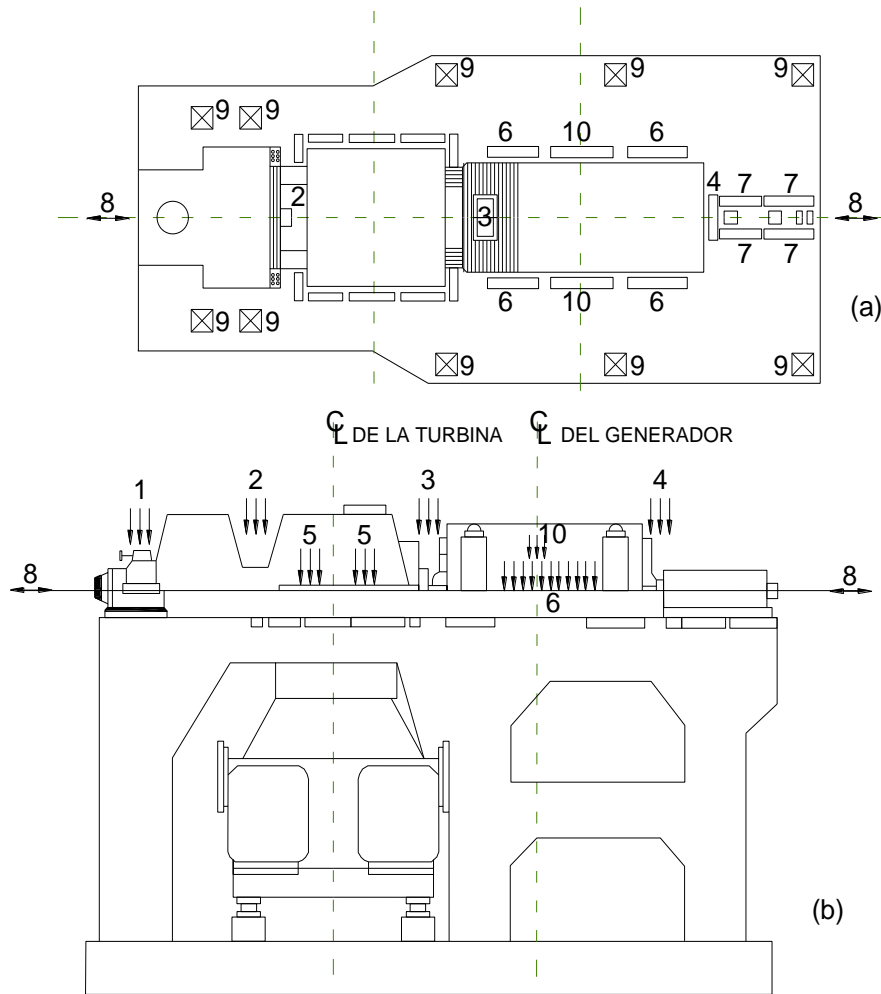


Figura 3.1 Diagrama de Cargas para una Fundación de Turbogenerador

(a) Planta (b) Elevación

- (1,2,3) Peso debido al Cilindro, Rotor de la Turbina y Placas Base,
- (3,4) Peso debido al Cilindro, Placas de Apoyo y Rotor del Generador
- (5) Carga debido a la Baja Presión dentro del Condensador
- (6) Carga debida al Estator del Generador, Refrigeradores de Gas, Escudos y Placas Base
- (7) Carga debida al Excitador y Placas Base
- (8) Carga Horizontal en la Dirección Longitudinal
- (9) Cargas Varias debido a la Plataforma al lado del Equipo Turbogenerador, Válvulas de Parada de Emergencia, Tanque de Combustible, etc.
- (10) Cargas debido al Par de Corto Circuito

3.1.2. DATOS DEL SUELO

- i. Perfil del suelo y las características del suelo hasta por lo menos tres veces el ancho de la fundación de la turbina o hasta los estratos donde los esfuerzos sean representativos.
- ii. Las posiciones relativas del nivel freático en las diferentes estaciones.

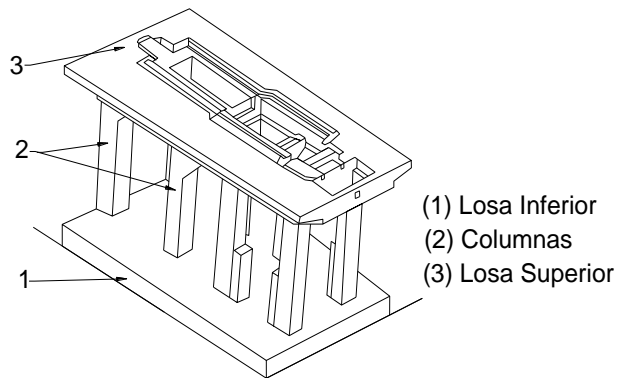
3.2. CONSIDERACIONES ESPECIALES AL PROYECTAR

Al proyectar la cimentación de un turbogenerador, deben tenerse presentes las consideraciones siguientes:

- i. La cimentación tipo pórtico consiste, generalmente, en 3 o más pórticos rígidos apoyados en una losa de cimentación gruesa. Los pórticos rígidos están fijos en dirección perpendicular a su plano, a través de vigas longitudinales y de la plataforma superior, como se muestra en la figura 3.2

- ii. Para evitar la transmisión de las vibraciones, la cimentación debe separarse totalmente del edificio principal y de otras cimentaciones adyacentes, por me

dio
de
un
a
he
ndi
dur



a libre que la rodee completamente.

Figura 3.2 Típica Cimentación tipo Pórtico

- iii. Con objeto de garantizar la continuidad de las juntas entre vigas y columnas y de evitar concentraciones de esfuerzos, se recomienda que dichas juntas sean acarteladas, además esto proporciona mayor rigidez a la plataforma superior y a las vigas mismo.
- iv. En lo posible, debe evitarse construir salientes en voladizo, y, cuando esto sea inevitable, el voladizo debe tener suficiente rigidez contra las vibraciones.
- v. Las vigas en voladizo, de la plataforma del turbogenerador, deben diseñarse con la mayor rigidez posible (con frecuencias naturales superiores a las de la máquina) para evitar agrietamientos. Usualmente es adecuado ligar los extremos de los voladizos con una viga periférica.
- vi. La losa de cimentación debe ser lo suficientemente rígida para evitar hundimientos diferenciales. Se recomienda que el espesor efectivo de la losa de cimentación no sea menor que un décimo de su longitud, ni que la menor dimensión de las columnas. También se recomienda que el peso de dicha losa no sea menor que el peso total de la máquina más el peso de la cimentación, sin contar el de la losa de cimentación.

Tabla 3.1 Espesores recomendados de losas de cimentación

directamente apoyadas sobre suelo

Potencia (MW)	Espesor
hasta 6	0.6 - 0.8
6 - 12	0.8 a 1.2
12 - 25	1.2 a 1.6
25	1.6

(Datos, Ing. Marcelo Guerra A.)

- vii. La geometría general de la estructura de cimentación, las secciones de largueros, pórticos, refuerzos, etc., deben preferiblemente ser simétricos respecto al plano vertical que pasa por el eje de la máquina.
- viii. Debe tratarse que los pórticos transversales queden situados directamente abajo de los apoyos de la maquinaria.
- ix. El plano de los pórticos debe ser perpendicular al eje de rotación de la máquina.
- x. Hasta donde sea posible, se procurará que la resultante del peso de la

máquina y de la cimentación pase por el centroide del área de contacto con el suelo.

- xi.** Deben evitarse, en lo posible, excentricidades en las cargas sobre vigas longitudinales y vigas transversales, para evitar torsiones. Las cargas deben quedar aplicadas en el eje que pasa por el centro de gravedad de la sección transversal de las vigas. La sección transversal debe ser preferentemente rectangular o T.
- xii.** Los soportes y cojinetes de los turbogeneradores y de las máquinas eléctricas deben estar perfectamente ajustados. Las flechas de transmisión deben estar estrictamente horizontales.
- xiii.** La presión del suelo en la losa de cimentación puede obtenerse bajo las condiciones más desfavorables de carga estática (no hay necesidad de analizar acciones dinámicas en el suelo). En casos extremos podrá reducirse ligeramente la presión admisible del suelo (no más de 20%), como se menciona en el subcapítulo 1.7.1 numeral iii.
- xiv.** Debe evitarse, en lo posible, la distribución no uniforme de esfuerzos en la cimentación; por ejemplo, deberá alejarse esta cimentación de la del edificio.
- xv.** En plantas de vapor a temperatura elevada, debe proporcionarse aislamiento térmico a los pasos de tuberías de vapor o aire caliente. No es conveniente alojarlas dentro de la cimentación.

3.3. CRITERIOS PRINCIPALES DE DISEÑO

Desde el punto de vista de las vibraciones, la frecuencia natural del conjunto máquina-cimentación-suelo, debe estar alejada de la velocidad de operación de la máquina, así como también de la velocidad crítica del rotor. Un margen de separación de al menos el 20 por ciento debe ser garantizado en el diseño.

Las amplitudes de vibración deben estar dentro de los límites permisibles. Los límites admisibles especificados en el nivel de apoyo de la máquina, pueden observarse en la tabla 1.1 de este manual.

El cálculo estático debe llevarse a cabo por separado para cada caso de carga, la carga muerta, dinámica (o estática equivalente) fuerzas en sentido vertical u horizontal,

fuerza conocida como par de corto circuito, y las fuerzas debido a efectos térmicos y de contracción. Los momentos de flexión obtenidos para la combinación más desfavorable de estos casos de carga debe ser considerado para el diseño. El efecto de las fuerzas dinámicas verticales y horizontales no se deben adicionar, ya que no se producen de forma simultánea.

El esfuerzo del suelo debajo de la losa de base de la fundación no debe superar la presión admisible en el suelo. Para el cálculo de la carga total en el suelo, sólo la mitad de la fuerza dinámica vertical es necesario considerar. Cuando actúan cargas sísmicas más cargas estáticas, la presión admisible del suelo puede incrementarse hasta un 33%.

Los momentos de torsión en las vigas de los pórticos, causada por una carga excéntrica de la máquina ha de tenerse en cuenta en el diseño estructural.

3.4. ANÁLISIS DINÁMICO

Para el análisis dinámico de las fundaciones tipo pórtico, tres son los métodos disponibles en la actualidad, el "método de resonancia", elaborado por Rausch en Alemania, el "método de amplitud", propuesto por Barkan en la URSS y el "método combinado", propuesto por Major en Hungría. Se describe a continuación estos tres métodos, junto a sus ventajas y desventajas relativas.

Según el método de resonancia, el requisito principal es que la Fundación debe estar "fuera de sintonía" con la máquina. Esto significa que la frecuencia natural de la fundación debe diferir en al menos el 20 por ciento de la velocidad de funcionamiento de la máquina.

Se ha comprobado posteriormente que el método de resonancia no es completo en sí mismo y que sufre de muchas desventajas, algunas de las cuales se explican a continuación.

- i.** La comprobación de la resonancia no es garantía de diseño adecuado, por ejemplo, si la frecuencia natural de la fundación es considerablemente inferior a la velocidad de funcionamiento (es decir, si la fundación está en baja sintonía). Observaciones reales han demostrado que en el caso de las fundaciones en baja sintonía, a pesar de que la frecuencia natural está bien lejos de la velocidad de funcionamiento (lo que significa que las condiciones de resonancia estarían satisfechas) vibración excesiva sigue siendo notada cada vez que la velocidad de la máquina pasa a través del valor de la frecuencia natural, durante las fases de aceleración y desaceleración.

- ii. También se ha encontrado en algunos casos que, aunque la frecuencia natural de la fundación está cerca de la velocidad de funcionamiento de la máquina (lo que significa que teóricamente existe una posibilidad de resonancia), no se han causado daños en la fundación. En tales casos, aunque la resonancia podría haber ocurrido, las amplitudes resultantes son tan pequeñas que no dañan la estructura.
- iii. Para el análisis de frecuencias, se sugiere un sistema simple de masa-resorte. Esta es una simplificación excesiva del sistema real.

La objeción de base al método de resonancia es que no predice la extensión del daño a la fundación, ya que se omite la determinación de las amplitudes.

Esto ha conducido a la adopción del método de la amplitud desarrollado por Barkan. Según este método, el requisito fundamental es que la amplitud de la fundación bajo las vibraciones forzadas no debería exceder un valor admisible determinado. Con base en diversas investigaciones, las diferentes amplitudes admisibles se presentan para diferentes máquinas. El método se basa en un sistema con dos grados de libertad, que es una mejora evidente sobre el método de resonancia. El método, sin embargo, deja de lado el hecho del aumento de las amplitudes durante las fases de aceleración y deceleración (en el caso de las fundaciones en baja sintonía). Las observaciones reales mostraron que las amplitudes calculadas por este método son inferiores a las realmente medidas en fundaciones de baja sintonía.

De hecho, el método de resonancia y el método de amplitud, son complementarios. Esto dio lugar al tercer método, conocido como "método combinado", también llamado el "método de resonancia extendido". Según este método, mientras se investiga la posibilidad de resonancia, la amplitud también debe ser determinada. En el caso de fundaciones en baja sintonía, los efectos máximos dinámicos que se producen durante las fases de aceleración y de desaceleración también se consideran en el diseño.

Todos los métodos mencionados anteriormente indican que, para efectos de análisis dinámico, cada pórtico transversal de la fundación puede ser considerado de forma independiente. Se ha comprobado a partir de observaciones prácticas que en la gama de resonancia, la primera frecuencia natural es amplia y esta se estrecha gradualmente hacia abajo para la segunda y mayores frecuencias de solicitud. Esto condujo a la creencia de que la resonancia peligrosa en altas frecuencias es remota y que sólo la frecuencia natural fundamental puede ser considerada para el control de la aparición de la resonancia y para la determinación de las amplitudes.

Se supone que los grados de libertad de la cimentación son tres movimientos de la losa superior: un desplazamiento vertical, un desplazamiento horizontal perpendicular al eje de la maquinaria y un giro en el plano horizontal respecto a una vertical que pasa por el centro de masa de la losa superior. El desplazamiento horizontal y el giro se consideran acoplados, el desplazamiento vertical se considera independiente.

Un resumen de las distintas etapas de cálculo basado en los tres métodos mencionados anteriormente, se presenta a continuación:

3.4.1. MÉTODO DE LA RESONANCIA

i. Determinación de las Frecuencias naturales

La frecuencia natural en la dirección vertical es el promedio de las frecuencias individuales de los pórticos transversales. Para el cálculo de las frecuencias naturales vertical de los pórticos transversales, el peso propio y el peso impuesto en las vigas longitudinales se consideran como cargas concentradas en las columnas, como se muestra en la figura 3.3 (a). Para las frecuencias horizontales, la losa de fondo se supone que es infinitamente rígida. En ambos casos, un sistema de un grado de libertad se asume para el análisis.

Como control adicional, la frecuencia vertical también puede ser calculada sobre la base de un sistema de dos grados de libertad con el suelo bajo la losa inferior, actuando en calidad de un resorte elástico, como se muestra en la figura 3.4.

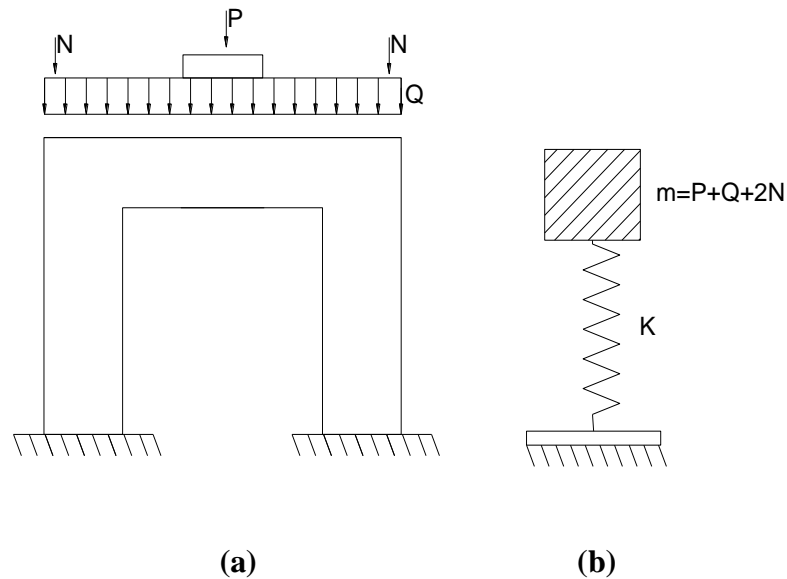


Figura 3.3 Sistema modelo para un pórtico transversal

(Método de la Resonancia y Método Combinado)

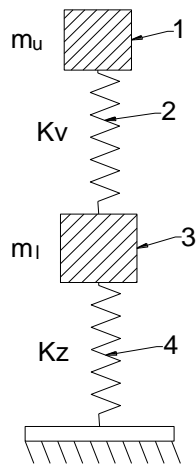


Figura 3.4 Sistema acoplado para vibraciones verticales

(1) Losa superior, (2) Pórtico, (3) Losa inferior, (4) Suelo

a) Frecuencia Vertical

La frecuencia natural vertical se obtiene como un promedio de las frecuencias verticales de los pórticos transversales considerados en forma aislada.

$$f_v = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \quad (3.1)$$

Donde:

f_v frecuencia natural vertical del sistema (rad/seg)

f_i frecuencia natural vertical del pórtico transversal i (rad/seg)

n número de pórticos transversales

La frecuencia se obtiene asumiendo un sistema de un grado de libertad

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1.6)$$

Donde:

ω_n frecuencia natural del sistema

K rigidez del sistema

m masa del sistema

$$m = \frac{W}{g} \quad (3.2)$$

$$\delta_{st} = \frac{W}{K} \quad (3.3)$$

Donde:

W peso del sistema

g aceleración de la gravedad

δ_{st} desplazamiento estático

Sustituyendo (3.2) y (3.3) en (1.6) se puede deducir que

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}}$$

Entonces la frecuencia vertical en el pórtico transversal se expresa como

$$f_i = \sqrt{\frac{g}{\delta_v}} \quad (3.4)$$

Donde:

δ_v desplazamiento estático en el centro del claro = $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$

Los valores de δ_1 , δ_2 , δ_3 y δ_4 se obtienen de la siguiente manera:

δ_1 : deflexión debido a la carga concentrada (P)

$$\delta_1 = \frac{Pl^3}{96EI_b} \left(\frac{2K+1}{K+2} \right) \quad (3.5)$$

δ_2 : deflexión debido a la carga uniformemente distribuida ($Q=P*1$)

$$\delta_2 = \frac{Ql^3}{384EI_b} \left(\frac{5K+2}{K+2} \right) \quad (3.6)$$

δ_3 : deflexión debido al corte

$$\delta_3 = \frac{3}{5} \frac{l}{EA_b} \left(P + \frac{Q}{2} \right) \quad (3.7)$$

δ_4 : compresión de la columna debido a la carga axial

$$\delta_4 = \frac{h}{EA_c} \left(N + \frac{P+Q}{2} \right) \quad (3.8)$$

En las expresiones anteriores:

- P peso de la maquinaria que carga la viga i
- q peso propio por unidad de longitud de la viga transversal
- l longitud efectiva de la viga del pórtico i
- E módulo de elasticidad del material del pórtico i
- I_b momento de inercia centroidal de la sección transversal de la viga del pórtico i
- I_c momento de inercia centroidal de la sección trasversal de las columnas del pórtico i.
- h altura efectiva de las columnas del pórtico i
- Q peso de la estructura del pórtico y cimentación que carga la viga del pórtico i
- A_b área de la sección transversal de cada viga del pórtico i
- N carga que transmiten las vigas longitudinales a cada columna del pórtico i.
- A_c área de la sección trasversal de cada columna del pórtico i.
- K relación de rigidez

$$K = \frac{I_b h}{I_c l} \quad (3.9)$$

b) Frecuencia Horizontal

Asumiendo un sistema de un grado de libertad

$$(f_h) = 30 \sqrt{\frac{K_{h1} + K_{h2} + \dots + K_{hn}}{W}} \quad (3.10)$$

Donde:

- W peso total de la máquina y de la mesa superior (t)
- K_{h1}, K_{h2}, \dots rigidez horizontal de cada pórtico transversal (t/m)

La rigidez horizontal del pórtico “i” desatendiendo la junta de rotación, viene dada por:

$$K_{hi} = 12 \frac{EI_c}{h^3} \left(\frac{6K+1}{3K+2} \right) \quad (3.11)$$

ii. Fuerzas Dinámicas

De acuerdo al DIN 4024^{c4-7}, el cual está basado en el método de la resonancia, menciona que la fuerza dinámica (F), (ó la estática equivalente), en una cimentación de una máquina giratoria, operando a velocidad ω_m (en rpm) está dada por:

$$F = 1.5 \frac{\eta^2}{|\eta^2 - 1|} \frac{R\omega_m}{3000} \quad (3.12)$$

Donde:

η es la relación de la frecuencia natural (ω_n) con la frecuencia de operación de la máquina (ω_m)

R es el peso del rotor

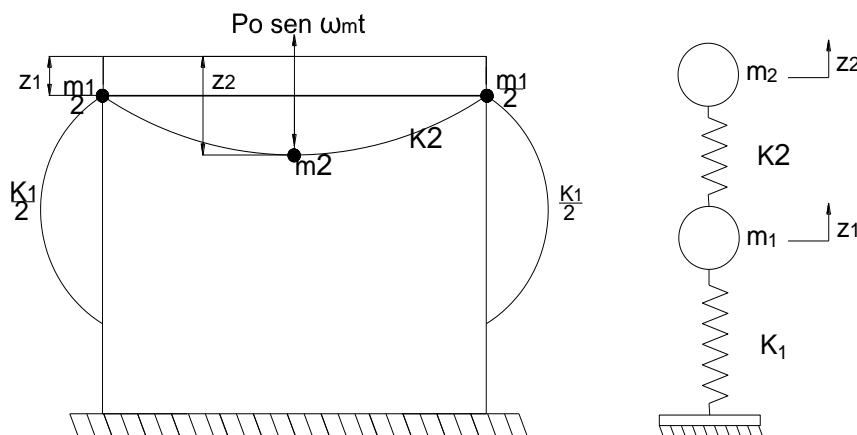
El valor de F, está limitado por el siguiente valor máximo:

$$F_{max} = 15R \frac{\omega_m}{3000} \quad (3.13)$$

El DIN 4024^{c4-7} sugiere además que se adopte un 10% más para valores desfavorables de η , con el objeto de obtener fuerzas dinámicas más grandes. Para cimentaciones en baja sintonía ($\eta < 1$) un 10% adicional debe ser considerado para el cálculo de la frecuencia natural, es decir $1.1\omega_n$, y para cimentaciones en alta sintonía ($\eta > 1$) un 10% menos debe ser considerado, es decir $0.9\omega_n$

3.4.2. MÉTODO DE LA AMPLITUD

Como en el método de la resonancia, el análisis de las vibraciones es orientado para cada pórtico transversal independientemente. Sin embargo para el cálculo de la



frecuencia vertical y horizontal, se adopta un sistema de dos grados de libertad, como el mostrado en la figura 3.5. El criterio principal para el diseño es que la amplitud producida por la vibración, se encuentre entre de los límites permisibles.

(a)

(b)

Figura 3.5 Modelo del Sistema para Vibraciones Verticales

(Método de la Amplitud)

i. Fuerzas Desbalanceantes

Teóricamente, las máquinas eléctricas y turbogeneradores están dinámicamente balanceados. En la realidad existe siempre desbalanceo, en virtud de que los centros de masa de las partes en rotación no coinciden con el eje de rotación. Este desbalanceo produce vibraciones sobre los pórticos de la cimentación.

La magnitud de las fuerzas excitadoras es proporcional a:

- La excentricidad de las partes rotatorias
- La magnitud de las masas
- El cuadrado de la frecuencia de rotación de la máquina.

$$C_i = \frac{R}{g} e \omega_m^2 \quad (3.14)$$

Donde:

e excentricidad del rotor

R peso del rotor

ω_m velocidad angular o frecuencia de rotación.

Debido a la existencia actual de datos sobre desbalanceo dinámico, es posible establecer valores de diseño de las fuerzas excitadoras. Puede prescindirse del diseño acostumbrado, con cargas estáticas "equivalentes".

La excitación sobre la estructura puede descomponerse en una fuerza centrífuga P debida a la excentricidad de las partes rotatorias respecto al eje, y a un momento excitador M producido por la no coincidencia del plano vertical, transversal al eje, que contiene a la fuerza P y el plano vertical que pasa por el centro de masas de la

instalación completa (figura 3.6).

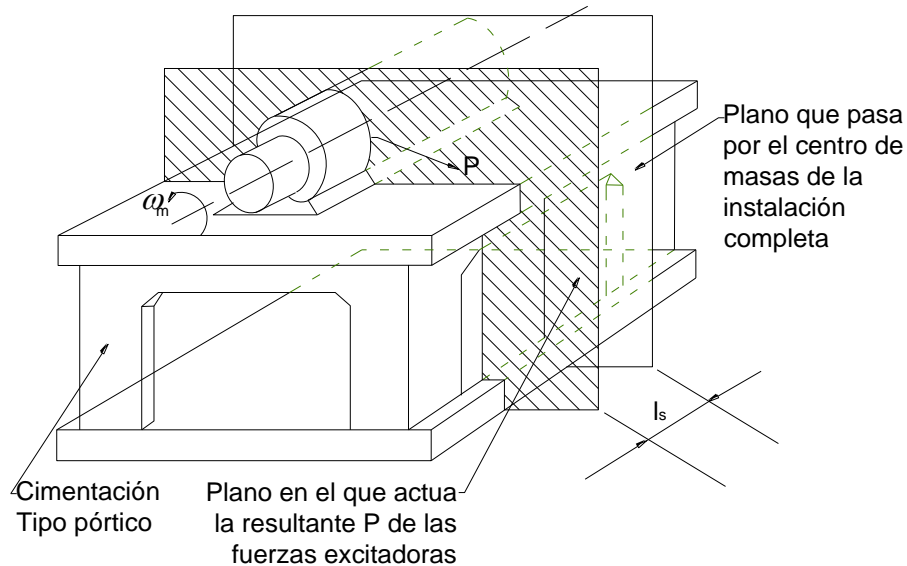


Figura 3.6 Fuerza Excitadora Debida al Desbalanceo Dinámico

De las consideraciones anteriores se tiene:

$$M = Pl_s \quad (3.15)$$

Donde:

M momento excitador total

$l_s = e$ excentricidad, distancia entre el centro de masas de la instalación completa y el plano en el que actúa la fuerza resultante P de las fuerzas excitadoras

Como P es una fuerza de inercia, girará a la misma velocidad de rotación ω_m de la máquina. Sus componentes horizontal y vertical están dadas por:

$$\text{Componente vertical: } P_v = C_i \text{ sen } \omega_m(t) \quad (3.16)$$

$$\text{Componente horizontal: } P_h = C_i \text{ cos } \omega_m(t) \quad (3.17)$$

Descomponiendo el momento excitador en un plano vertical y uno horizontal, se ha podido observar que las amplitudes de vibración debidas al momento excitador en un

plano vertical, son poco importantes. El momento excitador con que se analiza la cimentación es:

$$M_z = P_h l_s \quad (3.18)$$

Los datos requeridos en el cálculo de P_v , P_h , y M son todos conocidos, excepto la excentricidad e . Los valores de esta pueden asumirse directamente de la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Excentricidad del rotor en función de su velocidad

Velocidad de operación	Excentricidad (e)
3000 rpm	0.05 mm
1500 rpm	0.2 mm
750 rpm	0.35 a 0.8 mm

También es posible determinar la excentricidad a través de las amplitudes de vibración medidas antes y después del balanceo dinámico.

Supóngase que antes del balanceo dinámico se tiene una fuerza centrífuga P_0 que causa amplitudes a_0 . El balanceo dinámico implica la adición de una masa a una cierta distancia del eje de rotación. Supóngase que esta masa produce una fuerza centrífuga P y que como resultado del balanceo, las amplitudes se reducen a " a ". En este proceso se conocen P , a_0 y a , de las cuales, por una simple proporción, puede obtenerse P_0 :

$$P_0 = \frac{a_0}{a_0 - a} P \quad (3.19)$$

Por otro lado

$$P_0 = e \frac{R}{g} \omega_m^2$$

de donde

$$e = \frac{P_0}{R\omega_m^2} g$$

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación para determinar la excentricidad para la máquina 1, de la tabla 3.3 se tiene los siguientes datos:

$$a_0 = 0.16 \text{ mm}, \quad a = 0.035 \text{ mm}, \quad P = 1.86 \text{ t}$$

entonces

$$P_0 = \frac{0.16}{0.16 - 0.035} 1.86 = 2.38 \text{ t}$$

como

$$N = 1\,500 \text{ rpm}, \quad W = 12\,000 \text{ kg}$$

se tendrá

$$e = \frac{Pog}{W\omega_m^2} = \frac{P_0 g}{W\left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2} = \frac{2380 \times 9800}{12000 \left(\frac{6.28 \times 1500}{60}\right)^2} = 0.086 \text{ mm}$$

Tabla 3.3 Balanceo de Rotores de Máquinas a 1,500 rpm

Máquinas a 1,500 rpm							
No.	Potencia	Peso rotor	Amplitud de vibración		P	Po	e
	kW	t	a _o (mm)	a (mm)	t	t	mm
1	5,000	12.0	0.160	0.035	1.86	2.38	0.086
2	3,000	5.0	0.075	0.042	0.43	0.97	0.085
3	3,000	5.0	0.125	0.023	0.92	1.12	0.097
4	3,000	5.0	0.125	0.025	0.76	0.95	0.082
5	3,000	5.0	0.092	0.027	0.30	0.43	0.038
6	3,000	5.0	0.600	0.058	1.23	1.36	0.118
7	3,000	6.0	0.062	0.026	0.52	0.80	0.070
8	50,000	70.0	0.260	0.017	11.41	12.20	0.076
9	50,000	70.0	0.350	0.030	23.50	25.80	0.160
10	50,000	70.0	0.430	0.035	25.40	27.30	0.170
11	50,000	37.5	0.150	0.058	3.97	6.50	0.075

Tabla 3.4 Balanceo de Rotores de Máquinas a 3,000 rpm

Máquinas a 3,000 rpm							
No.	Potencia	Peso rotor	Amplitud de vibración		P	Po	e
	kW	t	a _o (mm)	a (mm)	t	t	mm
12	17,500	18.3	0.087	0.066	1.04	4.30	0.025
13	16,000	18.0	0.157	0.060	1.77	2.87	0.017
14	16,000	7.0	0.133	0.056	1.64	2.84	0.045
15	16,000	18.0	0.170	0.042	2.36	3.10	0.019
16	16,000	18.0	0.140	0.025	8.25	10	0.060
17	25,000	20.0	0.170	0.058	5.10	7.75	0.042
18	25,000	17.5	0.120	0.040	3.02	4.53	0.029
19	6,000	7.2	0.180	0.030	2.18	2.62	0.040
20	6,000	7.2	0.125	0.021	1.00	1.20	0.018

Notas sobre las Tablas 3.3 y 3.4:

1. Los datos de la tabla se refieren a balanceo efectuado en condiciones desfavorables (los valores de las fuerzas de excitación y excentricidades pueden considerarse en el dominio de los valores máximos permisibles).
2. Las amplitudes de vibración se midieron en los cojinetes.
3. En términos de los valores máximos de la tabla 3.3 y 3.4, se propone la siguiente fórmula para estimar la excentricidad

$$e = \frac{0.5}{N^2} \times 10^6 (mm)$$

Donde

N frecuencia de operación de la máquina en rpm

ii. Frecuencia Natural Vertical y Amplitud Vertical

Para el cálculo de las frecuencias verticales un sistema masa-resorte de dos grados de libertad, como el mostrado en la figura 3.5 es adoptado.

Se introducen simplificaciones que no influyen significativamente en los resultados.

Los desplazamientos más importantes, en un estado de vibraciones verticales, se presentan en las vigas de los pórticos transversales.

Se puede despreciar, en el cálculo de las vibraciones verticales, la influencia de las vigas longitudinales, en vista de que:

- Los desplazamientos verticales de dos pórticos consecutivos son prácticamente iguales
- La rigidez a la deformación por compresión axial de las columnas es muy superior a la rigidez a la flexión de las vigas longitudinales

La presencia de las vigas longitudinales tiende a reducir la amplitud de vibraciones, efecto que se compensa parcialmente al despreciar los efectos del cortante y la rotación de las secciones transversales en el movimiento vibratorio.

En el método para el análisis de vibraciones verticales, que se presenta adelante, el pórtico se idealiza como un sistema de dos grados de libertad. Consecuentemente se determinarán dos frecuencias λ_1, λ_2 que sean tales, que $\lambda_2 < \lambda_1$. Si λ_z es la frecuencia natural del pórtico en cuestión. Suponiéndolo absolutamente rígido y apoyado en una cimentación elástica y la frecuencia del turbogenerador es ω_m , se verifica usualmente la siguiente desigualdad:

$$\lambda_z < \omega_m < \lambda_2 \quad (3.21)$$

En el caso de la cimentación de máquinas eléctricas de baja velocidad, se cumple

$$\omega_m < \lambda_z < \lambda_2 \quad (3.22)$$

Si la cimentación de pórticos verifica alguna de las desigualdades anteriores, es posible despreciar la elasticidad del suelo; esto es, considerarla absolutamente rígida, y las columnas empotradas en la losa de cimentación. El diseño en estas condiciones proporcionará un factor de seguridad adecuado respecto a la estabilidad dinámica del conjunto.

Las cargas que se transmiten al pórtico son:

- a) La acción dinámica vertical $C_i \text{ sen } \omega_m t$ y el peso del rotor, transmitidas a través de los cojinetes, que se consideran concentrados en la viga transversal, al

centro del claro.

- b) La carga muerta de la viga transversal, que se reemplaza por una carga equivalente concentrada al centro del claro, y se obtiene de tal manera que la energía cinética del sistema no se altere. Esta acción equivalente puede determinarse como el 45 % de la carga muerta total de la viga transversal.
- c) Las cargas que se transmiten a las columnas son:
- Las cargas muertas transmitidas por las vigas longitudinales (peso propio y peso de equipo), las cuales se determinarán suponiendo a las vigas libremente apoyadas en los nudos de los pórticos.
 - El peso propio de la viga transversal de los pórticos (25 % del peso total en cada nudo).
 - El peso propio de las columnas (33% del peso total de la columna en cada nudo).

Las masas equivalentes concentradas en los nudos y el centro del claro de los pórticos, se pueden resumir en las siguientes expresiones (ver figura 3.5a):

$$m_2 = m_o + 0.45 m_b \quad (3.23)$$

En donde:

- m_o : es la masa determinada por el peso del rotor, y el peso de equipo mecánico transmitido a través de los cojinetes
- m_b : es la masa de la viga transversal

$$\frac{1}{2} m_1 = m_a + 0.255 m_b + 0.33 m_c \quad (3.24)$$

Donde

- m_a : es la masa de las vigas longitudinales que se apoyan en cada nudo y la del equipo mecánico que se apoya en ellas
- m_b : es la masa de la viga transversal
- m_c : es la masa de cada columna

Las ecuaciones de movimiento para el pórtico de la figura 3.5 (a), pueden obtenerse del sistema en serie mostrado en la figura 3.5 (b).

Si K_2 es la rigidez conjunta de los dos resortes, esto es, el coeficiente de rigidez del pórtico en el punto medio de la viga (fuerza que debe aplicarse al pórtico en el punto medio de la viga para producir un desplazamiento vertical unitario), y si $\frac{1}{2}K_1$ es la rigidez a la compresión de una columna, entonces del equilibrio dinámico de la primera y segunda masa se obtiene:

$$m_1 \ddot{z}_1 + K_1 z_1 - K_2 (z_2 - z_1) = 0 \quad (3.25)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + K_2 (z_2 - z_1) = P_0(t) \text{sen} \omega_m t \quad (3.26)$$

en las cuales

$$K_1 = \frac{2EA_c}{h} \quad (3.27)$$

$$K_2 = \frac{l}{\delta_v} \quad (3.28)$$

$$\delta_2 = \frac{l^3(l+2K)}{96El_b(2+K)} + \frac{3l}{8GA_b} \quad (3.29)$$

Donde:

E el módulo de elasticidad del hormigón

G el módulo de cortante = 0.425 E

A_b, I_b el área y momento de inercia de la sección transversal de la viga del pórtico

A_c, I_c el área y momento de inercia de la sección transversal de la columna del pórtico

$$K = \frac{I_b}{I_c} \frac{h}{l} \quad (3.9)$$

l, h , ancho y altura efectiva del pórtico, calculados como indican las ecuaciones 3.84 y 3.85

Sustituyendo en el sistema homogéneo asociado a las ecuaciones de movimiento, soluciones del tipo.

$$z_i = Z_i \cos(\omega_m t + \beta)$$

Se obtiene, después de dividir entre $\cos(\omega_m t + \beta)$

$$(K_1 + K_2 - m_1 \omega_m^2) a_1 - K_2 a_2 = 0 \quad (3.30)$$

$$-K_2 a_1 - (K_2 - m_2 \omega_m^2) a_2 = 0 \quad (3.31)$$

El cual tiene solución para a_1, a_2 distinta de la trivial ($a_1 \neq 0$ y $a_2 \neq 0$) si el determinante es cero:

$$\begin{vmatrix} 1 + K_2 - m_1 \omega_m^2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 - m_2 \omega_m^2 \end{vmatrix} = 0$$

o sea la ecuación de frecuencias

$$f(\omega_m^2) = (\omega_m^2)^2 - \frac{m_1 + m_2}{m_1} \left(\frac{K_2}{m_2} + \frac{K_1}{m_1 + m_2} \right) (\omega_m^2) + \frac{K_1 K_2}{m_1 m_2} = 0 \quad (3.32)$$

lo cual puede expresarse como

$$f(\omega_m^2) = \omega_m^4 - (1 + \alpha)(\overline{\omega_{n1}^2} + \overline{\omega_{n2}^2})(\omega_m^2) + (1 + \alpha)\overline{\omega_{n1}^2} \overline{\omega_{n2}^2} = 0 \quad (3.33)$$

en la cual

$$\alpha = \frac{m_2}{m_1} \quad (3.34)$$

$$\overline{\omega_{n2}^2} = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}} \quad (3.35)$$

$$\overline{\omega_{n1}^2} = \sqrt{\frac{K_1}{m_1 + m_2}} \quad (3.36)$$

$\overline{\omega_{n1}^2}$ $\overline{\omega_{n2}^2}$, se denominan FRECUENCIAS LÍMITE y corresponden a los valores de las frecuencias de los sistemas de un grado de libertad mostrados en la figura 3.7

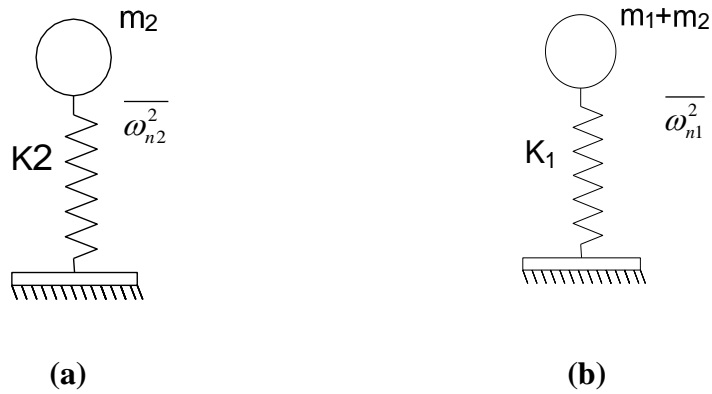


Figura 3.7 Frecuencias límite

Entre las frecuencias del sistema λ_1 , λ_2 y las frecuencias límite, existe la siguiente relación.

$$\lambda_2 < \overline{\omega_{n2}^2} < \overline{\omega_{n1}^2} < \lambda_1 \quad (3.37)$$

Resolviendo las ecuaciones diferenciales pueden fácilmente calcularse las amplitudes de movimiento de los nudos y el centro de la viga, respectivamente.

$$a_1 = \frac{\overline{\omega_{n2}^2}}{m_1 f(\omega_m^2)} P_0 \quad (3.38)$$

$$a_2 = \frac{(1+\alpha)\overline{\omega_{n1}^2} + \alpha\overline{\omega_{n2}^2} - \omega_m^2}{m_2 f(\omega_m^2)} P_0 \quad (3.39)$$

Donde:

$f(\omega_m^2)$ es el polinomio de la ecuación característica

P_0 amplitud de la fuerza excitadora

Las expresiones anteriores para las amplitudes, son válidas para valores lejanos a la resonancia; esto es, cuando λ_1 y/o λ_2 difieren de ω_m cuando menos en $\pm 30\%$.

Si la frecuencia de excitación ω_m está cerca de λ_2 (frecuencia natural del sistema más baja), deberá incluirse en la solución el efecto del amortiguamiento C . Puede utilizarse la solución del sistema de un grado de libertad amortiguado, de la figura 3.7

(a), para el cálculo de a_2

$$a_2 = \frac{P_0}{m_2 \sqrt{(\lambda_2^2 - \omega_m^2)^2 + 4C^2 \omega_m^2}} \quad (3.40)$$

$$(C \sim 0.05 \text{ a } 0.1 \lambda_2)$$

en particular si $\lambda_2^2 - \omega_m^2$ es pequeño

$$a_2 = \frac{P_0}{2m_2 C \omega_m} \quad (3.41)$$

Si ω_m está cerca de λ_1 , puede utilizarse la solución del sistema amortiguado de un grado de libertad figura 3.7 (b) para el cálculo de a_2 :

$$a_2 = \frac{P_0}{(m_1 + m_2) \sqrt{(\lambda_1^2 - \omega_m^2)^2 + 4C^2 \omega_m^2}} \quad (3.42)$$

iii. Frecuencia Natural Horizontal y Amplitud Horizontal

Se supondrá que la plataforma superior es absolutamente rígida en su plano y que las columnas están empotradas en la losa de cimentación.

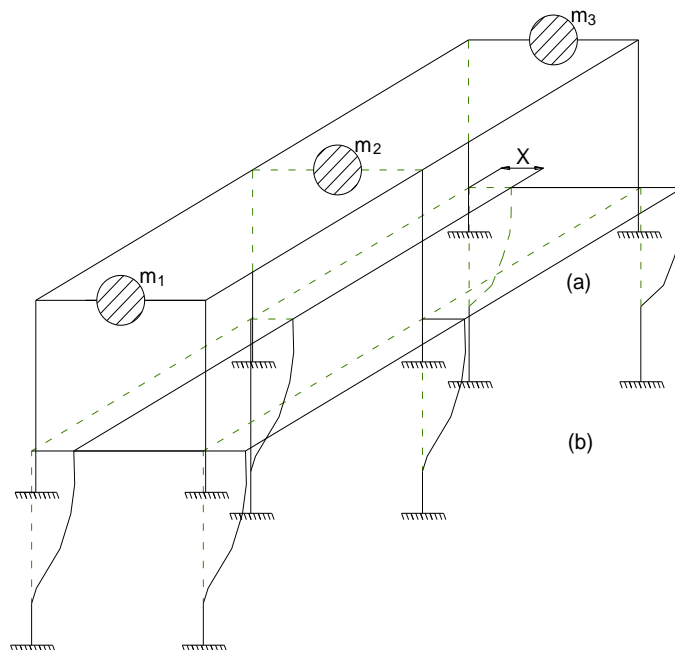


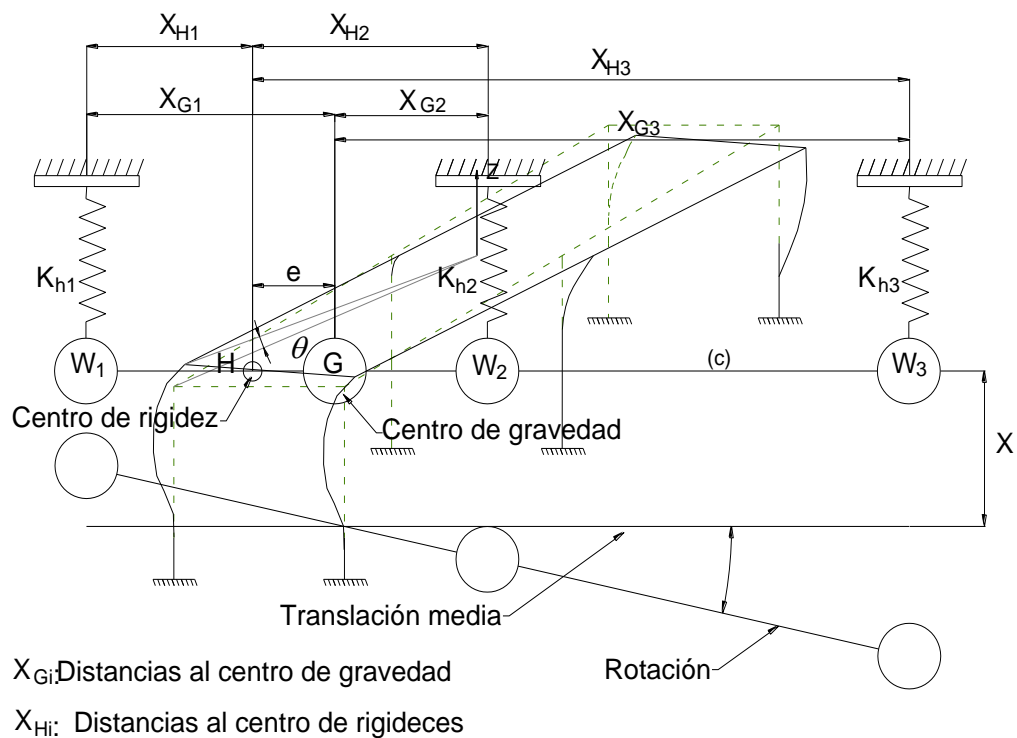
Figura 3.8 Masas Actuantes y Movimientos de la Estructura

Para ilustrar el método, se supondrá una estructura de 3 pórticos, en la cual las masas de cimentación y la maquinaria se reemplazarán por tres masas m_1 , m_2 , y m_3 concentradas al centro del claro de cada pórtico figura 3.8 (a).

En el cálculo de las masas deberá, además, incluirse:

- a) La masa de las cargas muertas concentradas o distribuidas en cada pórtico.
- b) La masa asociada al 30% del peso de cada columna.
- c) La masa de las vigas longitudinales.

Con el objeto de analizar los movimientos de la estructura figura 3.8 (b) y (c) de desplazamiento lateral y rotación respecto a un eje que pasa por el centro de masas, se introduce el modelo simplificado de la figura 3.9.



θ

Figura 3.9 Modelo Simplificado Para Vibraciones Horizontales

Se tienen las ecuaciones de movimiento:

Desplazamiento Lateral

$$m\ddot{x} + \sum_{i=1}^n k_i X_{Gi} x_i = C \text{ sen } \omega_m t \quad (3.43)$$

Rotación

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i X_{Gi}^2 \right) + \sum_{i=1}^n k_i X_{Gi} x_i = M_0 \text{ sen } \omega_m t \quad (3.44)$$

en esta última expresión se ha despreciado la rigidez de las columnas a la torsión en comparación con la rigidez lateral k_i de los pórticos. En estas expresiones la rigidez lateral k_i de los pórticos, puede calcularse de:

$$k_i = \frac{1}{\delta_h} \quad (3.45)$$

(δ_h : Desplazamiento lateral debido a una fuerza horizontal unitaria)

$$\delta_h = \frac{h^3(2+3K)}{12El_c(1+6K)} \quad (3.46)$$

$$K = \frac{I_b h}{I_c l} \quad (3.9)$$

C es la fuerza centrífuga total, calculada en la ecuación (3.14).

Las ecuaciones anteriores pueden reescribirse más convenientemente considerando que:

$$\sum_{i=1}^n k_i x_i = Kx + Ke\theta \quad (3.47)$$

en donde K es la rigidez total de los resortes $K = \sum_{i=1}^n k_i$ y e es la distancia entre el centro de masas y el centro de rigideces.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n m_i X_{Gi}^2 \quad (3.48)$$

φ es el momento total de inercia de las masas m_i respecto al centro de masas.

$$\sum_{i=1}^n k_i X_{Gi} x_i = K(x + e\theta)e + \gamma\theta \quad (3.49)$$

en el cual γ es la rigidez torsional del sistema

$$\gamma = \sum_{i=1}^n k_i X_{Hi}^2 \quad (3.50)$$

Si después de sustituir las expresiones anteriores en las ecuaciones de movimiento, se dividen entre m y φ la primera y segunda ecuación, respectivamente se obtienen:

$$\ddot{x} + \omega_x^2 + \omega_x^2 e\theta = \frac{C}{m} \text{sen } \omega_m t \quad (3.51)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{e}{r^2} \omega_x^2 x + \left(\frac{e^2}{r^2} \omega_x^2 + \omega_\theta^2 \right) \theta = \frac{M_0}{\varphi} \text{sen } \omega_m t \quad (3.52)$$

en la cual

ω_x es la frecuencia limite del sistema para vibraciones laterales exclusivamente, $e = 0$

$$\omega_x^2 = \frac{K}{m} \quad (3.53)$$

ω_θ es la frecuencia limite del sistema para vibraciones rotacionales

exclusivamente, $e = 0$

$$\omega_{\theta}^2 = \frac{\gamma}{\varphi} \quad (3.54)$$

r es el radio de giro

$$r^2 = \frac{\varphi}{m} \quad (3.55)$$

Suponiendo oscilaciones forzadas laterales y rotacionales de la forma

$$x = a_x \text{ sen } \omega_m t \quad \theta = a_{\theta} \text{ sen } \omega_m t$$

el sistema se reduce a

$$\begin{aligned} (\omega_x^2 - \omega_m^2) a_x + \omega_x^2 e a_{\theta} &= \frac{C}{m} \\ \frac{e^2}{r^2} \omega_x^2 a_x + \left(\frac{e^2}{r^2} + \omega_x^2 + \omega_{\theta}^2 - \omega_m^2 \right) a_{\theta} &= \frac{M_0}{\varphi} \end{aligned}$$

de los cuales pueden calcularse las amplitudes del sistema no amortiguado.

$$a_x = \frac{\left[\left(\frac{e}{r} \omega_x \right)^2 + \omega_{\theta}^2 - \omega_m^2 \right] \frac{C}{m} - e \omega_x^2 \frac{M_0}{\varphi}}{f(\omega_m^2)} \quad (3.56)$$

$$a_{\theta} = \frac{\left(\frac{e}{r} \omega_x \right)^2 \frac{C}{m} - (\omega_x^2 - \omega_m^2) \frac{M_0}{\varphi}}{f(\omega_m^2)} \quad (3.57)$$

En las cuales

$$f(\omega_m^2) = \omega_m^4 - (\alpha \omega_x^2 + \omega_{\theta}^2) (\omega_m^2) + \omega_x^2 \omega_{\theta}^2 \quad (3.58)$$

$$\alpha = 1 + \frac{e^2}{r^2} \quad (3.59)$$

Las frecuencias naturales del sistema λ_1 y λ_2 , se pueden calcular de la ecuación de frecuencias

$$f(\omega^2) = f(\lambda^2) = 0$$

La amplitud de vibración horizontal neta está dada por:

$$a_h = a_x + a_\theta x' \quad (3.60)$$

Donde:

X' es la distancia del punto más alejado de la cimentación hasta el centro de gravedad (G)

Como en el caso de vibraciones verticales, las expresiones anteriores para las amplitudes son válidas si ω_m está fuera de la zona de resonancia del sistema (difiere en $\pm 30\%$ de λ_1 y λ_2). En caso contrario y empleando la desigualdad

$$\lambda_2 < \omega_x < \omega_\theta < \lambda_1 \quad (3.61)$$

Si ω_m está en la vecindad de λ_2 , puede emplearse la amplitud para el sistema amortiguado correspondiente a ω_x (translación de un sistema de un grado de libertad)

$$a_x = \frac{P_0}{\sqrt{(\lambda_2^2 - \omega_m^2)^2 + 4C^2 \omega_m^2}} \quad (3.62)$$

y análogamente, si ω_m está cercana a λ_1

$$a_\theta = \frac{M_0}{\varphi \sqrt{(\lambda_1^2 - \omega_m^2)^2 + 4C^2 \omega_m^2}} \quad (3.63)$$

iv. Fuerzas Dinámicas

De acuerdo a la USSR, especificación ^{c4-9}, la fuerza dinámica vertical (P_v) está definida por:

$$P_v = 7.5K_v a_v \quad (3.64)$$

Donde:

K_v es el factor de rigidez de la viga o columna de la estructura, es decir la rigidez K_1 y K_2 , presentadas en las ecuaciones 3.27 y 3.28 respectivamente.

a_v es la correspondiente amplitud vertical

La fuerza dinámica horizontal en cada pórtico transversal está dada por:

$$P_h = 7.5K_h a_h \quad (3.65)$$

Donde:

K_h es la rigidez lateral del pórtico transversal dada en la ecuación 3.11

a_h es la amplitud neta, dada en la ecuación 3.60

3.4.3. MÉTODO COMBINADO

i. Frecuencia Vertical

La frecuencia natural vertical de cada pórtico transversal es calculada como en el caso del método de la resonancia. Usando las ecuaciones 3.1 a 3.9

ii. Frecuencia Horizontal

La frecuencia natural horizontal se obtiene de la expresión siguiente

$$f_h = 30 \sqrt{\alpha_0 \mp \sqrt{\alpha_0^2 - \frac{\sum k_{hi} I_H}{\sum W_i I_G}}} \quad (3.66)$$

Donde: (Ver figura 3.9)

K_{hi} rigidez lateral del pórtico transversal i (t/m)

W_i peso total en el pórtico i, incluyendo el peso de la máquina, el peso de la viga transversal y el peso transmitido por las vigas longitudinales

$$I_G = \sum W_i X_{Gi}^2 = W_i X_{G1}^2 + W_i X_{G2}^2 + \dots$$

X_G distancia existente desde el peso W_i hasta el eje vertical que pasa a través del centro de gravedad (G)

$$I_H = \sum K_{hi} X_{Hi}^2 = K_{h1} X_{H1}^2 + K_{h2} X_{H2}^2 + \dots$$

X_H es la distancia de cada p6rtico hasta el centro de rigidez horizontal
(H)

$$\alpha_o = \frac{1}{2} \left[e^2 \frac{\sum K_{hi}}{I_G} + \frac{\sum K_{hi}}{\sum W_i} + \frac{I_H}{I_G} \right] \quad (3.67)$$

e distancia entre el centro de gravedad y el centro de rigidez horizontal

iii. Amplitudes

Los siguientes pasos llevan a la determinaci3n de la amplitud en sentido vertical y horizontal.

Paso 1. El factor dinámico (μ), se calcula con la siguiente ecuaci3n.

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{f_m^2}{f_n^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta}{\pi}\right)^2 \frac{f_m^2}{f_n^2}}} \quad (3.68)$$

Donde:

Δ es el decremento logarítmico de amortiguamiento, el cual puede asumirse como 0.4 para cimentaciones de hormig3n.

Para cimentaciones de baja sintonía, es decir $\omega_n < \omega_m$, $\omega_n = \omega_m$ debería ser usado en la fórmula anterior. Entonces el factor dinámico resulta $\mu = \frac{\pi}{\Delta}$ y para $\Delta = 0.4$ $\mu = 7.85$

Paso 2. La fuerza centrífuga (C) causada por el desbalanceo alrededor del eje de rotaci3n se obtiene:

Para cimentaciones de baja sintonía ($\omega_n < \omega_m$), de la siguiente manera

$$C_i = \alpha R \left(\frac{\omega_n}{\omega_m} \right)^2 \quad (3.69)$$

Donde α , se muestra a continuaci3n para diferentes velocidades de máquinas

$$\alpha = 0.2 \text{ para frecuencia de operaci3n } \geq 3\,000 \text{ rpm} \quad (3.69 \text{ a})$$

$$\alpha = 0.16 \qquad \qquad \qquad = 1\,500 \text{ rpm} \quad (3.69 \text{ b})$$

$$\alpha = 0.1 \qquad \qquad \qquad \leq 750 \text{ rpm}$$

(3.69 c)

Los valores presentados corresponden a un estado normal de balanceo del rotor.

Para cimentaciones de alta sintonía ($\omega_n > \omega_m$):

$$C_i = \alpha R \qquad (3.70)$$

Donde:

R peso total del rotor

Paso 3.

a. Amplitud Vertical (a_v)

$$a_v = \mu \cdot \delta_v \qquad (3.71)$$

Donde:

$$\delta_v = \frac{C}{E} \left[\frac{l^3}{96I_b} \frac{2K+1}{K+2} + \frac{3}{5} \frac{l}{A_b} + \frac{1}{2} \frac{h}{A_c} \right] \qquad (3.72)$$

μ y C se obtienen de los pasos 1 y 2. Para cimentaciones de baja frecuencia, μ es tomado como $\frac{\pi}{\Delta}$ ó 7.85, el cual es el máximo valor.

b. Amplitud Horizontal (a_h)

Para el cálculo de la amplitud horizontal, la fuerza centrífuga horizontal actuante en cada pórtico es determinada de la siguiente manera:

La fuerza centrífuga horizontal se obtiene de las ecuaciones 3.69 ó 3.70, (dependiendo del caso que sea) y esta es distribuida a los varios pórticos en función de la rigidez horizontal de cada uno de ellos.

$$C_i = C \frac{K_{hi}}{\sum K_{hi}} + e_i \frac{CK_{hi}X_{Hi}}{I_H} \qquad (3.73)$$

Donde:

$$I_H = \sum K_{hi} X_{Hi}^2$$

C es la fuerza centrífuga total ($\sum C_i$)

e_i es la excentricidad de la resultante de las fuerzas centrífugas hasta el centro de rigidez, $X_H - X_C$, donde X_H es el centro de rigidez (centro de gravedad de las fuerzas K_h) y X_C es el centro de gravedad de las fuerzas centrífugas ó de los pesos en rotación

$\sum K_{hi}$ es la suma de la rigidez lateral de los pórticos transversal (t/m)

X_H es la distancia de cada pórtico hasta el centro de rigidez horizontal (H)

Si C_i es la fuerza centrífuga en el pórtico i , ecuaciones 3.69 ó 3.70, la deflexión horizontal δ_{hi} bajo la influencia estática de C_i está dada por:

$$\delta_{hi} = \frac{C_i}{K_{hi}} \quad (3.74)$$

La amplitud horizontal (a_{hi}) del pórtico transversal i , está dada por:

$$\delta_{hi} = \mu \delta_{hi} \quad (3.75)$$

Donde:

μ está dado por la ecuación 3.68

Puesto que la frecuencia horizontal, generalmente es muy baja, comparada con la frecuencia de operación, el máximo valor de μ igual a 7.85, debería ser adoptado para el cálculo de la amplitud horizontal.

iv. Fuerzas Dinámicas

Para tener en cuenta posibles incertidumbres en el cálculo de frecuencias naturales, la frecuencia natural calculada debe ser modificada multiplicándolo por un término.

$$(1 \pm \alpha) \text{ de tal manera que } \omega_n' = f(1 \pm \alpha) \quad (3.76)$$

Donde α es un factor de corrección puede ser tomado como 0.2. El signo más se puede tomar cuando $\omega_n < \omega_m$ y el signo menos cuando $\omega_n > \omega_m$. Si ω_n se encuentra entre $\frac{\omega_m}{1+\alpha}$ y $\frac{\omega_m}{1-\alpha}$, entonces $\omega_n = \omega_m$ puede usarse.

La siguiente expresión puede usarse para el cálculo de la fuerza dinámica:

Caso (a): $\omega_n < \omega_m$

$$\text{Cuando } \omega_m = 3000 \text{ rpm, } F = 16R \left(\frac{\omega_n}{\omega_m} \right)^2 \quad (3.77 \text{ a})$$

$$\text{Cuando } \omega_m = 1500 \text{ rpm, } F = 12R \left(\frac{\omega_n}{\omega_m} \right)^2 \quad (3.77 \text{ b})$$

$$\text{Cuando } \omega_m = 750 \text{ rpm, } F = 8R \left(\frac{\omega_n}{\omega_m} \right)^2 \quad (3.77 \text{ c})$$

Donde:

R es el peso de rotación en el pórtico

El máximo valor de F, debería ser tomado como sigue

$$\text{Cuando } \omega_m = 3000 \text{ rpm, } \omega_m = 16 R \quad (3.78 \text{ a})$$

$$\omega_m = 1500 \text{ rpm, } \omega_m = 12 R \quad (3.78 \text{ b})$$

$$\omega_m = 750 \text{ rpm, } \omega_m = 8 R \quad (3.78 \text{ c})$$

Caso (b): $\omega_n > \omega_m$

$$F = \frac{2F_{max}}{\sqrt{(1-\omega_m^2/\omega_n^2)^2 + (\frac{\Delta}{\pi})^2 (\omega_m^2/\omega_n^2)^2}} \quad (3.79)$$

Donde:

$$F_{max} = 1.0 R \quad \text{Para máquinas de 3000 rpm} \quad (3.80 \text{ a})$$

$$F_{max} = 0.8 R \quad \text{Para máquinas de 1500 rpm} \quad (3.80 \text{ b})$$

$$F_{max} = 0.5 R \quad \text{Para máquinas de 750 rpm} \quad (3.80 \text{ c})$$

Caso (c): Si ω_n se encuentra entre $\frac{\omega_m}{1-\alpha}$ and $\frac{\omega_m}{1+\alpha}$, entonces $\mu = \frac{\pi}{\Delta} \approx 8.0$.

De la ecuación (3.79),

$$F = 16R \text{ para } \omega_m = 3000 \quad (3.81 \text{ a})$$

$$F = 12 R \text{ para } \omega_m = 1500 \quad (3.81 \text{ b})$$

$$F = 8 R \text{ para } \omega_m = 750 \quad (3.81 \text{ c})$$

Los coeficientes de 1, 0.8 y 0.5 en la ecuación 3.80 corresponden al peor estado posible de balanceo del rotor, en el que las amplitudes se han aumentado cinco veces a los valores correspondientes a las condiciones normales de balanceo mostradas en la ecuación 3.69.

Para calcular la fuerza dinámica vertical que actúa en el punto medio de la viga transversal, el peso de rotación en la viga transversal (R_b) solo debe ser sustituida por R en la expresión citada arriba y para el cálculo de la fuerza dinámica horizontal que actúa transversalmente al nivel de la viga, el peso total de rotación ($R_b + R_c$), incluido el peso de rotación transferido de las vigas longitudinales en las columnas.

3.4.4. COMENTARIO DE LOS VARIOS MÉTODOS

De los tres métodos descritos anteriormente para el análisis de la vibración de las fundaciones tipo pórtico, el método combinado recomendado por Major es el más popular en las oficinas de diseño, debido a las siguientes ventajas:

- a. Combina las ventajas de los métodos de la resonancia y de la amplitud, controlando la aparición de la resonancia, así como la limitación de las amplitudes.
- b. Es responsable (aunque de forma conservadora) para la aparición de la resonancia transitoria que inevitablemente se produce en cimentaciones de baja sintonía.

3.5. DISEÑO ESTRUCTURAL

Después de evaluar la carga estática equivalente que se producen durante la operación de la máquina, el diseño estructural se realiza como en el caso estático. El diseño consiste en el cálculo de los momentos de flexión, esfuerzos cortantes, etc., en los miembros del pórtico, teniendo en cuenta la combinación crítica de los diferentes casos de carga que se muestran en la sección siguiente. La figura 3.10 muestra la vista esquemática de los diferentes casos de carga a considerar en el diseño.

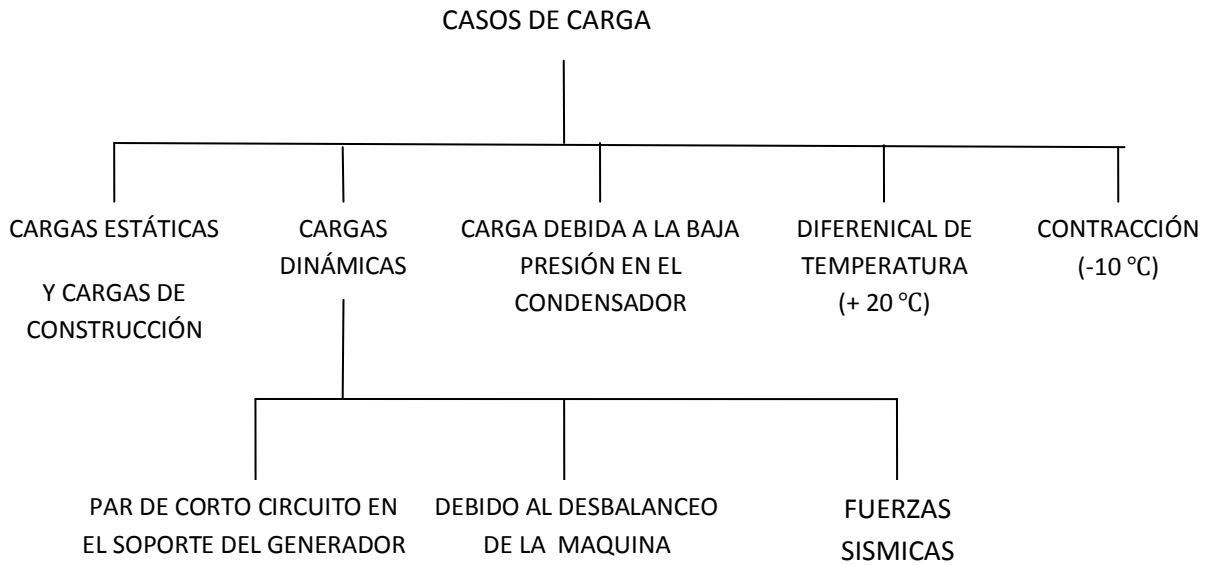


Figura 3.10 Casos de Carga

3.5.1. CASOS DE CARGA

El diagrama de carga suministrada por los ingenieros mecánicos da la magnitud, el punto de aplicación y la dirección de todas las cargas, tanto fijas como giratorias.

i. Cargas Muertas

Las cargas debidas al peso de la fundación y el pórtico se pueden determinar de la forma habitual.

Los datos de la tabla 3.5 han sido presentados, para mostrar dimensiones y material requerido aproximadamente. El peso de las piezas de rotación del generador se transmite siempre a través de los cojinetes, y nunca se transmite a través de los puntos de apoyo de partes fijas.

Tabla 3.5 Peso de los Rotores de Turbo-Generadores de Diferente Capacidad

Capacidad en kW	Peso total del equipo turbo-generador incluido los rotores (t)	Peso total de los rotores de turbinas y generadores (t)	Peso de los rotores en porcentaje del peso total (%)
500	12	2.8	23.0
1,500	20	4.4	22.0
3,000	40	8.0	20.0
5,000	62	12.0	19.5
6,000	70	13.0	19.0
10,000	100	18.6	18.6
12,000	110	20.0	18.0
25,000	180	31.5	17.5
50,000	300	50.0	16.6
100,000	500	83.0	16.0

ii. Cargas de Construcción

Las cargas de construcción sólo se producen cuando la máquina está siendo construida. Por consiguiente, no deben considerarse actuando simultáneamente con las cargas dinámicas que sólo se producen durante el funcionamiento de la máquina. Las cargas de la construcción son generalmente consideradas como una carga uniformemente distribuida que van desde 1000 kg/m² a 3000 kg/m², dependiendo del tamaño de la unidad de la máquina.

iii. Cargas Dinámicas

Las cargas dinámicas ejercidas sobre la cimentación son de dos tipos:

- Fuerzas centrífugas (igual a $m\epsilon\omega_m^2$, donde m es la masa desbalanceada, ϵ es la excentricidad y ω_m la frecuencia de rotación circular) causadas por la rotación de los rotores que tienen masas balanceadas de manera imperfecta con respecto a su eje de rotación. Esta es una fuerza periódica.
- Las cargas que son impulsivas (como choque) en la naturaleza y que actúan de forma irregular

Los efectos dinámicos causados por la falta de balanceo de la máquina ya han sido mencionados en el subcapítulo 3.4.2 numeral i.

Las cargas impulsivas, son causadas por el efecto magnético mutuo entre el estator y el rotor. El impacto, que está en la forma de par conocido como "momento de corto-circuito", tiende a romper el estator fuera de la fundación y esto impone cargas verticales en las vigas longitudinales de apoyo del estator del generador. Los proveedores de máquinas por lo general suministrar información que conduzca a la

determinación de esta carga impulsiva. Si no existen datos precisos disponibles, el momento de corto circuito (M) se puede tomar empíricamente como cuatro veces la capacidad nominal (en MW) de la unidad turbo-generador.

La siguiente fórmula puede usarse también

$$M = \frac{RDN}{3000} \quad (3.82)$$

Donde:

R es el peso del rotor (en t)

D es el diámetro de la carcasa del generador (en m)

N es la frecuencia de rotación (en rpm)

iv. Cargas Debidas a la Baja Presión en el Condensador

A causa de la baja presión dentro del condensador, se produce un efecto de succión entre el condensador y la turbina. Si la conexión entre ambos elementos es rígida, la succión no provoca ninguna fuerza sobre los marcos de cimentación; por el contrario, si la conexión es flexible, se incrementarían las fuerzas en los apoyos de la turbina. En este caso, la fuerza total debida a la succión, si no es suministrada por el fabricante, puede evaluarse con la fórmula siguiente:

$$P = A(p_1 - p_2) \quad (3.83)$$

Donde A es el área transversal del ducto que conecta la turbina con el condensador, y $(p_1 - p_2)$ es la diferencia entre la presión atmosférica externa y la presión dentro del condensador. Esta diferencia de presiones puede tomarse igual a 10 t/m²

v. Efectos de Temperatura y Contracción

Al diseñar una cimentación formada por marcos, debe tomarse en cuenta el efecto de la expansión térmica y de la contracción diferencial. Cuando no se disponga de datos más precisos, puede suponerse una diferencia de 20° C, entre las temperaturas de las losas superior e inferior. Además, puede suponerse una diferencia de temperaturas de 20° C entre las caras externa e interna de la losa superior. Para tomar en cuenta la contracción de la losa superior con respecto a la

contracción de la inferior, puede recurrirse al artificio de suponer una diferencia de temperaturas entre ambas de 10° C; si los marcos se van a colocar más de dos meses después de colar la losa de base, se supondrá una diferencia de temperaturas de 15° C.

vi. Fuerza Debida al Efecto Sísmico

El efecto sísmico, generalmente es considerado como una fuerza lateral actuando en cada pórtico transversal de la cimentación. La determinación de esta fuerza depende de la zona sísmica en la cual se localizará la cimentación.

Para el diseño de cimentaciones sismo resistentes localizadas en el país, deberá cumplirse con el capítulo 12 del Código Ecuatoriano de la Construcción

3.5.2. DISEÑO DE LOS PÓRTICOS TRANSVERSALES

Los momentos flectores, los esfuerzos cortantes, etc. en los miembros de los pórticos son evaluados en forma separada para cada uno de los caso de carga mostrados en la sección 3.5.1. Para el diseño se utiliza la combinación crítica de los varios casos de carga.

Es conveniente tomar en cuenta la rigidez de los nudos de los pórticos, si los nudos se consideran articulados, pueden considerarse h_0, l_0 en el cálculo de momentos flectores y flechas, si se considera que los nudos son rígidos, debe calcularse con h_1 y l_1 , ver figura 3.11

En cimentaciones usuales $l_0 \geq 1.20l_1$, por lo cual las frecuencias naturales calculadas del pórtico, se ven fuertemente influenciadas por la elección de las dimensiones elegidas para el análisis (por ejemplo si $l_0 = 5.5$ m y $l_1 = 4.0$ m, la frecuencia natural calculada puede fácilmente ser dos veces menor para l_0 que para l_1).

Como los nudos del pórtico no son ni absolutamente flexibles, ni absolutamente rígidos, los valores de los claros l y h para el análisis estarán comprendidos entre l_0 y l_1 , para l , y entre h_0 y h_1 , para h . Entonces las dimensiones efectivas se pueden estimar de las fórmulas.

$$l = l_0 - 2X \propto \tag{3.84}$$

$$h = h_0 - Z \propto \tag{3.85}$$

Donde

l longitud efectiva de la viga

l_o longitud de la viga si el nudo del pórtico se considera articulado

h altura efectiva de la columna

h_o altura de la columna si el nudo del pórtico se considera articulado

X y Z están marcadas en la figura 3.11

α es un factor que se determina de la figura 3.12

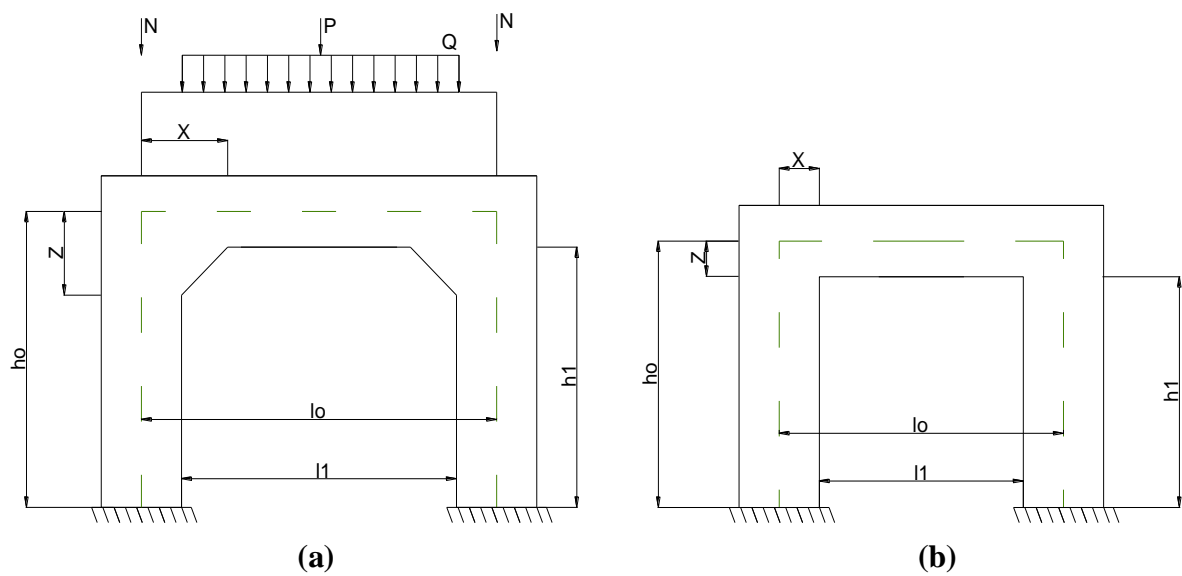


Figura 3.11 Sección Típica de un Pórtico Transversal

(a) Con Acartelamiento (b) Sin Acartelamiento

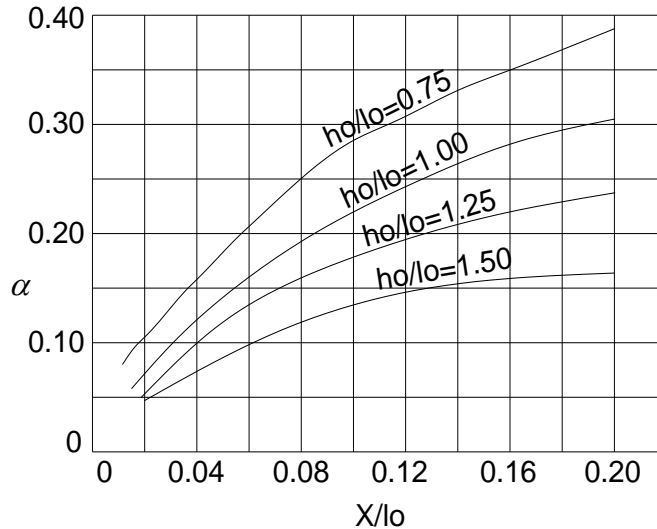


Figura 3.12 Grafica para Determinar el Coeficiente α para Pórticos Acartelados

Puede encontrar que las secciones de los miembros de la fundación, tal como se indica en los planos suministrados por los fabricantes sean demasiado grandes para los momentos inducidos y esfuerzos de corte en estos miembros. De acuerdo a códigos estándar sobre el tema, como mínimo todas las secciones de los miembros de la cimentación deberán tener 50 kg de acero por metro cubico de hormigón.

3.5.3. DISEÑO DE LOS PÓRTICOS LONGITUDINALES

El análisis de los pórticos longitudinal se lleva a cabo por cualquiera de los métodos bien conocidos para los diferentes casos de carga que se indican a continuación y el refuerzo se proporciona consecuentemente.

- a. Las cargas estáticas incluidas el peso de las vigas longitudinales y cargas de la máquina mostradas en el diagrama de cargas.
- b. Par de corto circuito, como carga distribuida sobre el soporte del generador.
- c. Efecto de vacío del condensador. Si la conexión del condensador con la turbina es rígida, no necesitan ser considerados.
- d. Las cargas de construcción consideradas como carga distribuida en las plataformas que sobresalen de las vigas longitudinales. En general, esto puede ser tomado como 2000 Kg/m².
- e. La fuerza dinámica vertical (en su caso) actuando sobre la viga longitudinal.
- f. La mitad de la fuerza dinámica horizontal, que se considera actuando en el eje longitudinal de la viga
- g. Diferencial de temperatura de 20 °C entre la losa superior y la losa inferior de la cimentación.
- h. Contracción correspondiente a una caída de temperatura de 10 °C.
- i. Fuerzas sísmicas (sólo las fuerzas horizontales deben ser consideradas.)

Para considerar la combinación crítica de los momentos debido a varias cargas, los siguientes puntos deben tenerse en la mente.

- a. Las cargas de construcción no deben ser considerados actuando con las cargas dinámicas. El primero sólo se producen cuando la máquina está siendo montado o en reposo.
- b. Las cargas dinámicas verticales y horizontales no debe ser considerado al mismo tiempo.
- c. Dado que los efectos de la temperatura y la contracción son mutuamente de naturaleza opuesta, no pueden considerarse conjuntamente en la evaluación de los momentos netos.
- d. Los efectos del sismo y las fuerzas dinámicas de la máquina pueden considerarse juntos

3.5.4. DISEÑO DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN

La superficie de base de la losa de cimentación debe ser tal que la presión de apoyo máxima sobre el suelo no sea mayor que la presión admisible. De haber encontrado la presión del suelo y la carga transmitida por cada columna, el diseño estructural de la losa de cimentación se realiza como una losa de cimentación común.

3.6. DETALLES CONSTRUCTIVOS

Deben respetarse los requisitos básicos establecidos en el reglamento de construcción vigente. Además, se tendrán en cuenta las disposiciones siguientes, que son especialmente aplicables a las cimentaciones de maquinaria.

3.6.1. HORMIGÓN

En cimentaciones de bloque debe usarse hormigón con resistencia especificada, $f'c$, no menor de 150 kg/cm²; en la superestructura (columnas, vigas y losas superiores) de cimentaciones formadas por marcos, la resistencia $f'c$ no debe ser menor de 200 kg/cm². El hormigón utilizado será de consistencia plástica

(revenimiento de 10 a 12 cm).

Las cimentaciones de bloque y las losas de base de cimentaciones formadas por marcos, deben colarse en capas horizontales. La superestructura se colará, de preferencia, en una sola operación. En las interrupciones de colado deben tomarse las siguientes precauciones:

- Realizarse en el nivel de losa de cimentación o en el tercio inferior de la altura de las columnas.
- Si la interrupción queda obligada en la losa o estructura, la unión debe reforzarse con estribos.

El hormigón debe colocarse directamente sobre la cimbra. No debe dejarse caer de una altura excesiva, para evitar segregación. Debe muestrearse el hormigón para pruebas de resistencia, llevando un registro de la zona en la que se aplicó.

La localización de las juntas de construcción debe ser definida por el proyectista, para lograr la máxima continuidad en las juntas de construcción, se recomienda dejar ahogadas barras que crucen la junta y formar entrantes y salientes en la unión; además, la superficie de hormigón endurecido debe ser rugosa y debe limpiarse y humedecerse antes de colar el hormigón nuevo.

Se recomienda proteger los bordes de la cimentación con ángulos de acero anclados en el hormigón.

3.6.2. REFUERZO

Se colocarán barras de refuerzo en todas las superficies, y alrededor de toda abertura, agujero, entrante, etc., que haya en el cuerpo de la cimentación. El refuerzo principal se calculará a partir de las solicitaciones que actúen sobre la cimentación. En las cimentaciones de bloque y en las losas de base de cimentaciones formadas por marcos, el refuerzo se colocará en tres direcciones. En cimentaciones de bloque, el refuerzo mínimo será de 25 kg por metro cubico, es

usual que el refuerzo horizontal en cada dirección conste de barras de 16 mm de diámetro (No 5) separadas 20 cm vertical y horizontalmente; o bien de barras de 25 mm de diámetro (No 8) a cada 30 cm.

En las losas de base de cimentaciones formadas por marcos, el refuerzo mínimo será de 50 kg por metro cubico de hormigón. Las barras que se coloquen alrededor de las aberturas, agujeros, entrantes, etc. deben prolongarse 40 veces su diámetro mas allá de los puntos de cruce entre dichas barras. Alrededor de las aberturas el acero de refuerzo provisto, deberá ser igual al 0.5 – 0.75% de la sección transversal de la abertura.

Con objeto de facilitar la determinación aproximada de la cantidad de hormigón reforzado requerido para cimentaciones tipo pórtico en función de la capacidad de salida del turbo-generador, se presenta la tabla 3.5

Tabla 3.7 Cantidad Aproximada de Hormigón Armado en m³

Capacidad del turbo-generador en kW	La parte superior	La parte inferior	Total
	Metros cúbicos m ³		
1.000	30-40	30-40	60-80
3.000	60-80	60-80	120-150
5.000	-----	-----	-----
6.000	70-110	130-150	185-250
10.000	140	155	295
12.000	160-180	120-270	250-330
25.000	180-240	270-360	460-600
50.000	430-460	700-800	1.100-1.200
100.000	900	900-1800	1.800-2.700

3.6.3. JUNTAS DE EXPANSION

Las cimentaciones de maquinaria deben separarse de los elementos estructurales adyacentes, a fin de evitar la trasmisión de las vibraciones. Cuando no pueda evitarse que la cimentación de una máquina quede en contacto con algún elemento estructural, se colocarán dos capas de fieltro entre ambas superficies.

3.6.4. ELEMENTOS DE SUJECIÓN

Generalmente una máquina se une a su cimentación por medio de pernos de

anclaje. Estos se unen a la placa de base de la máquina pasando a través de ella y se ahogan en el hormigón de la cimentación. El colado de la cimentación debe interrumpirse algunos centímetros abajo del nivel inferior de la placa de base. Para placas de base de 20 a 30 cm de ancho, este espacio será usualmente de 2 a 3 cm verticalmente. Para placas más anchas podrá ser hasta de 5cm.

Si la máquina es pequeña, los pernos se sujetan con tuercas a una placa-patrón que tiene los mismos agujeros que la placa de base de la máquina, y se sujetan al refuerzo de la cimentación. Después se cuele la cimentación y, una vez que ha endurecido el hormigón, se retira la placa-patrón. Posteriormente se coloca la placa de base de la máquina, se nivela y se llena con mortero el hueco que había quedado bajo la placa de base. Este colado debe hacerse hasta que ya haya ocurrido la contracción del hormigón de la cimentación. El mortero de relleno debe llevar un aditivo estabilizador de volumen.

En maquinas grandes es preferible dejar agujeros en el bloque de cimentación para los pernos. En este caso, los pernos se sujetan a la placa de base de la máquina y ésta se coloca en su posición, entrando los pernos en sus agujeros; después se nivela y se alinea la placa de base, y se llenan con mortero los agujeros y el espacio que había quedado bajo la placa de base. El mortero debe llevar un aditivo estabilizador de volumen. Estas operaciones se realizarán hasta que ya haya ocurrido la contracción del hormigón de la cimentación. Los agujeros para los pernos pueden ser circulares o cuadrados, de alrededor de 15 cm de diámetro o de lado. Debe dejarse un recubrimiento de por lo menos 8 cm desde la orilla del agujero hasta el borde más próximo de la cimentación. Generalmente bastará que la longitud ahogada del perno sea de entre 30 y 40 veces su diámetro. Si el espesor de la cimentación no permite lo anterior, en el extremo del perno se hará una cabeza de anclaje. La localización de los agujeros para los pernos debe hacerse siempre con relación a los ejes de la máquina, los cuales deben estar claramente localizados. La maquinaria no debe funcionar hasta quince días después de haber colado el espacio bajo la placa de base.

CAPÍTULO IV

CÁLCULO Y DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN TIPO PÓRTICO MEDIANTE UN MODELO EN SAP 2000.

4.1. ANTECEDENTES

Como parte complementaria del manual se presenta un ejemplo práctico del análisis y diseño de una Cimentaciones Tipo Pórtico para un equipo turbogenerador de 25000 kW de capacidad y una frecuencia de 3000 rpm.

Este equipo consta de un generador, una turbina y un condensador, dispuestos en el orden mencionado, la línea de eje del generador está desfasada 0.60 m y a un nivel 0.63 m mayor, con respecto a los otros equipos.

Este capítulo reúne los criterios y la metodología que sirvieron de base para el análisis de las acciones de las cargas y solicitaciones que actuarán sobre la cimentación del turbo generador.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO ESTRUCTURAL

Las dimensiones en planta de la cimentación son de 14.30 m de longitud por 5.80 m de ancho, la altura total de la estructura y cimentación en su punto más alto es de 4,60m.

La estructuración de la cimentación es típica, conformada por una losa inferior de forma rectangular de 0.80 m de espesor, cinco muros de 2.30 m de espesor en los que se apoya la losa superior y además permiten dejar accesos a la cimentación, para el posterior montaje y mantenimiento del equipo dinámico, la losa superior posee 1.50 m de espesor en la parte del generador y 0.95 m de espesor en la parte de la turbina.

La cimentación deberá estar desplantada a una profundidad de 1.50 m sobre un lecho de suelo natural compactado, la losa se fundirá sobre una capa de replantillo (hormigón pobre) de 10 cm de espesor para evitar la contaminación del suelo a más de

garantizar el sello e inalterabilidad de las características físico-mecánicas del suelo de fundación. La capacidad admisible del terreno para cargas estáticas a este nivel se consideró igual a 20 t/m².

La cimentación se estudió mediante el programa SAP 2000, usando elementos shell que en el modelo matemático representan a esta, y el método de análisis basado en la teoría de elementos finitos, la cual básicamente es dividir el elemento en cuestión en partes pequeñas. Cada elemento discretizado posee las siguientes características:

- Geometría: sistema de referencia.
- Material: ley constitutiva.
- Condiciones de frontera esenciales: apoyos.
- Condiciones de frontera naturales: cargas.

Una característica importante de los elementos shell es que nos permiten discretizar cuanto nosotros queramos a los elementos que estamos representando, la división se la hizo en función de que los puntos de aplicación de las cargas estén sobre nudos y en función de la disposición misma de las losas y muros de la cimentación, el programa permite modelar la cimentación ante las solicitaciones estáticas y de operación de la turbina, posteriormente permite determinar la respuesta de esta ante tales solicitaciones.

4.3. SOLICITACIONES

Para el análisis y el diseño estructural se han considerado las siguientes solicitaciones recomendadas por los códigos aceptados internacionalmente.

Tabla 4.1 Peso específico de cargas muertas

CARGAS MUERTAS	
Material	Peso
Hormigón armado	2400 kg/m ³
Acero	7850 kg/m ³

El peso propio de los diferentes elementos estructurales de la cimentación se lo consideró automáticamente en el programa.

Adicionalmente se consideran todas las cargas que los fabricantes suministran en los planos respectivos. Las cargas estáticas, de operación normal y de corto circuito se consideran como cargas vivas así como también el peso del suelo de relleno sobre la losa de cimentación.

4.4. MATERIALES

4.4.1. HORMIGÓN

Las estructuras de hormigón armado fueron diseñadas para las siguientes resistencias a la compresión:

- $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$ hormigón de limpieza “Replanto”
- $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ hormigón estructural en losas y muros

4.4.2. ACERO

Consistirá en varilla milimetrada corrugada con un límite de fluencia

- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.

4.5. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS LATERALES DE DISEÑO MÍNIMAS

La determinación de esta fuerza es determinada en función de los códigos vigentes referentes a diseño sísmico de la zona en la cual se localizará la cimentación.

Para el diseño de cimentaciones sismo resistentes localizadas en el país, deberá cumplirse con el capítulo 12 del Código Ecuatoriano de la Construcción.

$$V = \frac{Z * I * C}{R * \phi_P * \phi_E} * W \quad (4.1)$$

Donde:

V = Fuerza cortante en la base

Z = Factor de zona sísmica, Quito = 0.40

I = Importancia de la estructura.

Estructuras que albergan equipos de generación = 1.50

ϕ_p = Factor de configuración estructural en planta = 1.00

ϕ_E = Factor de configuración estructural en elevación = 1.00

S = Factor de suelo. Suelo S3, suelos blandos y estratos profundos = 1.50

T = Periodo de vibración. Periodo fundamental de la estructura de cimentación, de la tabla 4.11. T = 0.156 s

C = $(1.25 * S^5) / T = 14.72$ Límite superior Cm = 2,80

R = Factor de reducción de respuesta estructural = 6

W = Cargas de operación normal en los cojinetes y el peso de la estructura

$$V = \frac{0.40 * 1.50 * 2.80}{6 * 1 * 1} * W$$

$$V = 0.280 * W$$

Para estructuras diferentes a estructuras de edificación, el C.E.C, estipula que el cortante basal de diseño no sea menor que

$$V = 0.48 * Z * I * W \quad (4.2)$$

$$V = 0.48 * 0.40 * 1.50 * W \rightarrow V = 0.288 * W$$

Ni tampoco menor que $V = \frac{1.14}{R} * Z * I * W = \frac{1.14}{6} * 0.40 * 1.50 = 0.114 * W$

El valor del cortante basal escogido es 0,288*W, por hacer referencia especial a estructuras como cimentaciones y por ser el valor crítico.

4.6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.6.1. CREACIÓN DEL MODELO

4.6.1.1. Tipología Geométrica

En función de la configuración del turbogenerador, definimos la grilla, que posteriormente nos permitirá trazar la forma geométrica de la cimentación que necesitamos.

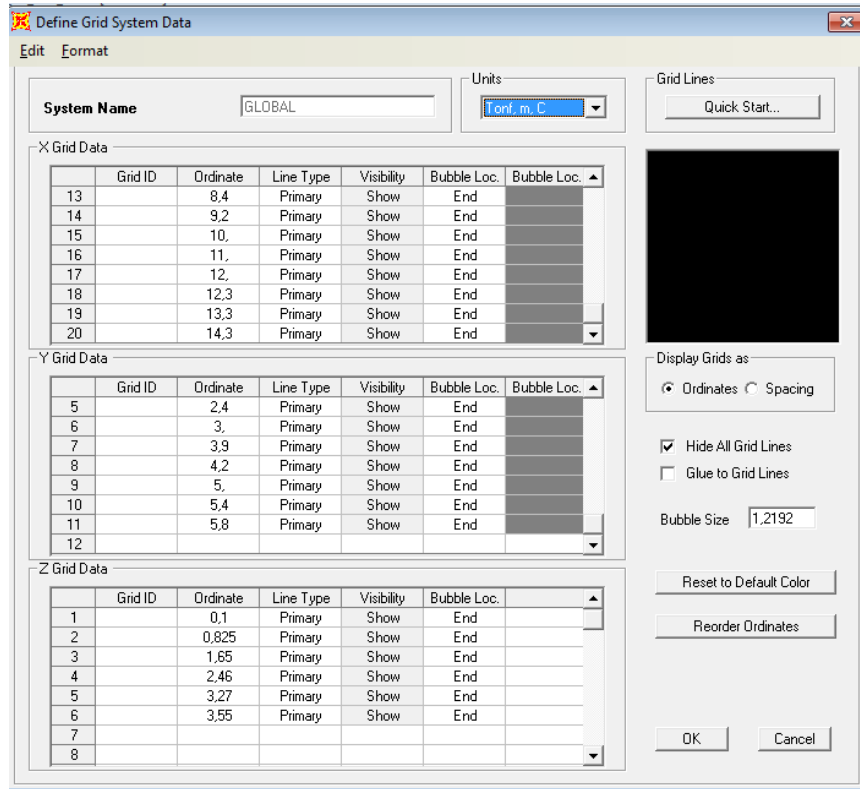


Figura 4.1 Definición de grilla

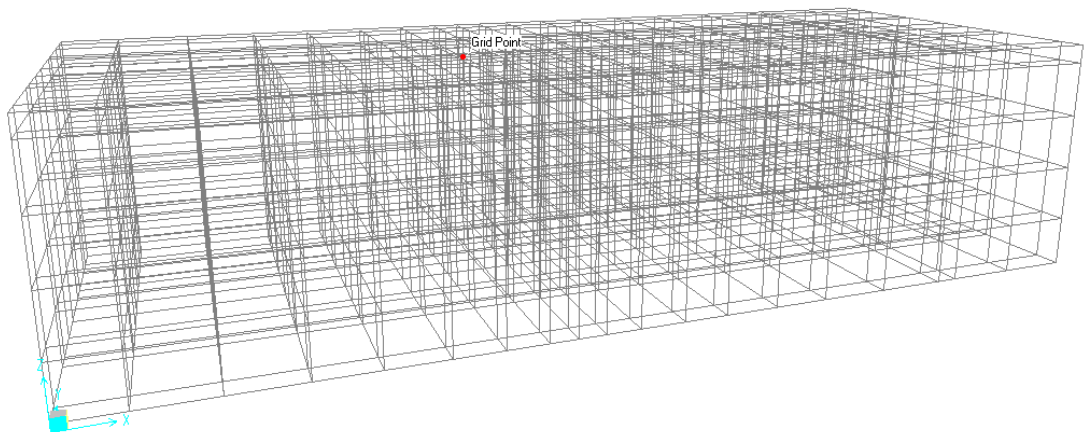


Figura 4.2 Grilla en 3D

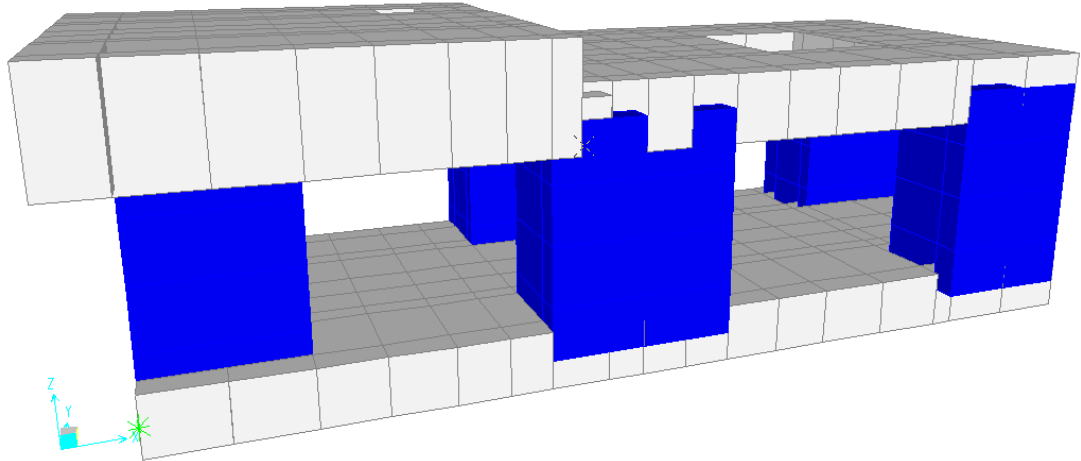


Figura 4.3 Geometría de cimentación tipo pórtico

4.6.1.2. Definición de Materiales

El material utilizado es hormigón de resistencia característica a la compresión $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, todas las propiedades del material se muestran en la siguiente figura.

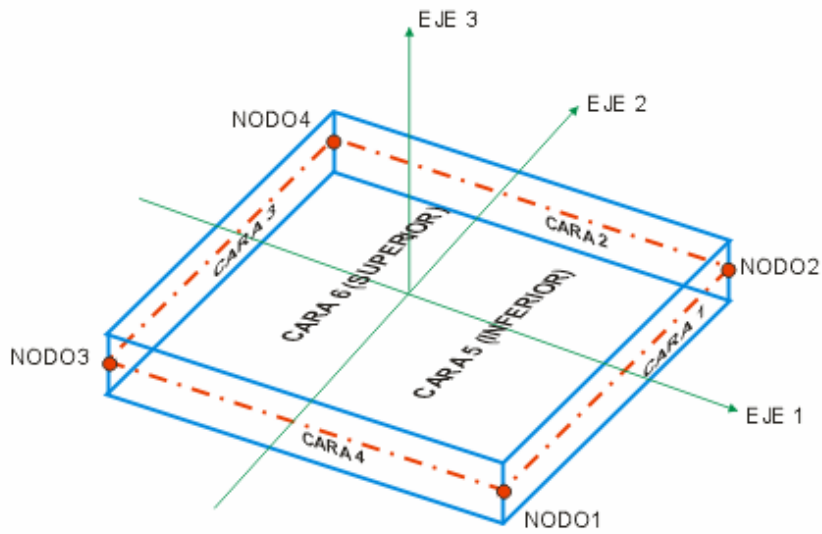
Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	CONC
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	2.403E-03
Mass per Unit Volume	2.450E-06
Units: Kgf. cm. C	
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	253105,07
Poisson's Ratio, U	0,2
Coefficient of Thermal Expansion, A	9.900E-06
Shear Modulus, G	105460,45
Other Properties for Concrete Materials	
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	240,
<input type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Figura 4.4 Definición de material

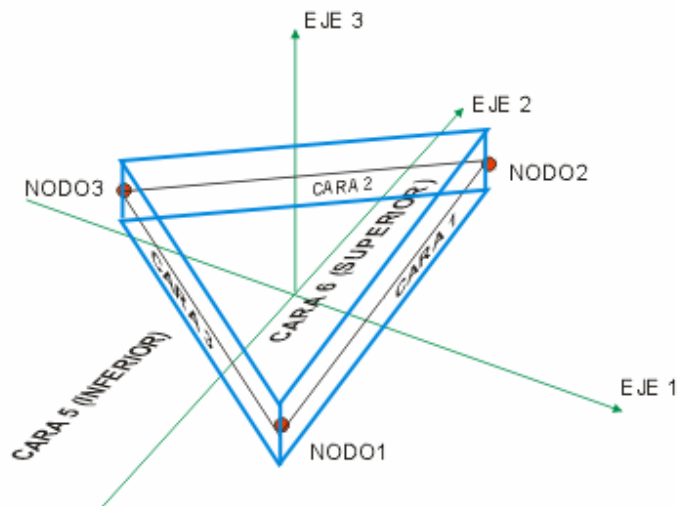
4.6.1.3. Definición de Secciones

Se definen secciones de área tipo Shell, a continuación presentamos una descripción de este tipo de elementos, para posteriormente escoger la sección que modele un comportamiento estructural similar al que presentarán los elementos de cimentación.

i. Geometría de elementos tipo shell



(a)



(b)

Figura 4.5 Geometría de elementos Shell

(a) De 4 nodos **(b)** De 3 nodos

ii. Clases de elementos tipo shell

- **Elemento Membrana:**

Permite deformaciones axiales y rotación alrededor del eje local 3. Se utiliza para modelar: muros de cortante, cúpulas, cascarones cilíndricos, paraboloides hiperbólicos.

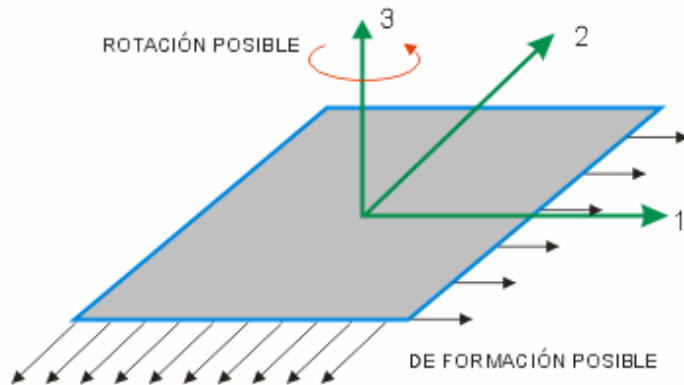
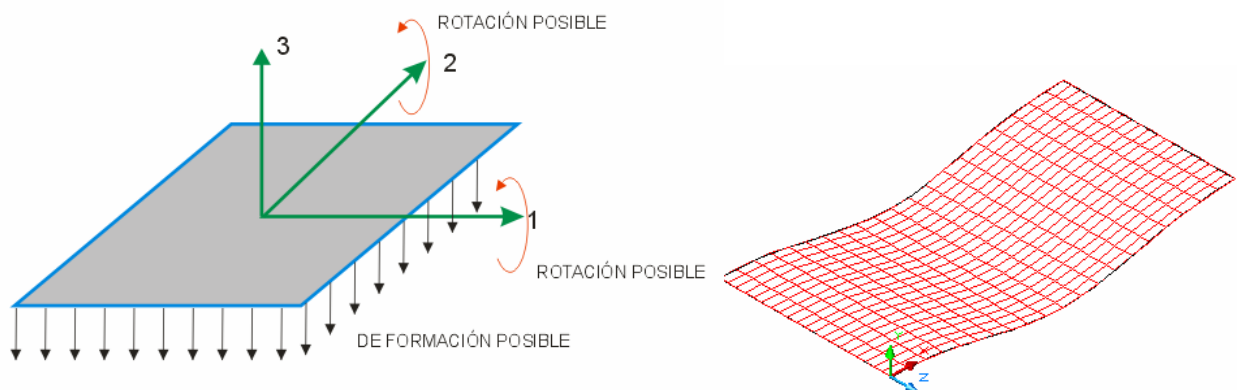


Figura 4.6. Grados de libertad elemento membrana

- **Elemento Placa:**

Permite deformaciones en el eje 3 solamente y rotación en los ejes locales 1 y 2. Se utiliza para modelar: placas de entrepiso, muros de contención, los cuales están sujetos a deformaciones por flexión.



(a)

(b)

Figura 4.7. Elemento tipo placa

(a) Grados de libertad elemento placa, (b) Deformaciones elemento placa

- **Elemento Shell:**

Es la combinación del comportamiento de los elementos anteriormente descritos, es decir permite rotaciones y desplazamientos alrededor de todos los ejes locales del elemento. En cada nodo se obtienen 5 grados de libertad con deformación (tres traslaciones y dos rotaciones). Se recomienda utilizar siempre este elemento. El elemento Shell se puede utilizar para modelar: muros, placas, vigas de gran altura, etc.

iii. Creación de la sección del elemento Shell

Los siguientes parámetros deben definirse en el programa SAP 2000 para crear el elemento Shell:

- **Section Name:**

Asigna el nombre a la sección, para nuestro modelo hemos definido cuatro secciones, LOSACIM, LOSA TURB, LOSA GEN Y MURO, esto se puede observar en la figura 4.8.

- **Type:**

Define que tipo de comportamiento será considerado por el elemento. Para modelar la cimentación se recomienda la selección de tipo Shell, se complementa la opción Thin y Thick, la primera opción para elementos de espesor menor que se considera su deformación es controlada por flexión, y la segunda para placas gruesas donde su deformación se da por flexión y corte.

- **Material Name:**

Material del cual está compuesta la sección, asignamos el material creado en el numeral 4.6.1.2, hormigón de resistencia característica a la compresión $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$.

- **Material Angle:**

Se utiliza cuando se trabaja con materiales ortotrópicos.

- **Thickness:**

Se refiere al espesor de la sección.

Membrane (th):

Es el espesor de muro o losa que se asigna al eje principal del muro o losa (paralelo al eje de trabajo), se utiliza para calcular la rigidez del elemento shell y membrana, así como para calcular el peso propio y la masa de cada sección. Espesor para la deformación axial.

Bending (thb):

Es el espesor en el eje secundario (perpendicular al eje de trabajo), se utiliza para calcular la rigidez para la flexión en elemento shell y placa. Espesor para la deformación a flexión y a corte.

Normalmente los valores Membrane y Bending son iguales.

iv. Secciones definidas para el modelo de la cimentación

A continuación se muestra la pantalla con las secciones tipo shell definidas para el modelo.

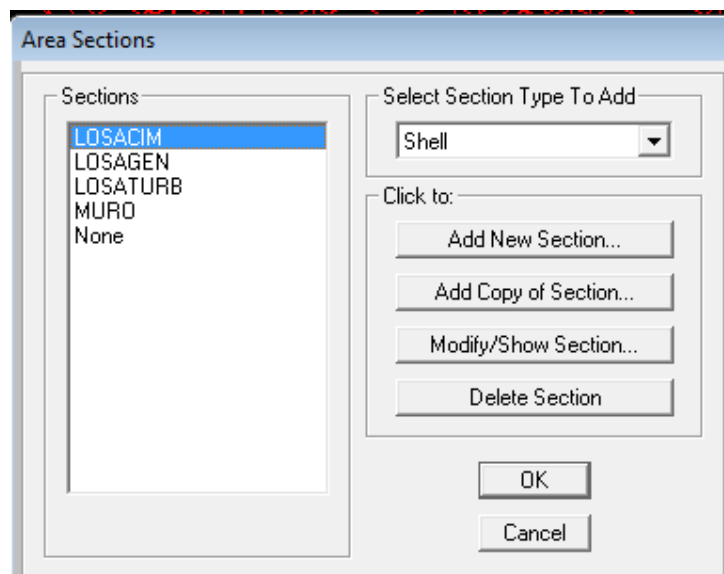
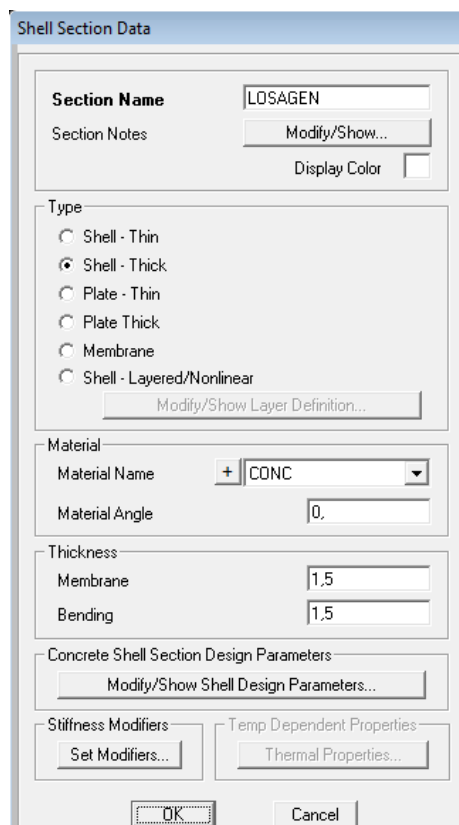
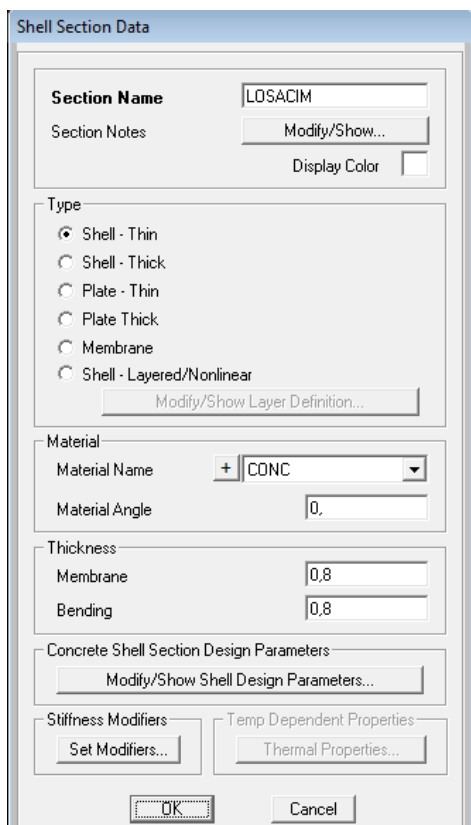


Figura 4.8 Secciones definidas para el modelo

La sección LOSACIM, está definida para la losa de cimentación, la sección LOSAGEN está definida para la losa del generador, la sección LOSATURB está definida para la losa de la

turbina y la sección MURO está definida para los 5 muros de la cimentación.



Shell Section Data

Section Name

Section Notes

Display Color

Type

- Shell - Thin
- Shell - Thick
- Plate - Thin
- Plate Thick
- Membrane
- Shell - Layered/Nonlinear

Material

Material Name

Material Angle

Thickness

Membrane

Bending

Concrete Shell Section Design Parameters

Stiffness Modifiers

Temp Dependent Properties

Shell Section Data

Section Name

Section Notes

Display Color

Type

- Shell - Thin
- Shell - Thick
- Plate - Thin
- Plate Thick
- Membrane
- Shell - Layered/Nonlinear

Material

Material Name

Material Angle

Thickness

Membrane

Bending

Concrete Shell Section Design Parameters

Stiffness Modifiers

Temp Dependent Properties

Figura 4.9 Propiedades de cada sección tipo shell definida para el modelo

4.6.1.4. Asignación de Cargas

Las cargas actuantes sobre la cimentación y que se encuentran definidas en el modelo son las siguientes.

- i. Peso propio de la estructura de cimentación **DEAD**
- ii. Carga estática del turbogenerador (peso de la máquina) **STATIC**
- iii. Carga de operación normal del turbogenerador **OPERAT**
- iv. Carga de corto circuito del turbogenerador **SHORTCIR**
- v. Carga sísmica en sentido X **SEISMICX**
- vi. Carga sísmica en sentido Y **SEISMICY**
- vii. Carga viva **LIVE**
- viii. Peso del suelo de relleno **REFILL**
- ix. Acción dinámica **A. DINAMIC**

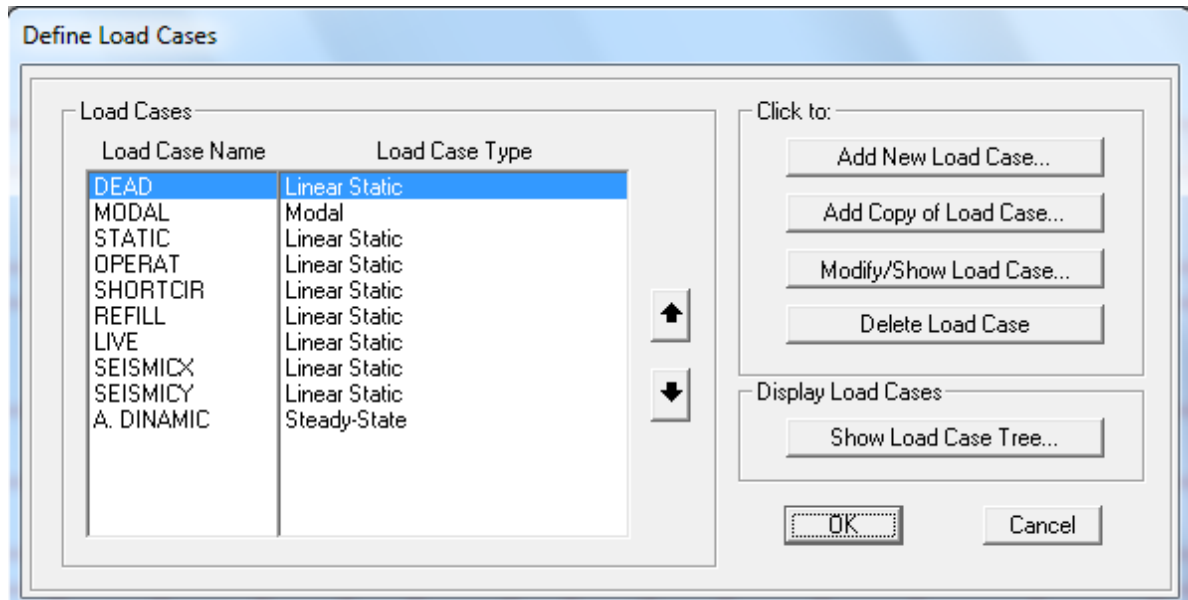


Figura 4.10 Definición de estados de carga

- i. **Peso propio**

El peso propio de la estructura de cimentación lo determina automáticamente el programa y es igual a 555.13 t

ii. **Carga estática (peso del turbogenerador)**

Tabla 4.2 Cargas estáticas en la cimentación

JUNTA	COORDENADAS GLOBALES			LOADPAT	F1	F2	F3	M1	M2	M3
Text	X (m)	Y (m)	Z (m)	Text	t	t	t	t.m	t.m	t.m
423	7.1	1.5	3.27	STATIC	0	0	-5.7104	0	0	0
425	8.4	1.5	3.27	STATIC	0	0	-5.7104	0	0	0
427	10	1.5	3.27	STATIC	0	0	-5.7104	0	0	0
430	12.3	1.5	3.27	STATIC	0	0	-7.5459	0	0	0
431	13.3	1.5	3.27	STATIC	0	0	-7.5459	0	0	0
469	8.4	3	3.27	STATIC	0	0	-19.9864	0	0	0
474	13.3	3	3.27	STATIC	0	0	-9.9932	0	0	0
497	7.1	4.2	3.27	STATIC	0	0	-7.5459	0	0	0
501	10	4.2	3.27	STATIC	0	0	-7.5459	0	0	0
504	12.3	4.2	3.27	STATIC	0	0	-7.5459	0	0	0
505	13.3	4.2	3.27	STATIC	0	0	-7.5459	0	0	0
572	2.8	1.5	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0

573	3.66	1.5	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0
575	5.22	1.5	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0
577	6.2	1.5	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0
608	2.8	3.9	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0
609	3.66	3.9	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0
611	5.22	3.9	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0
613	6.2	3.9	3.55	STATIC	0	0	-6.4548	0	0	0

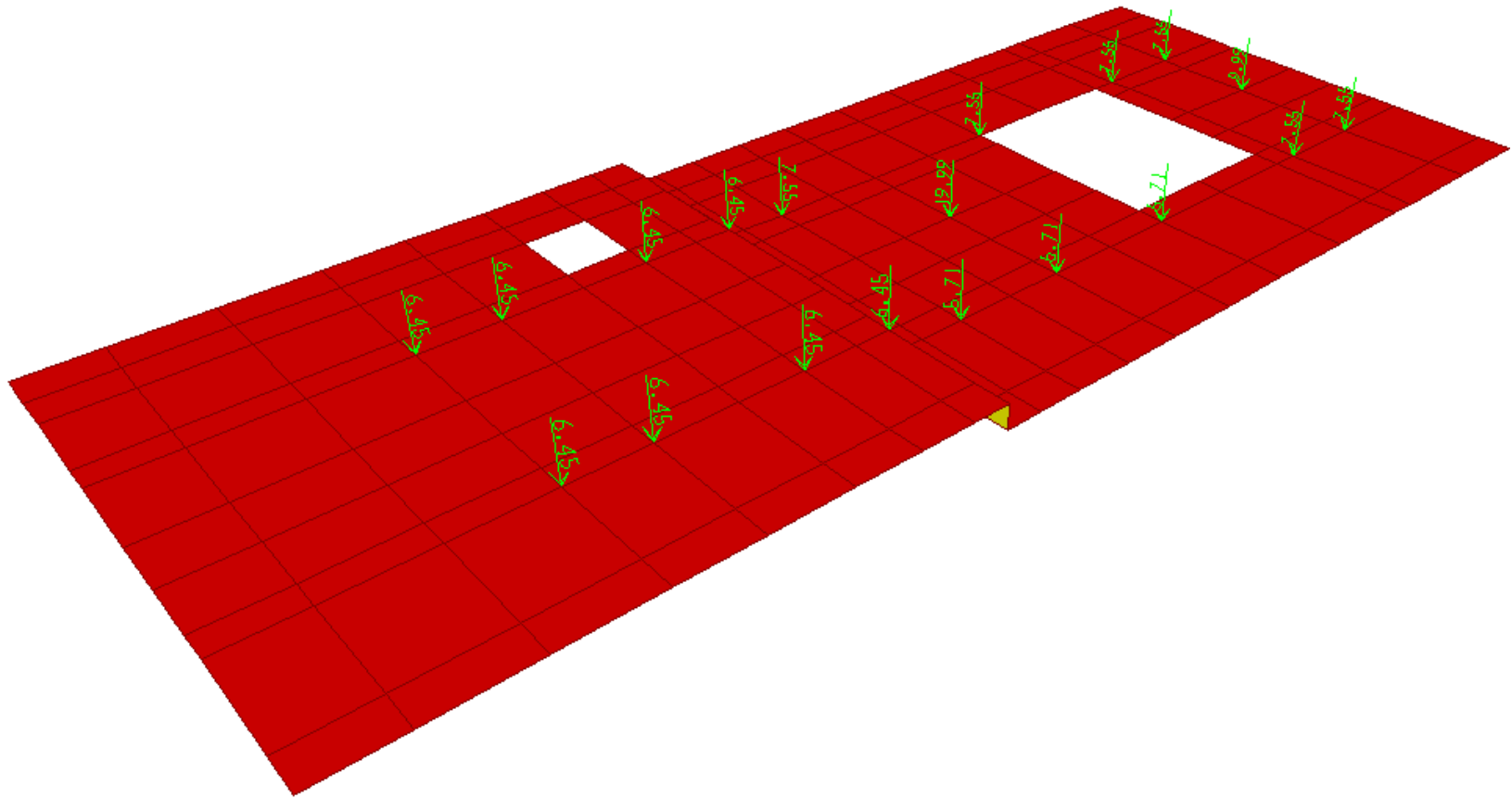


Figura 4.11 Cargas estáticas en la cimentación

iii. **Carga de operación normal del turbogenerador**

Tabla 4.3 Cargas de operación en la cimentación

JUNTA	COORDENADAS GLOBALES			LOADPAT	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	X (m)	Y (m)	Z (m)							
423	7.1	1.5	3.27	OPERAT	0	0	-6.1183	0	0	0
425	8.4	1.5	3.27	OPERAT	0	0	-6.1183	0	0	0
427	10	1.5	3.27	OPERAT	0	0	-6.1183	0	0	0
430	12.3	1.5	3.27	OPERAT	0	0	-8.4636	0	0	0
431	13.3	1.5	3.27	OPERAT	0	0	-8.4636	0	0	0
469	8.4	3	3.27	OPERAT	0	0	-19.9864	0	0	0
474	13.3	3	3.27	OPERAT	0	0	-2.9572	0	0	0
497	7.1	4.2	3.27	OPERAT	0	0	-10.911	0	0	0
501	10	4.2	3.27	OPERAT	0	0	-10.911	0	0	0
504	12.3	4.2	3.27	OPERAT	0	0	-6.5262	0	0	0
505	13.3	4.2	3.27	OPERAT	0	0	-6.5262	0	0	0
572	2.8	1.5	3.55	OPERAT	0	0	-6.4854	0	0	0

573	3.66	1.5	3.55	OPERAT	0	0	-3.9463	0	0	0
575	5.22	1.5	3.55	OPERAT	0	0	-3.9463	0	0	0
577	6.2	1.5	3.55	OPERAT	0	0	-6.4854	0	0	0
608	2.8	3.9	3.55	OPERAT	0	0	-6.4854	0	0	0
609	3.66	3.9	3.55	OPERAT	0	0	-8.9633	0	0	0
611	5.22	3.9	3.55	OPERAT	0	0	-8.9633	0	0	0
613	6.2	3.9	3.55	OPERAT	0	0	-6.4854	0	0	0

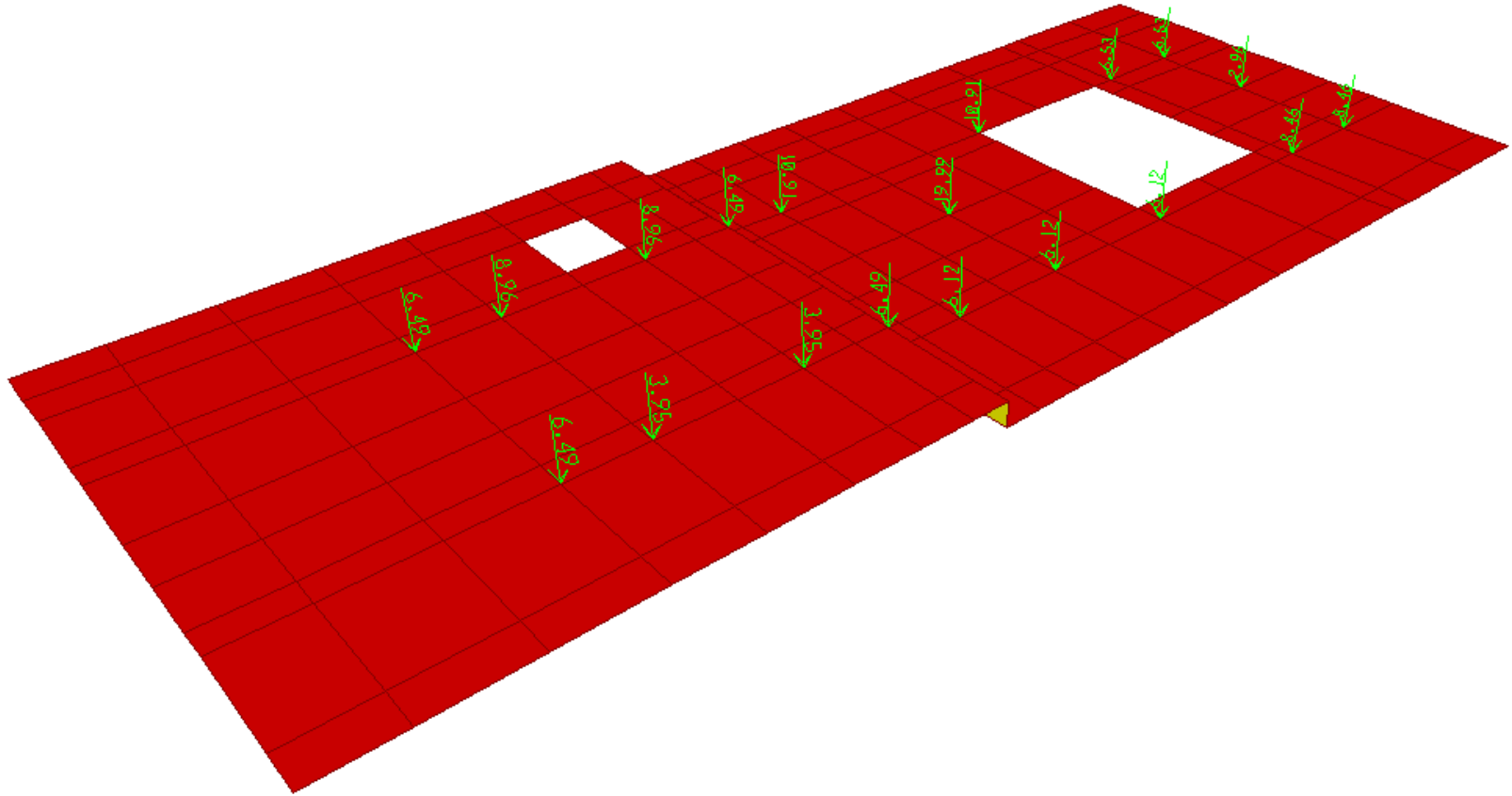


Figura 4.12 Cargas de operación en la cimentación

iv. **Par de corto circuito**

Tabla 4.4 Par de corto circuito

JUNTA	COORDENADAS GLOBALES			LOADPAT	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	X (m)	Y (m)	Z (m)							
423	7.1	1.5	3.27	SHORTCIR	0	0	2.8552	0	0	0
425	8.4	1.5	3.27	SHORTCIR	0	0	2.8552	0	0	0
427	10	1.5	3.27	SHORTCIR	0	0	2.8552	0	0	0
497	7.1	4.2	3.27	SHORTCIR	0	0	-4.2828	0	0	0
501	10	4.2	3.27	SHORTCIR	0	0	-4.2828	0	0	0

573	3.66	1.5	3.55	SHORTCIR	0	0	-23.1476	0	0	0
575	5.22	1.5	3.55	SHORTCIR	0	0	-23.1476	0	0	0
609	3.66	3.9	3.55	SHORTCIR	0	0	-23.1476	0	0	0
611	5.22	3.9	3.55	SHORTCIR	0	0	-23.1476	0	0	0

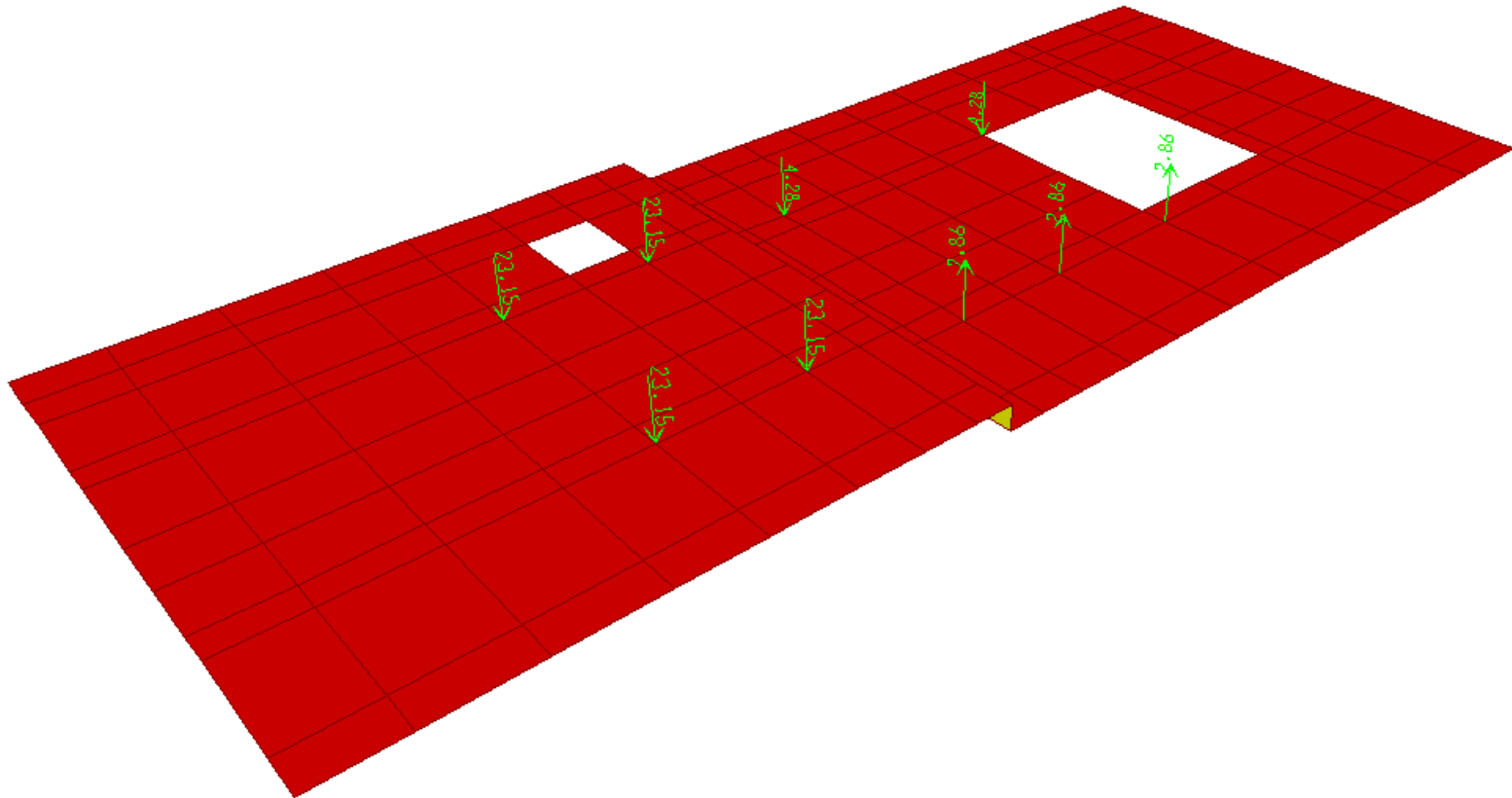


Figura 4.13 Par de corto circuito

Para considerar la influencia del sismo en la máquina, W corresponde en este caso a las cargas de operación normal en los cojinetes, por consiguiente los puntos de aplicación de las fuerzas sísmicas son los mismos que las de la carga de operación, como se muestra a continuación.

v. **Fuerzas sísmicas en los cojinetes en sentido X**

Tabla 4.5 Fuerzas sísmicas en sentido X

JUNTA	COORDENADAS GLOBALES			LOADPAT	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	X (m)	Y (m)	Z (m)							
423	7.1	1.5	3.27	SEISMICX	1.645	0	0	0	0	0
425	8.4	1.5	3.27	SEISMICX	1.645	0	0	0	0	0
427	10	1.5	3.27	SEISMICX	1.645	0	0	0	0	0
430	12.3	1.5	3.27	SEISMICX	2.173	0	0	0	0	0
431	13.3	1.5	3.27	SEISMICX	2.173	0	0	0	0	0
469	8.4	3	3.27	SEISMICX	5.756	0	0	0	0	0
497	7.1	4.2	3.27	SEISMICX	2.173	0	0	0	0	0
501	10	4.2	3.27	SEISMICX	2.173	0	0	0	0	0
504	12.3	4.2	3.27	SEISMICX	2.173	0	0	0	0	0

505	13.3	4.2	3.27	SEISMICX	2.173	0	0	0	0	0
572	2.8	1.5	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
573	3.66	1.5	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
575	5.22	1.5	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
577	6.2	1.5	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
608	2.8	3.9	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
609	3.66	3.9	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
611	5.22	3.9	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0
613	6.2	3.9	3.55	SEISMICX	1.859	0	0	0	0	0

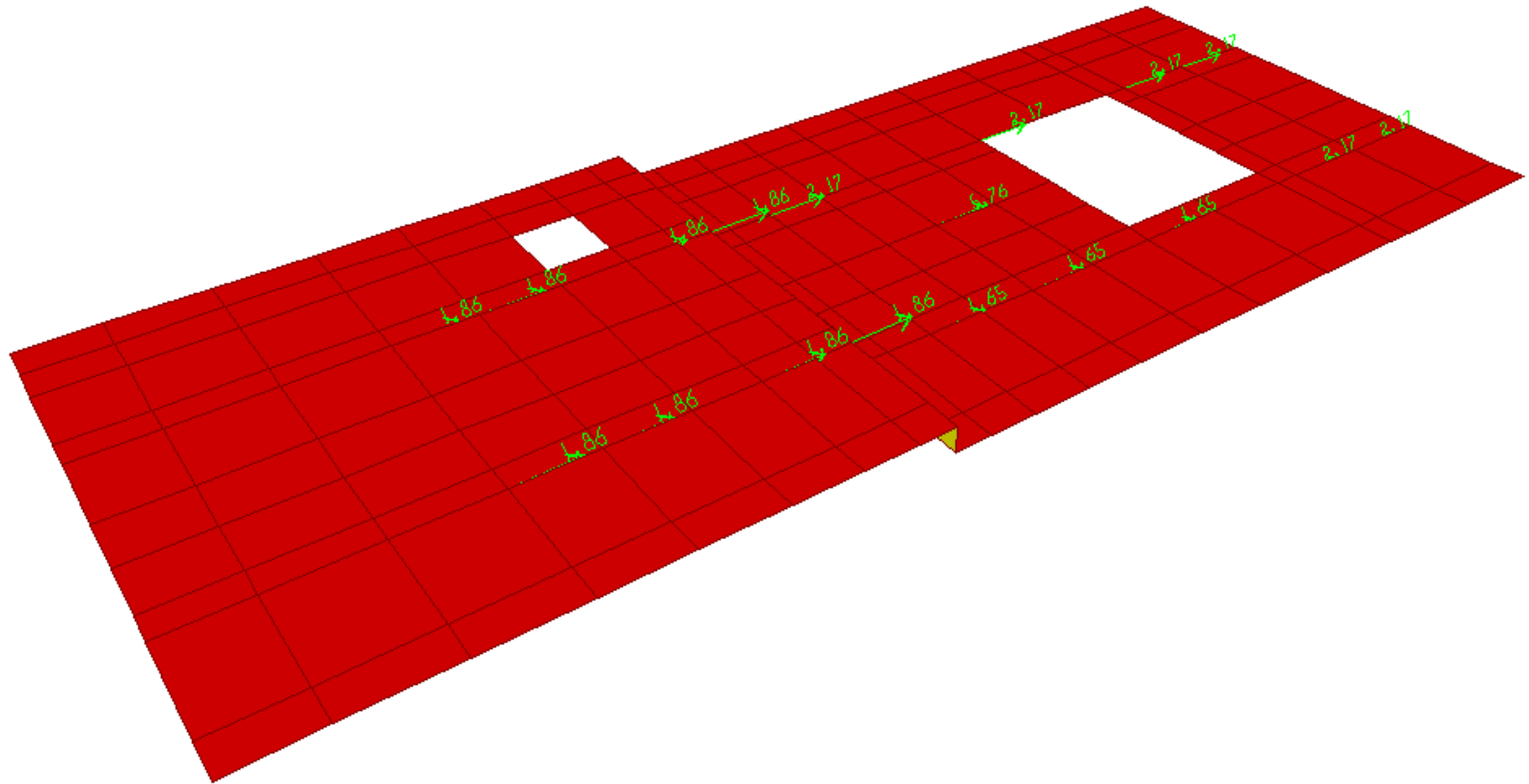


Figura 4.14 Fuerzas sísmicas en sentido X

vi. **Fuerzas sísmicas en los cojinetes en sentido Y**

Tabla 4.6 Fuerzas sísmicas en sentido Y

JUNTA	COORDENADAS GLOBALES			LOADPAT	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	X (m)	Y (m)	Z (m)							
423	7.1	1.5	3.27	SEISMICY	0	1.645	0	0	0	0
425	8.4	1.5	3.27	SEISMICY	0	1.645	0	0	0	0
427	10	1.5	3.27	SEISMICY	0	1.645	0	0	0	0
430	12.3	1.5	3.27	SEISMICY	0	2.173	0	0	0	0
431	13.3	1.5	3.27	SEISMICY	0	2.173	0	0	0	0
469	8.4	3	3.27	SEISMICY	0	5.756	0	0	0	0
497	7.1	4.2	3.27	SEISMICY	0	2.173	0	0	0	0
501	10	4.2	3.27	SEISMICY	0	2.173	0	0	0	0
504	12.3	4.2	3.27	SEISMICY	0	2.173	0	0	0	0

505	13.3	4.2	3.27	SEISMICY	0	2.173	0	0	0	0
572	2.8	1.5	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
573	3.66	1.5	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
575	5.22	1.5	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
577	6.2	1.5	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
608	2.8	3.9	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
609	3.66	3.9	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
611	5.22	3.9	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0
613	6.2	3.9	3.55	SEISMICY	0	1.859	0	0	0	0

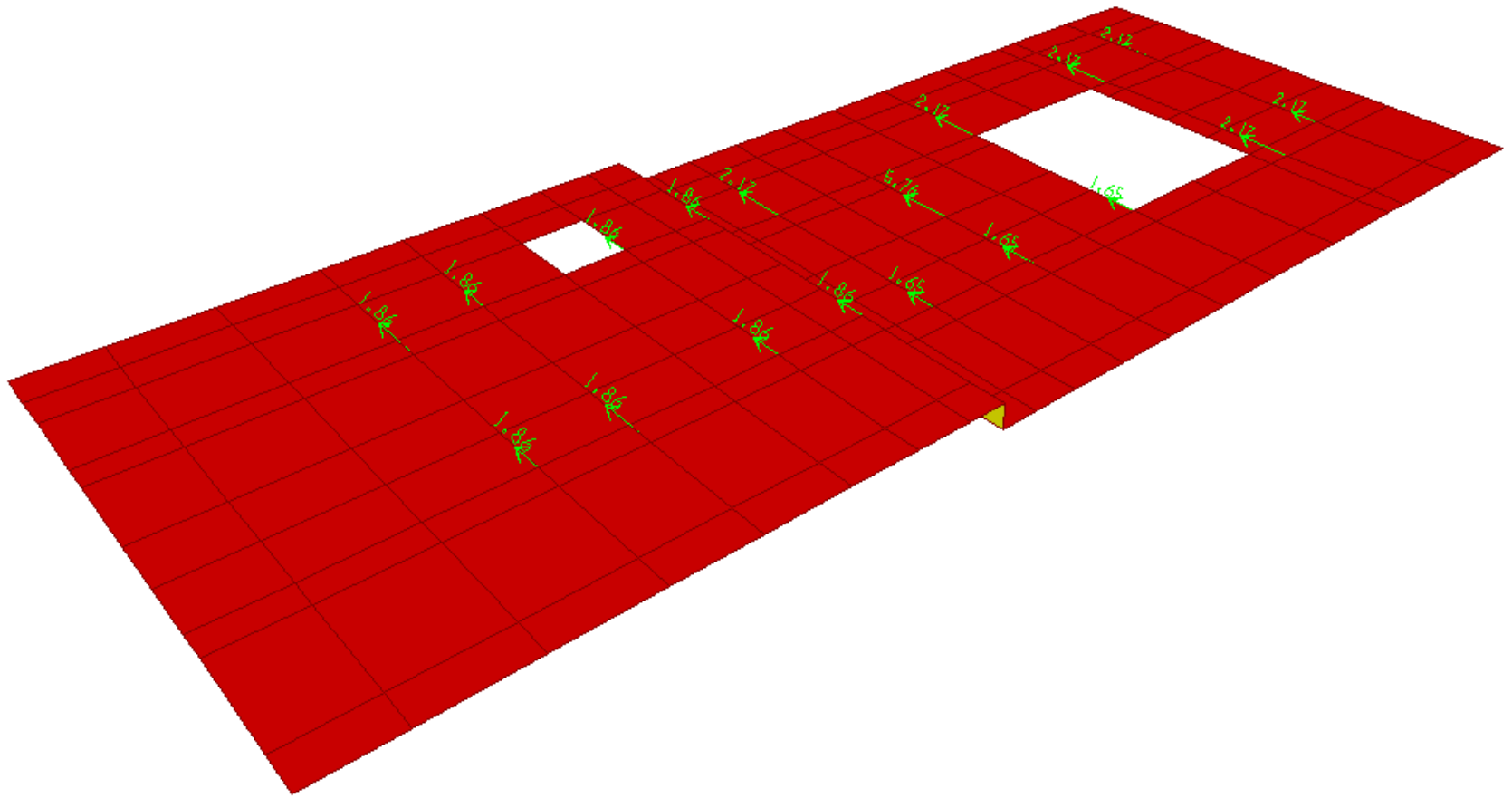


Figura 4.15 Fuerzas sísmicas en sentido Y

Además para considerar la influencia del sismo en la cimentación, asignamos el cortante basal en todas las áreas que representan a la losa de la turbina y losa del generador. En la figura 4.16 se muestra la asignación al área 275.

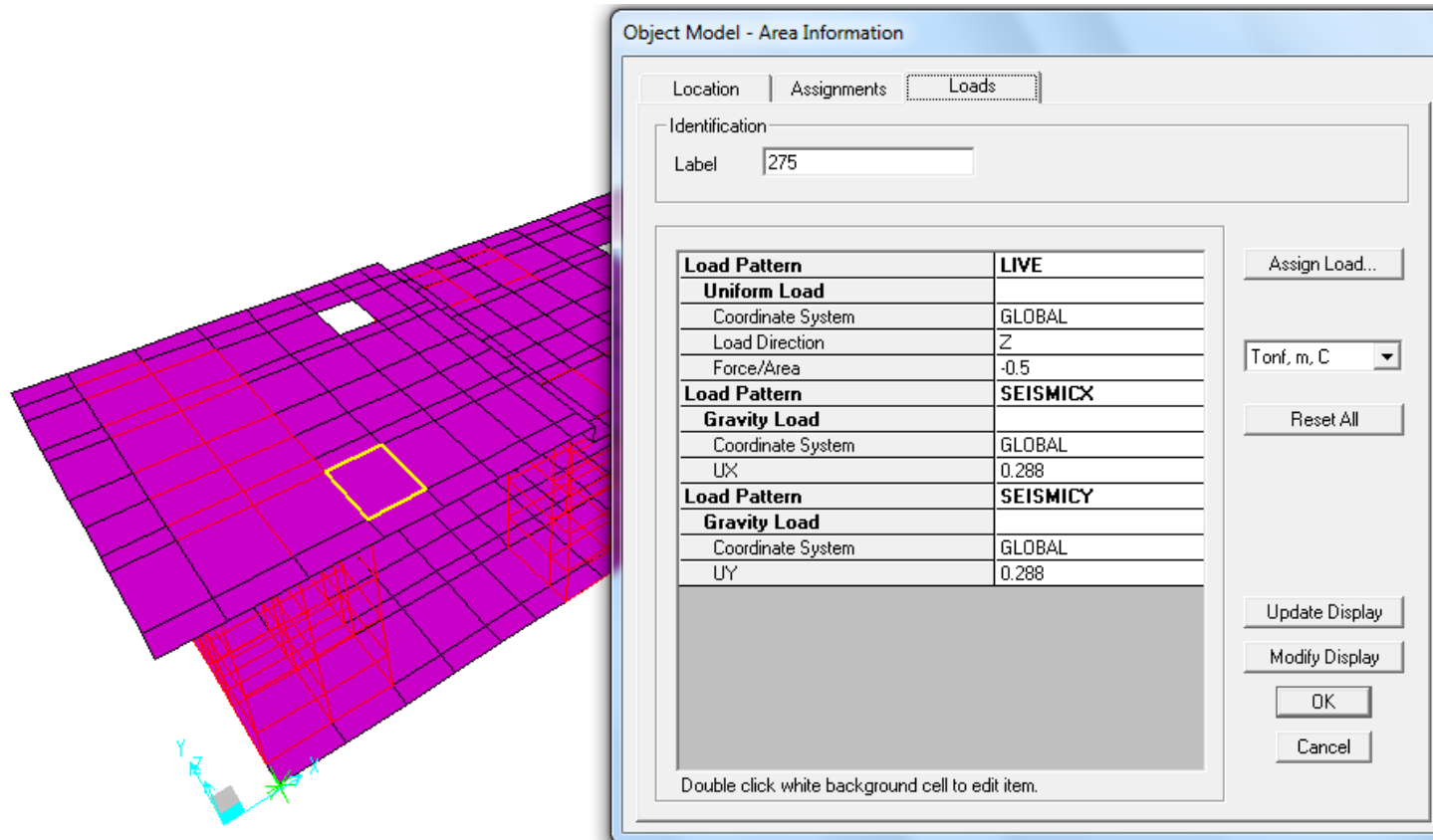


Figura 4.16 Asignación del cortante basal a los elementos área de la losa de turbina y generador

vii. **Carga viva**

Para las losas de la turbina y del generador se considera una carga viva de 0.50 t/m^2

viii. **Peso del suelo de relleno**

La altura de relleno es de 0.70 m, sobre la losa de cimentación, la ubicación se detalla en los planos. El peso que actúa se considera igual a 1.8 t/m^2 .

ix. **Acción Dinámica**

La acción dinámica es una fuerza periódica, causada por la rotación de los rotores que tienen masas balanceadas de manera imperfecta con respecto a su eje de rotación. El peso total del equipo turbogenerador es 144.025 t y el peso correspondiente al rotor es 20 t.

La magnitud de las fuerzas excitadoras es proporcional a:

- La excentricidad de las partes rotatorias
- La magnitud de las masas
- El cuadrado de la frecuencia de rotación de la máquina.

$$C_i = \frac{R}{g} e \omega_m^2 \quad (3.14)$$

Donde:

R: peso del rotor = 20 t

e: excentricidad del rotor, de la tabla 3.3 = 0.042 mm

ω_m : velocidad angular o frecuencia de rotación = 3000 rpm = 50 Hz

g: aceleración de la gravedad = 9800 mm/s^2

$$C_i = \frac{20}{9800} * 0.042 * (50)^2$$

$$C_i = 0,2142 \text{ t}$$

Como C_i es una fuerza de inercia, girará a la misma velocidad de rotación ω_m de la máquina. Su componente vertical están dadas por:

$$P_v = -C_i \text{ sen } \omega_m(t) \quad (3.16)$$

$$P_v = -0,2142 * Sen(50(t))$$

A continuación se presenta la tabla 4.7 que define la acción dinámica en la cimentación:

Frecuencia (Hz)	Pv (t)	Frecuencia (Hz)	Pv (t)
0	0,0000	26	0,1244
1	0,0562	27	0,1658
2	0,1085	28	0,1956
3	0,1532	29	0,2117
4	0,1871	30	0,2130
5	0,2080	31	0,1993
6	0,2142	32	0,1717
7	0,2055	33	0,1320
8	0,1823	34	0,0831
9	0,1464	35	0,0284
10	0,1002	36	-0,0283
11	0,0470	37	-0,0831
12	-0,0095	38	-0,1320
13	-0,0653	39	-0,1717
14	-0,1166	40	-0,1993
15	-0,1597	41	-0,2130

16	-0,1916	42	-0,2117
17	-0,2100	43	-0,1956
18	-0,2138	44	-0,1659
19	-0,2026	45	-0,1244
20	-0,1772	46	-0,0743
21	-0,1394	47	-0,0190
22	-0,0918	48	0,0377
23	-0,0377	49	0,0917
24	0,0189	50	0,1393
25	0,0743		

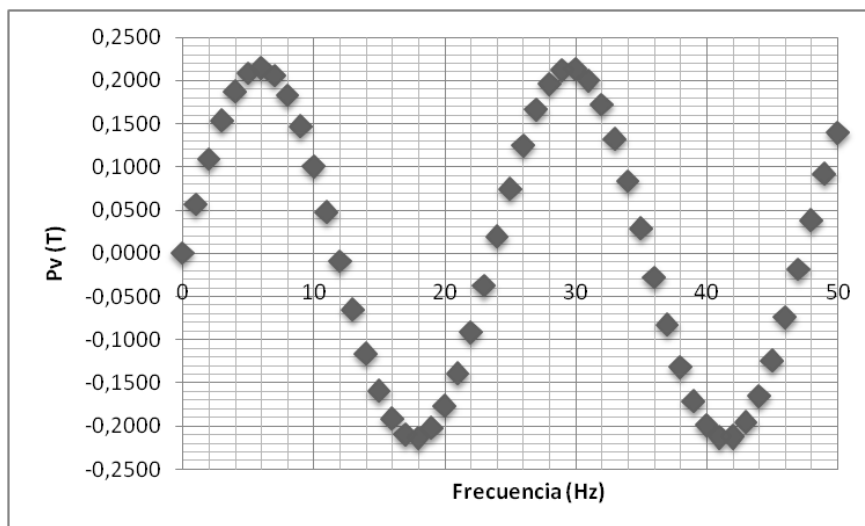


Tabla 4.7 Acción Dinámica

Figura 4.17 Acción Dinámica

Se puede apreciar que la acción dinámica esta definida por una función seno, esta debe introducirse en el modelo de la cimentación ya que al realizar el análisis dinámico, esta indicará la periodicidad con la que actúan las cargas de operación normal sobre los cojinetes.

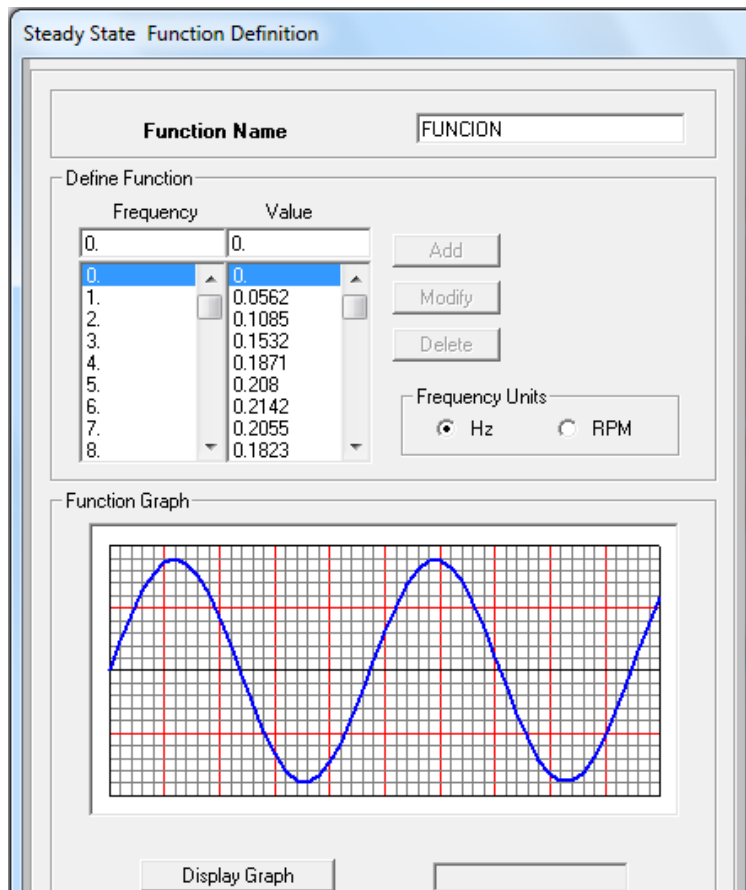


Figura 4.18 Función definida en el modelo

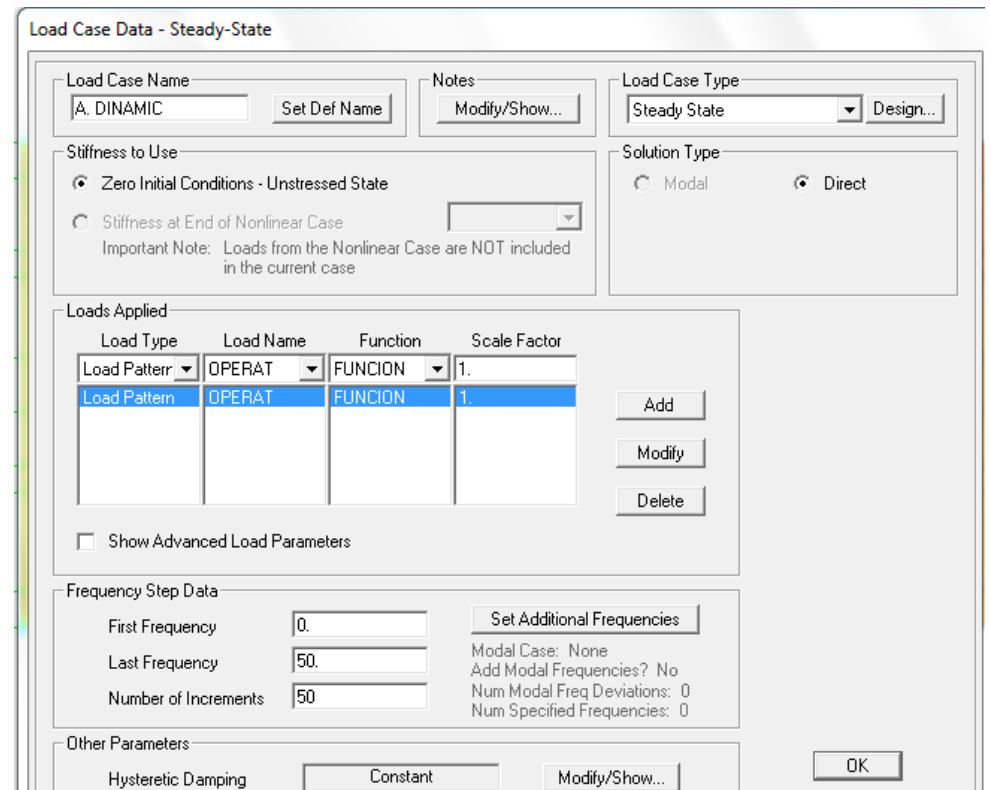


Figura 4.19 Caso de carga dinámica definida en el modelo

4.6.1.5. Combinaciones de Carga

Se realizaron seis combinaciones de carga, dos de servicio y cinco factoradas, las mismas que se muestran a continuación.

- i. La combinación de cargas de servicio denominada **COMB1:**

$$1*DEAD + 1*STATIC + 1*LIVE$$

Peso propio + carga estática + carga viva

- ii. La combinación de cargas de servicio denominada **COMB2:**

$$1*DEAD + 1*OPERAT + 1*SHORTCIR$$

Peso propio + carga de operación normal + carga de corto circuito

- iii. La combinación de cargas factoradas denominada **COMBu1:**

$$1,4*DEAD + 1,7*OPERAT + 1,7*REFILL + 1,7*LIVE$$

Peso propio + carga de operación normal + peso del suelo de relleno + carga viva

- iv. La combinación de cargas factoradas denominada **COMBu2:**

$$1*COMBu1 + 1,7*SHORTCIR$$

Peso propio + carga de operación normal + peso del suelo de relleno + carga viva

+ carga de corto circuito

- v. La combinación de cargas factoradas denominada **COMBux:**

$$0,75*COMBu1 + 1,275*SEISMICX$$

Peso propio + carga de operación normal + peso del suelo de relleno + carga viva
+ carga sísmica en sentido X

vi. La combinación de cargas factoradas denominada **COMBuy:**

0,75*COMBu1 + 1,275*SEISMICY

Peso propio + carga de operación normal + peso del suelo de relleno + carga viva
+ carga sísmica en sentido Y

vii. La combinación de cargas factoradas denominada **COMBu3:**

1*COMBu1 - 1,7*SHORTCIR

Peso propio + carga de operación normal + peso del suelo de relleno + carga viva
+ carga de corto circuito.

4.6.2. ESFUERZOS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN

Uno de los métodos de cálculo más utilizado para modelar la interacción entre estructuras de cimentación y terreno es el que supone el suelo equivalente a un número infinito de resortes elásticos, muelles o bielas biarticuladas, cuya rigidez, denominada módulo o coeficiente de balasto (K_s), se corresponde con el cociente entre la presión de contacto (q) y el desplazamiento en su caso asiento (δ). De lo anterior se deduce que:

$$q = K_s * \delta \quad (4.3)$$

Para que el suelo sobre el que se asienta la estructura de cimentación no falle, se debe cumplir que el esfuerzo en el suelo (q) debe ser menor al esfuerzo admisible dinámico (σ_d).

Para determinar el esfuerzo admisible dinámico, se utiliza la recomendación del subcapítulo 1.7 de este manual, el cual considera suficiente adoptar un factor de reducción de 0.8 al esfuerzo admisible estático, cuando se está diseñando máquinas de velocidad alta como turbogeneradores.

$$\sigma_{st} = 20 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_d = 0.8 * (20) = 16 \text{ t/m}^2$$

El módulo de balasto basado en la tensión admisible de la cimentación según Bowles es igual a $120 * \sigma_d$.

$$K_s = 120 * \sigma_d \quad (4.4)$$

$$K_s = 120 * 16 \frac{T}{m^2}$$

$$K_s = 1920 \frac{T}{m^3}$$

El modulo de balasto recomendado según Tesis de maestría “Interacción Suelo-Estructuras: Semi-espacio de Winkler”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-España. 1993 (Autor Nelson Morrison) que define al mismo en función del esfuerzo admisible es para $\sigma_d = 16T/m^2 \rightarrow K_s = 3280 \text{ t/m}^3$.

Para el análisis de los esfuerzos en el suelo escogemos este último valor de K_s , por considerarlo conservador, a continuación se muestra la revisión para todas las combinaciones de carga.

i. **Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMB1**

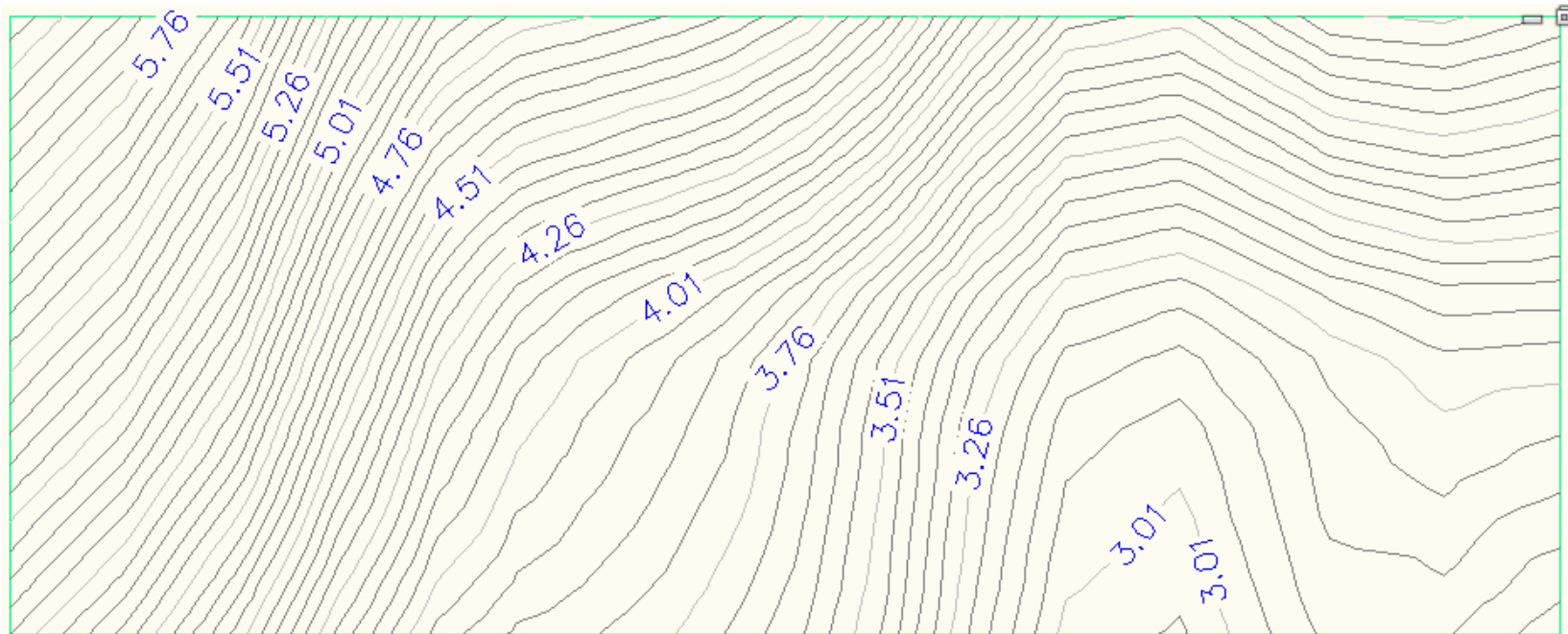


Figura 4.20 Esfuerzos en el suelo (t/m^2), combinación de carga COMB1

ii. Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMB2

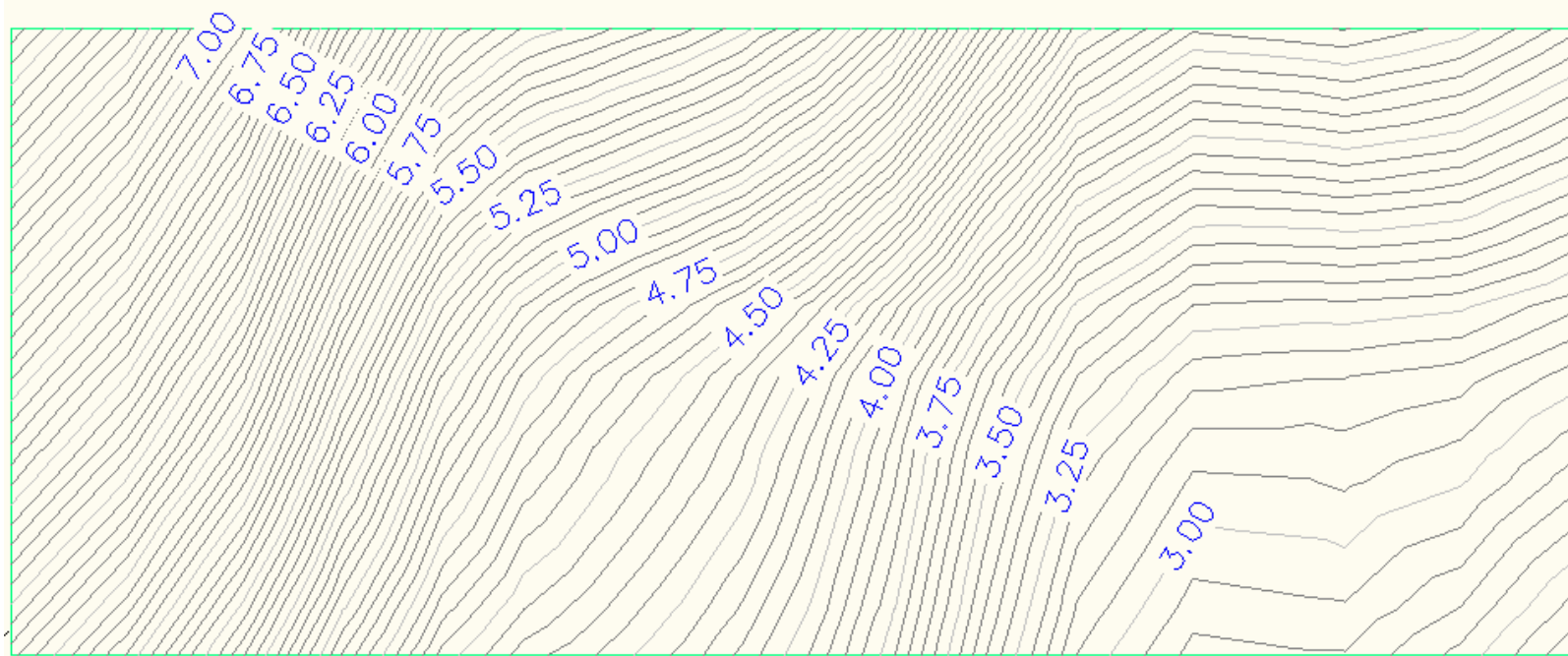


Figura 4.21 Esfuerzos en el suelo (t/m^2), combinación de carga COMB2

iii. **Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBu1**

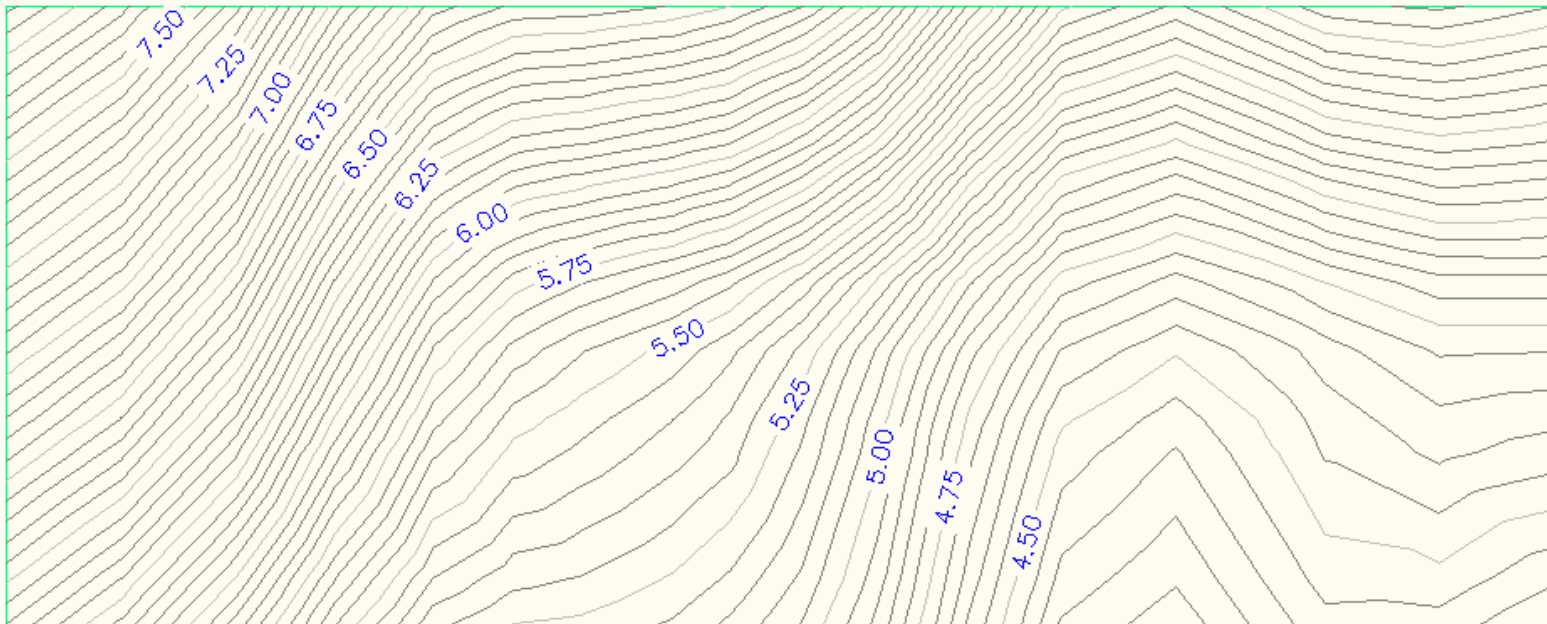


Figura 4.22 Esfuerzos en el suelo (t/m^2), combinación de carga COMBu1

iv. **Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBu2**

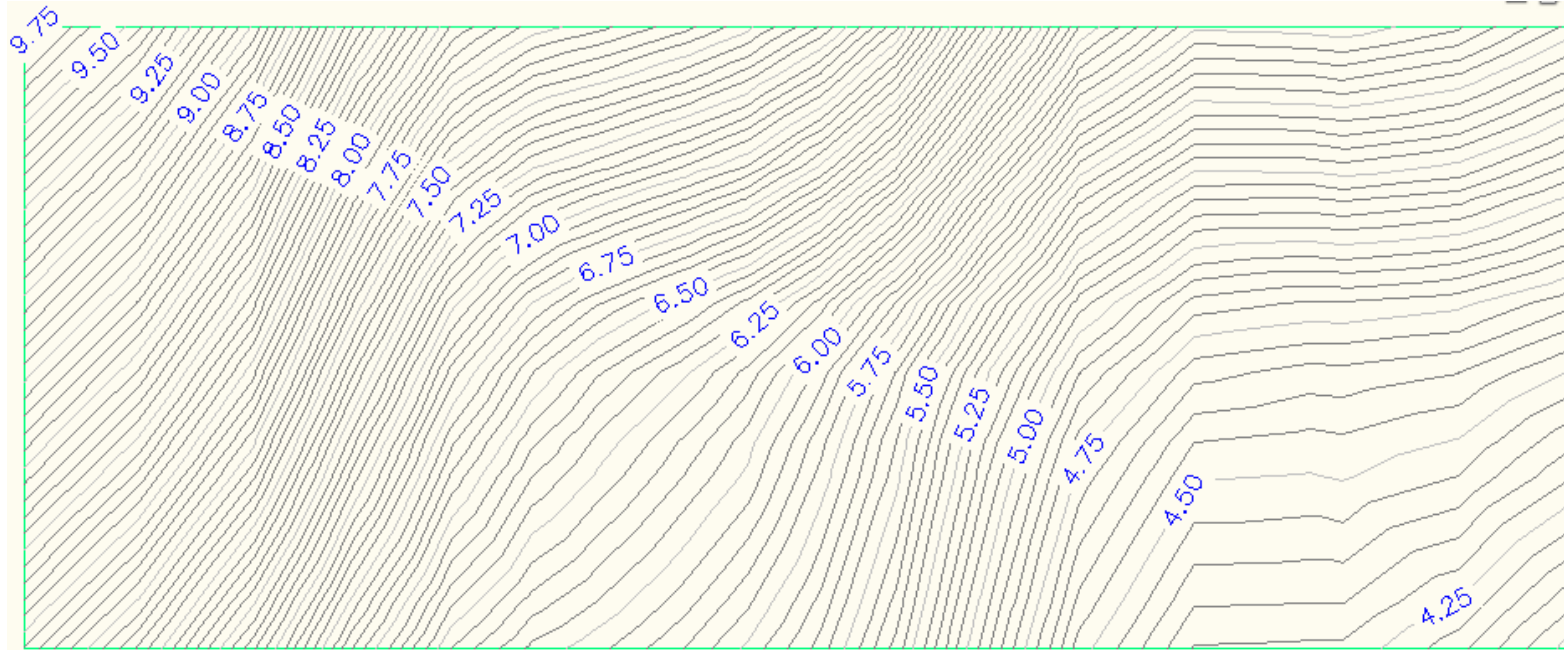


Figura 4.23 Esfuerzos en el suelo (t/m^2), combinación de carga COMBu1

v. **Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBu3**

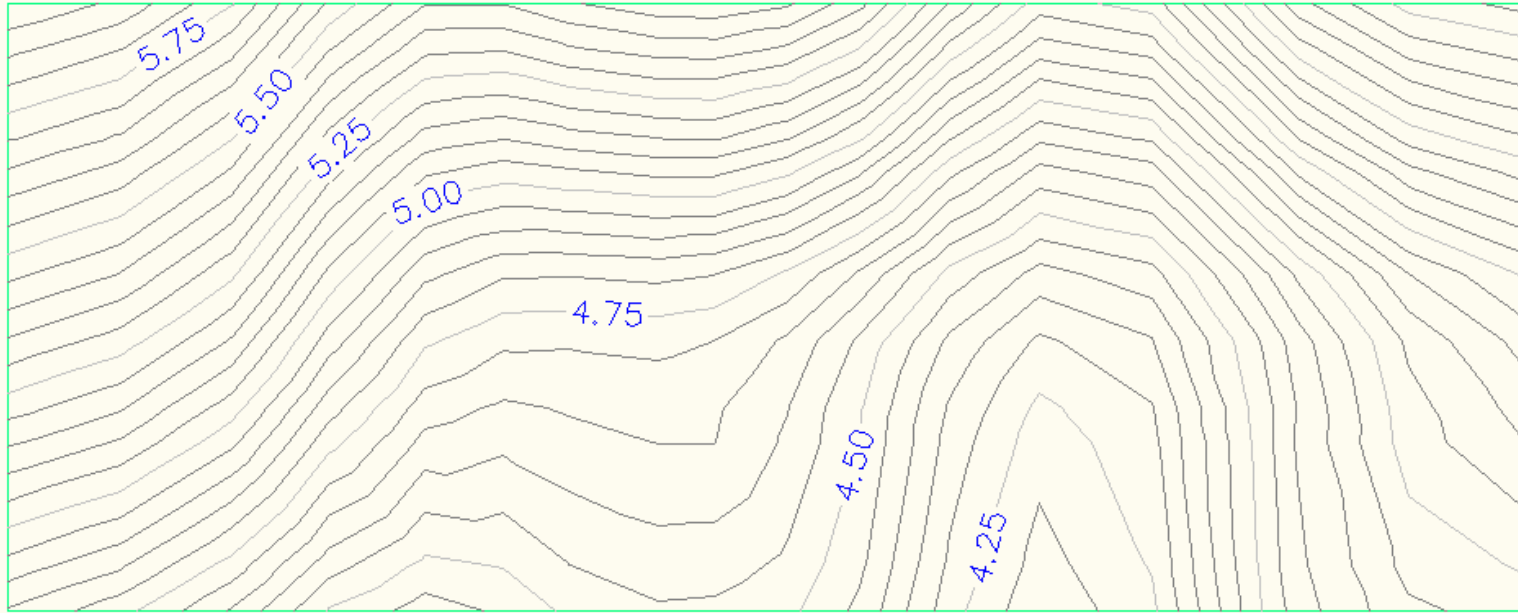


Figura 4.24 Esfuerzos en el suelo (t/m^2), combinación de carga COMBu3

vi. Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBux

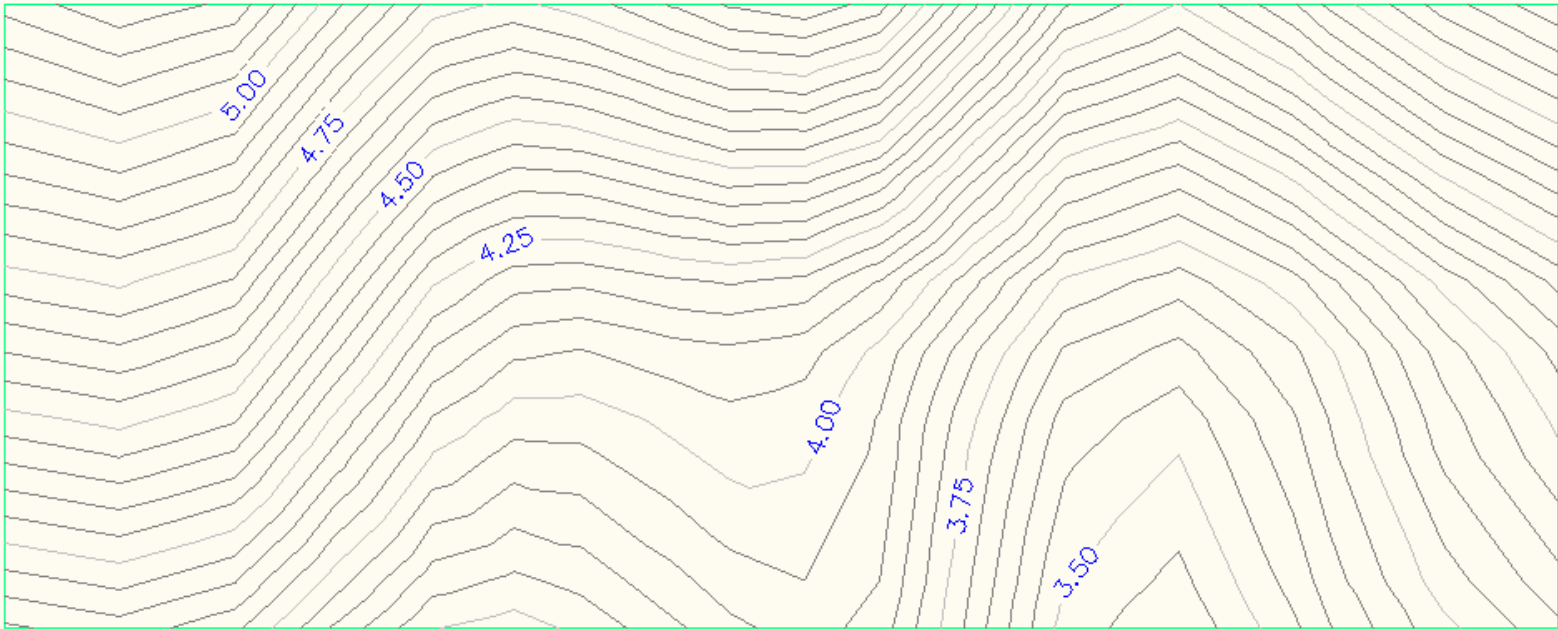


Figura 4.25 Esfuerzos en el suelo (t/m^2), combinación de carga COMBux

vii. **Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBuy**

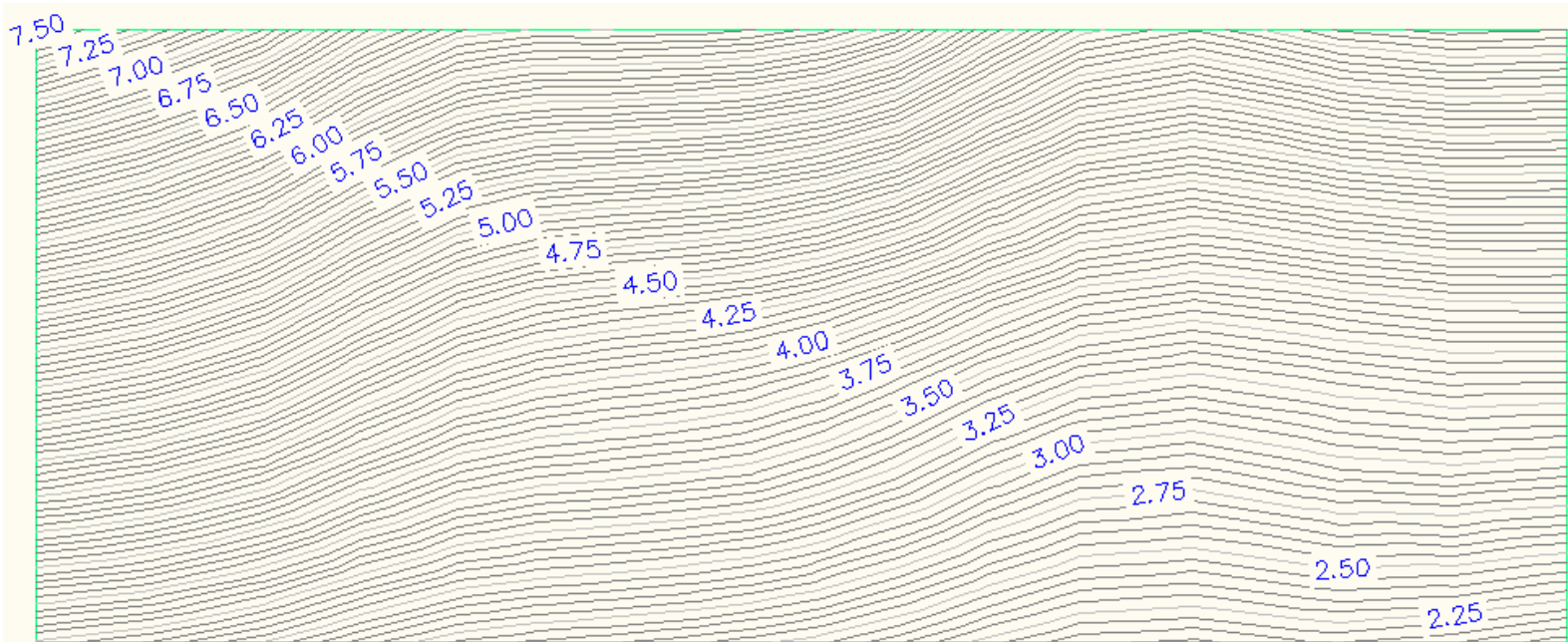


Figura 4.26 Esfuerzos en el suelo (t/m²), combinación de carga COMBuy

4.6.3. AMPLITUDES MEDIDAS EN LOS COJINETES

Las amplitudes permisibles son generalmente especificadas por los proveedores de las máquinas. La amplitud permisible de una cimentación de máquina, está gobernada, por la relativa importancia de la máquina y por la sensibilidad a la vibración de las estructuras vecinas. Las amplitudes medidas en los cojinetes son muy pequeñas, la amplitud vertical debe considerarse relativa con respecto al menor valor, debido a que desciende toda la maquinaria.

Tabla 4.8 Amplitudes en los cojinetes

JUNTA	CASO DE CARGA	X	Y	Z absoluto	Z relativo
		mm	mm	mm	mm
423	OPERAT	0.0456	0.0521	-0.2279	-0.0720
425	OPERAT	0.0454	0.0519	-0.2474	-0.0915
427	OPERAT	0.0444	0.0502	-0.2658	-0.1099
430	OPERAT	0.0424	0.0482	-0.2440	-0.0881
431	OPERAT	0.0424	0.0476	-0.2409	-0.0851
469	OPERAT	0.0458	0.0514	-0.2885	-0.1326
474	OPERAT	0.0429	0.0473	-0.2661	-0.1102
497	OPERAT	0.0469	0.0524	-0.2727	-0.1168
501	OPERAT	0.0456	0.0507	-0.3146	-0.1587
504	OPERAT	0.0430	0.0477	-0.2772	-0.1214
505	OPERAT	0.0434	0.0470	-0.2739	-0.1180
572	OPERAT	0.0503	0.0582	-0.1559	0.0000
573	OPERAT	0.0500	0.0580	-0.1757	-0.0198
575	OPERAT	0.0496	0.0578	-0.2062	-0.0504
577	OPERAT	0.0494	0.0580	-0.2212	-0.0653
608	OPERAT	0.0510	0.0584	-0.1979	-0.0420

609	OPERAT	0.0508	0.0582	-0.2208	-0.0649
611	OPERAT	0.0504	0.0575	-0.2531	-0.0972
613	OPERAT	0.0502	0.0567	-0.2652	-0.1093

4.6.4. MODELACIÓN DE ACCIONES DINÁMICAS

Se realizó también el análisis dinámico modal de la cimentación mediante vectores Eigen para determinar los modos de vibración libre, los períodos y las frecuencias de la estructura. Los resultados para los 4 primeros modos de vibración se presentan a continuación:

Tabla 4.9 Frecuencias del sistema y suma de la masa participativa modal

MODO	PERIODO (s)	FRECUENCIA (Hz)	SUM X	SUM Y	SUM Z
1	0.156	6.42	0.0003215	0.6709	0.0001862
2	0.093	10.76	0.0043	0.7037	0.006
3	0.081	12.27	0.3886	0.7042	0.0913
4	0.057	17.56	0.539	0.7048	0.9253

Se observa claramente que las frecuencias son bastante menores que la frecuencia de rotación de 50Hz de la turbina, por lo que no existe posibilidad de resonancia con la estructura de cimentación. La suma de la masa participativa indica que los 3 primeros modos de vibración son traslacionales que es lo deseable y el cuarto modo es rotacional.

4.6.5. DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS DE DISEÑO

Para determinar los momentos y cortes críticos actuantes sobre los elementos de la estructura de cimentación, seguimos el siguiente proceso:

- i. **Determinación de la combinación de cargas crítica:**

Para determinar la combinación de cargas críticas sobre la estructura de cimentación en general, ingresamos al menú Display → Show Forces/Stresses→Shells, y se presenta la ventana de la figura 4.27.

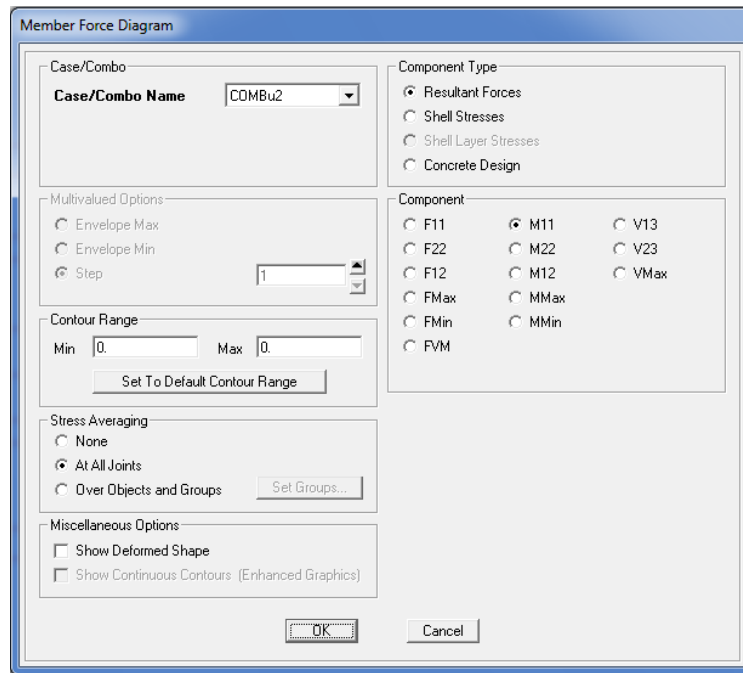


Figura 4.27 Configuración de ventana para presentación de esfuerzos

La ventana de la figura 4.27 debe configurarse de la siguiente manera:

Case combo name

Elegimos la combinación de carga para la que deseamos se presenten los esfuerzos.

Component

Seleccionamos una de las opciones siguientes:

M11: Momento por unidad de longitud actuando en la mitad de la superficie de las caras 2 y 4, alrededor del eje 2. Es decir para que se despliegan los momentos en sentido X.

M22: Momento por unidad de longitud actuando en la mitad de la superficie de las caras 1 y 3, alrededor del eje 1. Es decir para que se despliegan los momentos en sentido Y.

V13: Corte por unidad de longitud fuera del plano del Shell actuando en la mitad de la superficie de las caras 1 y 3 en dirección 3. Es decir para que se despliegan los cortantes en sentido X.

V23: Corte por unidad de longitud fuera del plano del Shell actuando en la mitad de la superficie de las caras 2 y 4 en dirección 3. Es decir para que se desplieguen los cortantes en sentido Y.

Siguiendo este proceso, desplegamos los momentos y cortantes para cada combinación de carga, a continuación se muestra la tabla de resumen.

Tabla 4.10 Determinación de combinación de cargas crítica

		ESFUERZOS							
		MOMENTO M11 MX (t.m)		MOMENTO M22 MY (t.m)		CORTANTE V13 (t)		CORTANTE V23 (t)	
COMBINACION DE CARGA	COMB1	-12.575	19.452	-5.89	9.24	-18.66	21.28	-16.6	21.7
	COMB2	-16.9	33.94	-6.73	16.19	-26.64	37.46	-26.47	31.77
	COMBu1	-17.47	29.51	-8.36	15.47	-24.34	35.65	-25.41	32.5
	COMBu2	-25.72	54.05	-9.92	26.49	-44.44	61.71	-42.38	49.61
	COMBuX	-18.08	30.46	-7.49	11.07	-20.17	31.88	25.88	32.47
	COMBuy	-19.41	22.85	-12.1	20.15	-25.64	39.49	-17.73	36.62
	COMBu3	-10.83	17.58	-6.98	14.79	-23.3	18.5	-26.33	21.44
	A.DINAMIC	0	0.53	0	0.41	0	0.63	0	0.53
CRITICOS		-25.72	54.05	-12.1	26.49	-44.44	61.71	-42.38	49.61

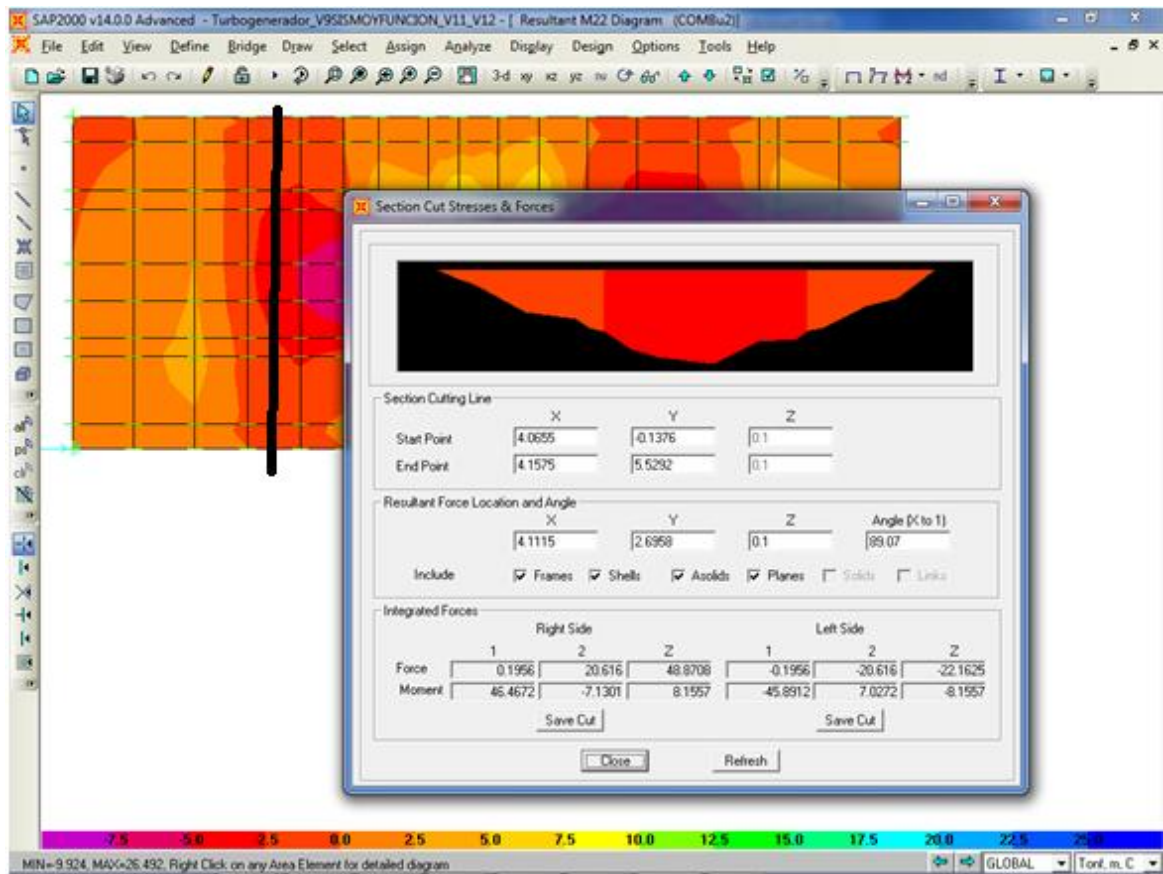
Los esfuerzos críticos corresponden a la combinación de cargas COMBu2

ii. Determinación de esfuerzos sobre los elementos debido a la combinación de cargas COMBu2

Primero se debe ver en pantalla los diagramas de solicitaciones (el que se requiera, M11, M22, V12, V13) del elemento que se analice (Losa de cimentación, Losa de turbina, Losa de generador, Muros) para el régimen de cargas COMBu2.

A continuación se realiza una sección de corte, esta opción permite obtener las resultantes para los elementos seleccionados, para esto ir al menú Draw → Draw Section Cut y pasar una línea que corte los elementos involucrados.

Figura 4.28 Sección de corte



En la figura 4.28, al fondo, se observa los diagramas de momentos $M22 = MY$, para la combinación de cargas COMBu2, sobre la losa de cimentación. Después de realizar la sección de corte (línea negra) sobre la cuarta franja discretizada de la losa de cimentación se presenta la ventana que se ve al frente, en la cual se encuentran los siguientes valores.

Section Cutting Line

Corresponde a las coordenadas de la sección de corte. Valores en X, Y y Z, para el punto inicial y final de la sección de corte.

Resultant Force Location and Angle

Corresponde a la ubicación de las fuerzas resultantes, por default se ubica en el punto medio de la sección de corte realizada. En la opción include, se pican los elementos involucrados.

Integrated Forces

Son las fuerzas resultantes al lado izquierdo y fuerzas resultantes al lado derecho.

Force (1): Fuerza Resultante en la dirección de la sección de Corte.

Force (2): Fuerza Resultante en la dirección perpendicular al plano que contiene a la sección de Corte.

Force (Z): Fuerza Resultante en Z.

Moment (1): Momento Resultante alrededor del eje de la sección de Corte.

Moment (2): Momento Resultante alrededor del eje perpendicular al plano que contiene a la sección de Corte

Moment (Z): Momento Resultante alrededor del eje Z.

4.6.5.1. Determinación de momentos y cortantes en la losa de cimentación debido a la combinación de cargas COMBu2

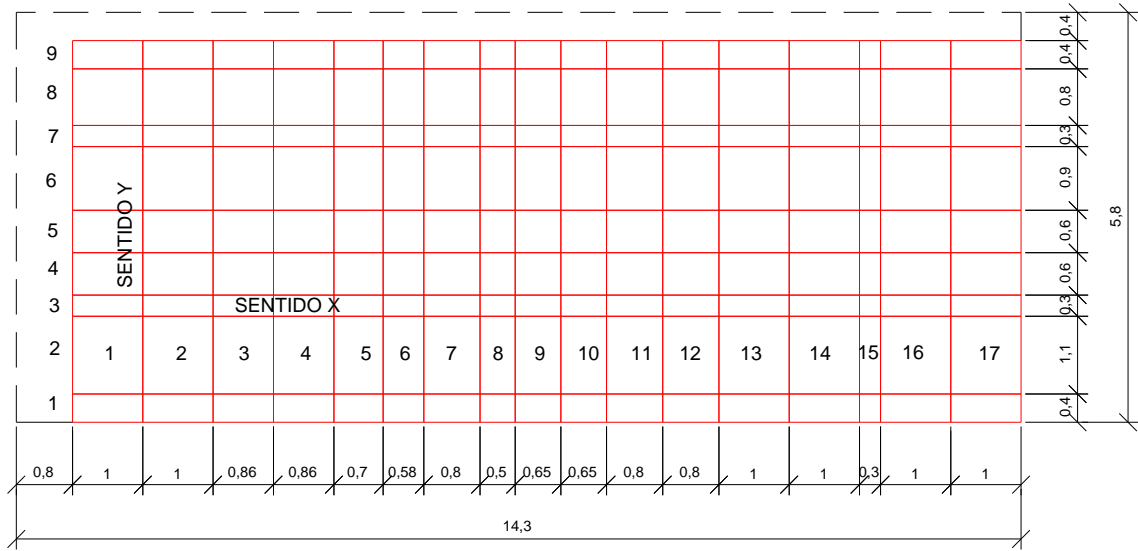
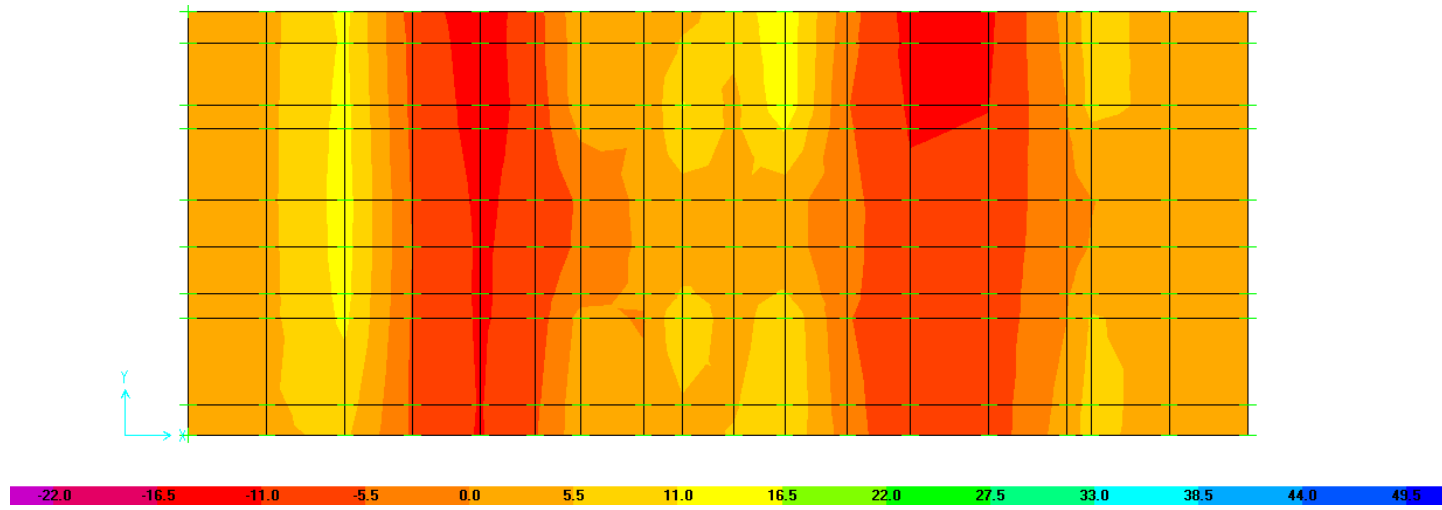
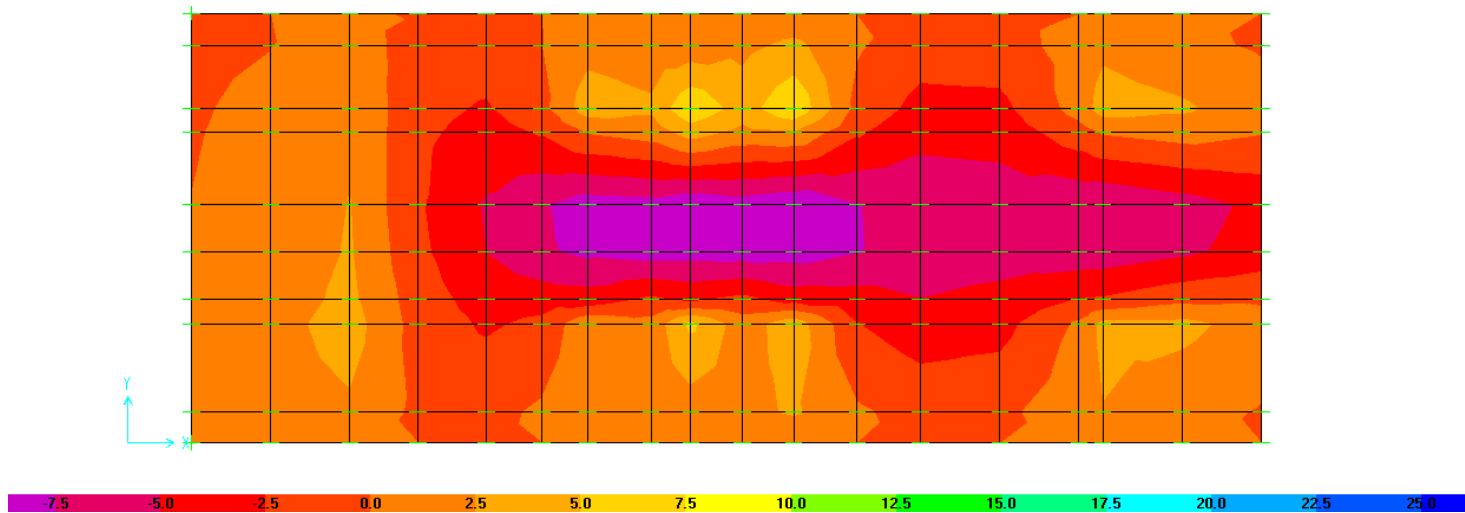


Figura 4.29 Dimensión de discretizaciones y numeración de franjas Losa de Cimentación

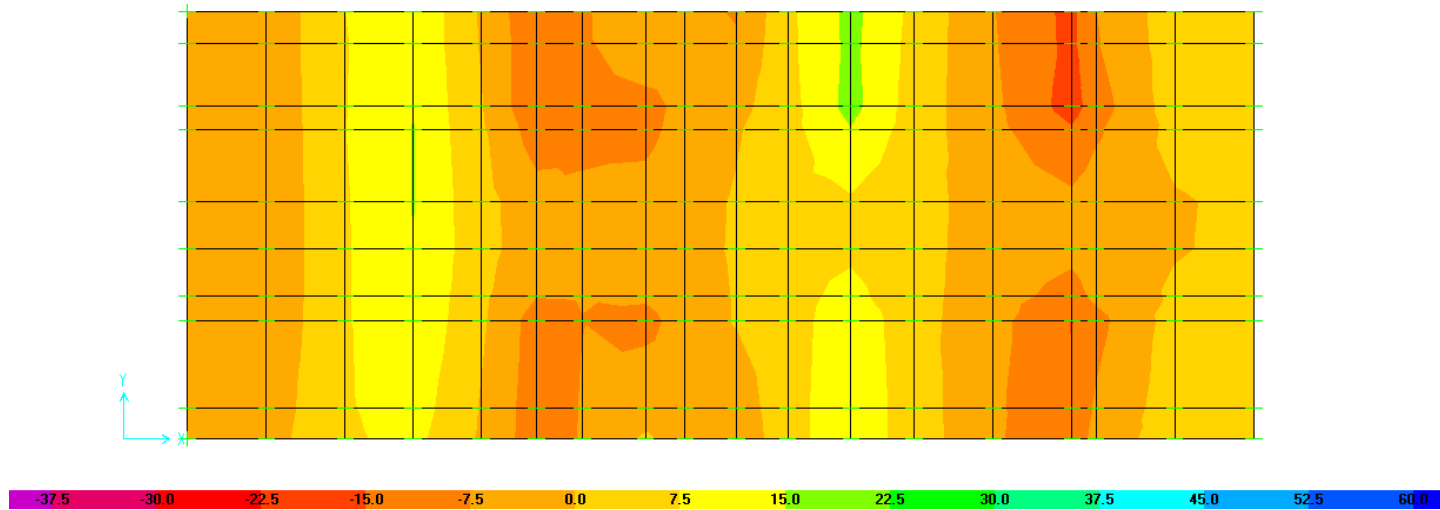


(a)

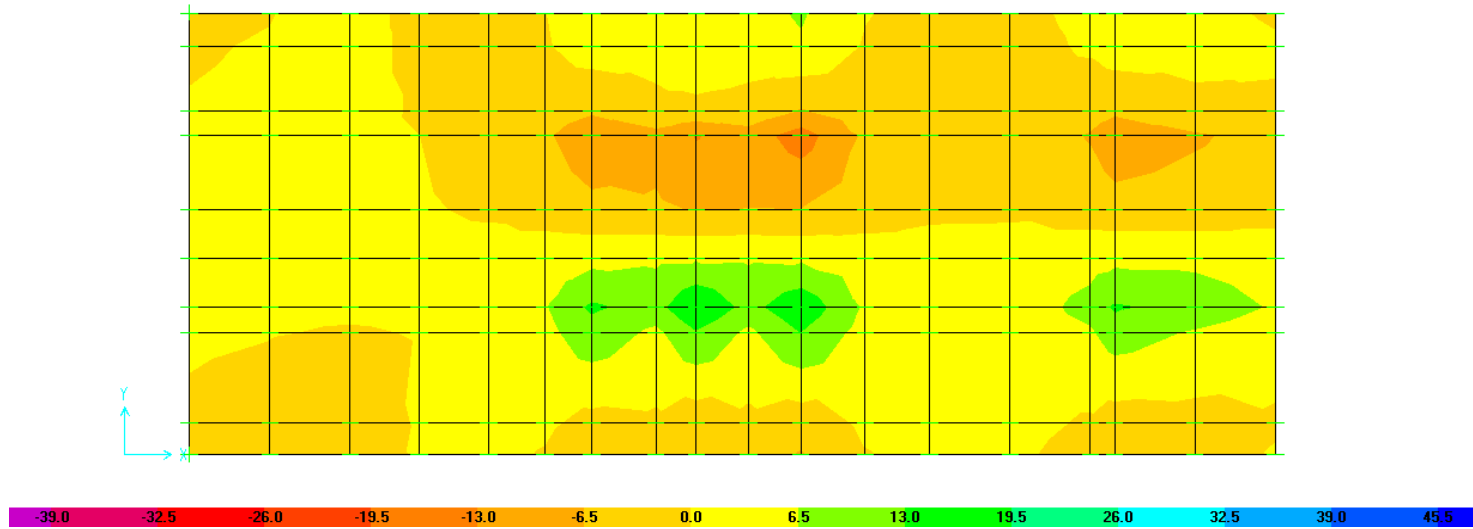


(b)

Figura 4.30. Losa de Cimentación (a) Momentos X (M1) (b) Momentos Y (M2) (t.m) - Cargas factoradas COMBU2



(a)



(b)

Figura 4.31. Losa de Cimentación (a) Cortantes X (V13) (b) Cortantes Y (V23) (t.) - Cargas factoradas COMBU2

Tabla 4.11. Momentos y Cortante en Dirección X en Franjas de Losa de Cimentación

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M11 = MX (t.m)	V12 (t)
1	0.4	3.97	
		-5.83	
2	1.1	7.02	
		-10.14	
3	0.3	14.8	
		-14.9	
4	0.6	16.64	
		-19.48	
5	0.6	-7.27	
		-11.28	
6	0.9	-32.36	
		22.78	
7	0.3	-14.2	25.04
		13.35	
8	0.8	-5.85	
		3.59	
9	0.4	-4.11	
		1.99	

DISEÑO

22.78

MX (+) t.m

-32.36

MX (-) t.m

25.04

V12 t

Tabla 4.12. Momentos y Cortante en Dirección Y en Franjas de Losa de Cimentación

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M22 = MY (t.m)	V13 (t)
1	1	8.63	
		-13.82	
2	1	32.16	28.93
		-38.55	
3	0.86	22.47	
		-15.05	

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M22 = MY (t.m)	V13 (t)
4	0.86	-7.02	
		7.47	
5	0.7	2.88	
		-2.75	
6	0.58	10.33	
		-11.73	
7	0.8	-0.06	
		-0.73	

8	0.5	1.26	
		-1.36	
9	0.65	0.98	
		0.8	
10	0.65	-0.86	
		1.76	
11	0.8	-5.35	
		5.18	
12	0.8	-16.36	
		15.71	
13	1	-4.59	
		4.32	
14	1	18.76	
		-27.4	
15	0.3	0.97	
		1.84	
16	1	-0.58	
		-0.72	
17	1	-2.33	
		0.2	

DISEÑO

32.16

MY (+) t.m

-38.55

MY (-) t.m

28.93

V13 t

4.6.5.2. Determinación de momentos y cortantes en la losa del generador debido a la combinación de cargas COMBu2

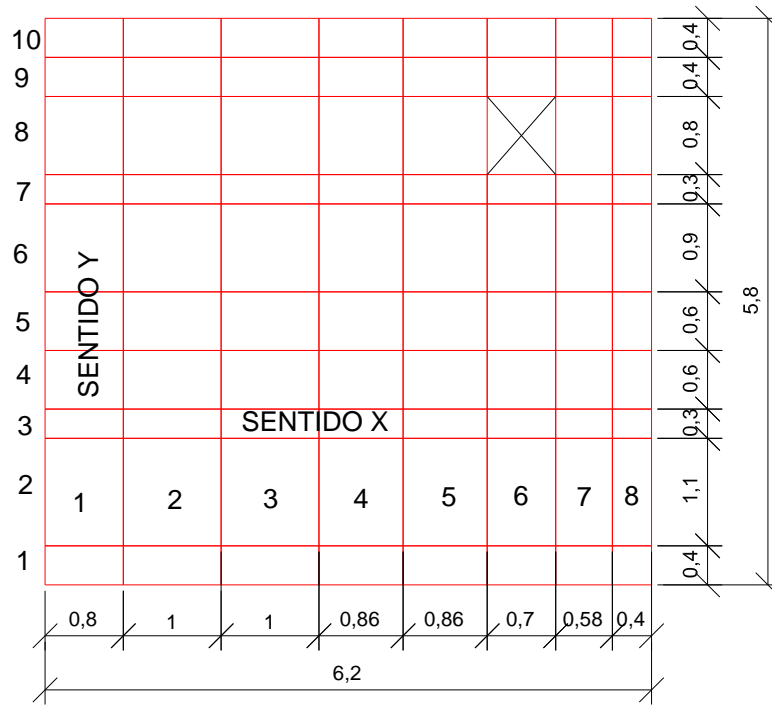
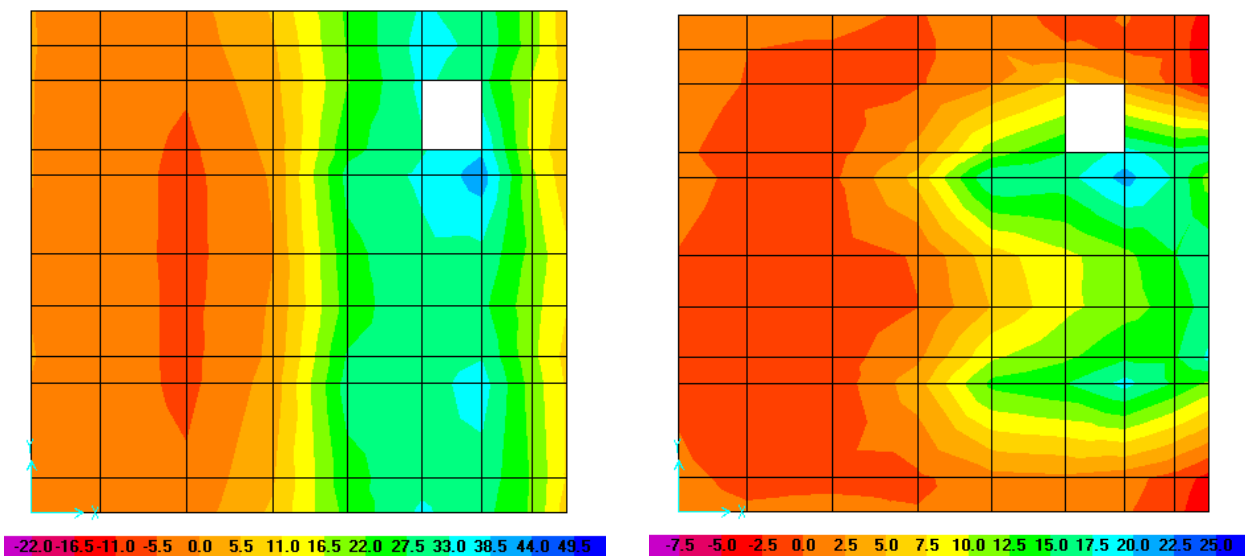


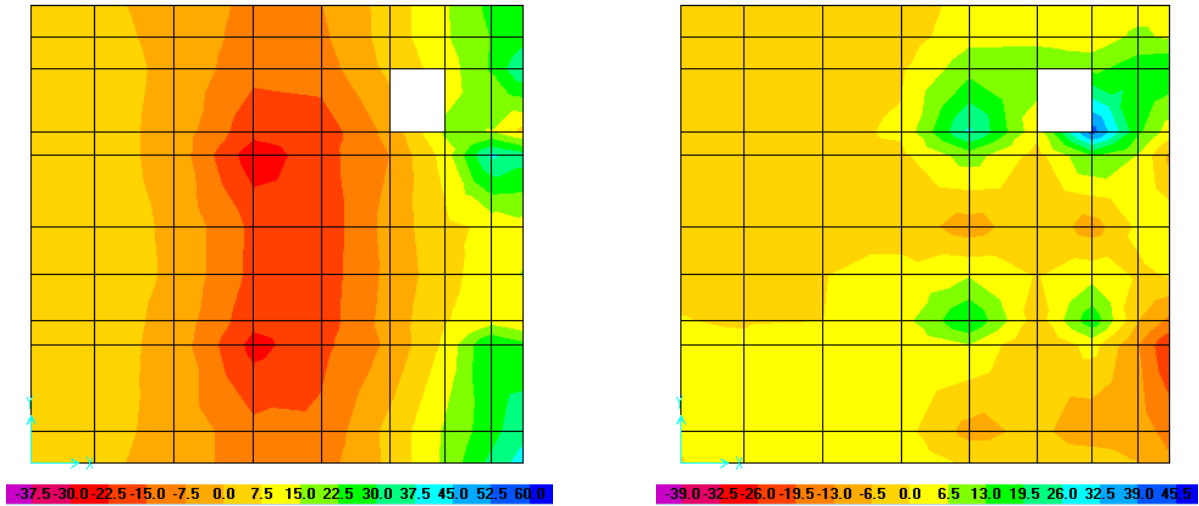
Figura 4.32 Dimension de discretizaciones y numeración de franjas “Losa de Generador”



(a)

(b)

Figura 4.33. Losa de Generador (a) Momentos X (M1) (b) Momentos Y (M2) (t.m) Cargas factoradas COMBU2



(a)

(b)

Figura 4.34. Losa de Cimentación (a) Cortantes X (V13) (b) Cortantes Y (V23) (t) Cargas factoradas COMBU2

Tabla 4.13. Momentos y Cortante en Dirección X en Franjas de “Losa de Generador”

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M11 = MX (t.m)	V12 (t)
1	0.4	-19.6	
		1.93	
2	1.1	-27.09	
		27.1	
3	0.3	-35.5	
		32.5	
4	0.6	-11.38	
		7.77	
5	0.6	-3.04	
		0.6	
6	0.9	47.4	
		-34.4	
7	0.3	-42.59	7.1
		45.93	

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M11 = MX (t.m)	V12 (t)
8	0.8	-1.15	
		7.15	
9	0.4	7.44	

		-1.66	
10	0.4	7.35	
		-1.58	

DISEÑO 47.4 MX (+) t.m
-42.59 MX (-) t.m
7.1 V12 t

Tabla 4.14. Momentos y Cortante en Dirección Y en Franjas de “Losa de Generador”

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M22 = MY (t.m)	V13 (t)
1	0.8	7.97	
		0.29	
2	1	0.46	
		0.38	
3	1	-6.3	35.7
		10.9	
4	0.86	-11.38	
		7.93	
5	0.86	-4.45	
		0.81	
6	0.7	-3.45	
		4.94	

7	0.58	-35.85	
		31	
8	0.4	-39.3	
		36.34	

DISEÑO	36.34	MY (+) t.m
	-39.3	MY (-) t.m
	35.7	V13 t

4.6.5.3. Determinación de momentos y cortantes en la losa de la turbina debido a la combinación de cargas COMBu2

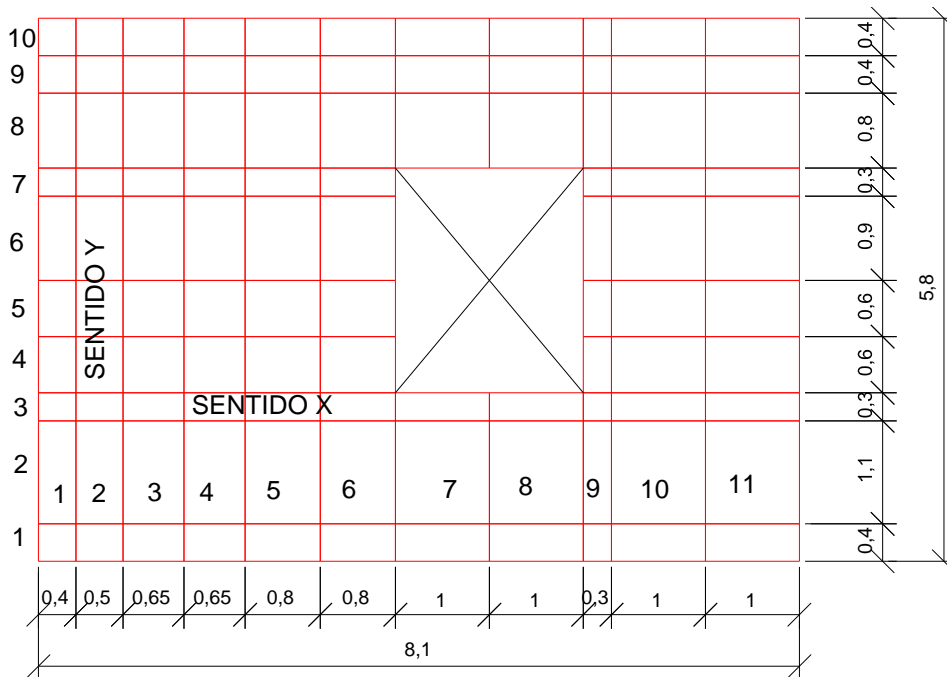
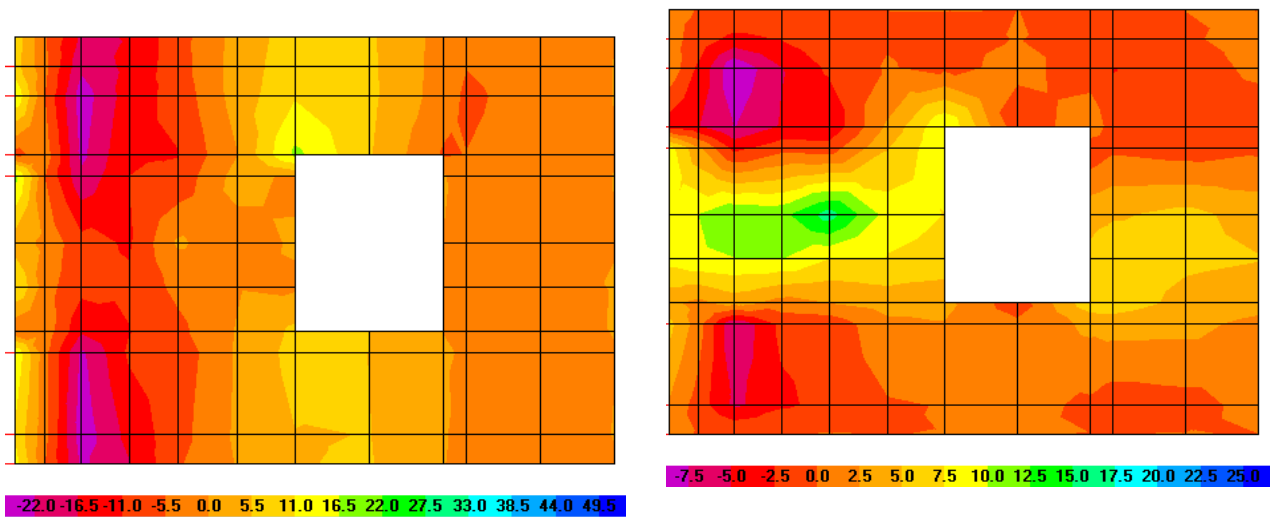


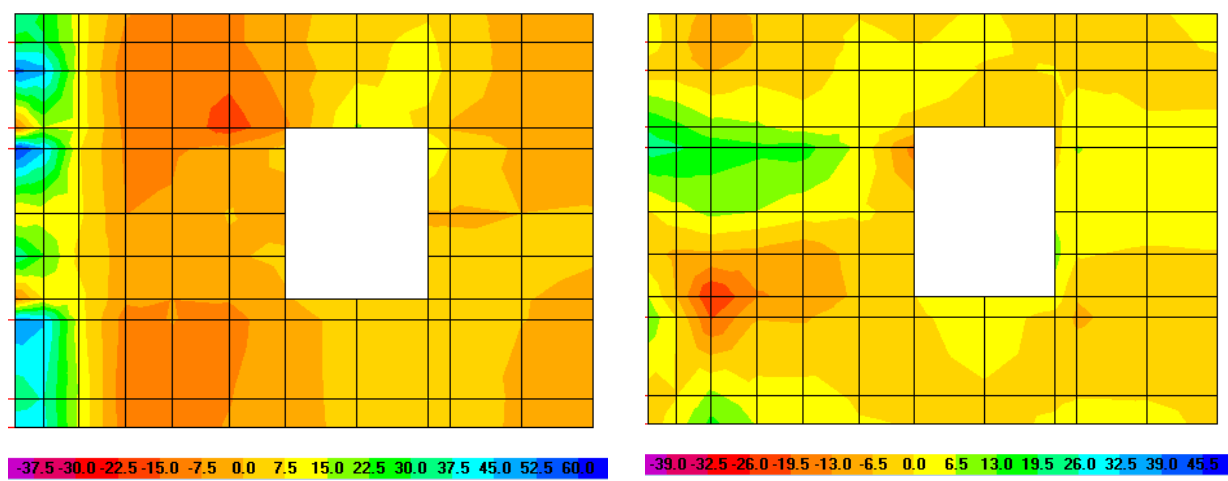
Figura 4.35 Dimensión de discretizaciones y numeración de franjas “Losa de Turbina”



(a)

(b)

Figura 4.36. Losa de Turbina (a) Momentos X (M1) (b) Momentos Y (M2) (t.m) Cargas factoradas COMBU2



(a)

(b)

Figura 4.37. Losa de Turbina **(a)** Cortantes X (V13) **(b)** Cortantes Y (V23) (t.)
COMBU2

Cargas factoradas

Tabla 4.15. Momentos y Cortante en Dirección X en Franjas de “Losa de Turbina”

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M11 = MX (t.m)	V12 (t)
1	0.4	-7.5	
		7.91	
2	1.1	-3.58	
		-1.05	
3	0.3	3.2	
		-3.67	
4	0.6	2.89	
		-2.53	
5	0.6	-9.51	
		8.56	
6	0.9	-1.89	
		3.26	
7	0.3	-3.68	23.85
		3.08	

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M11 = MX (t.m)	V12 (t)
8	0.8	6.54	
		-6.44	
9	0.4	12.01	
		-11.77	
10	0.4	8.47	
		-8.23	

DISEÑO	12.01	MX (+) t.m
	-11.77	MX (-) t.m
	23.85	V12 t

Tabla 4.16. Momentos y Cortante en Dirección Y en Franjas de “Losa de Turbina”

#	ANCHO DE FRANJA (m)	MOMENTO M22 = MY (t.m)	V13 (t)
1	0.4	6.11	20.6
		-6.78	
2	0.5	18.55	
		-17.1	
3	0.65	3.82	
		-2.99	

4	0.65	-1	
		1.83	
5	0.8	3.95	
		-3.32	
6	0.8	-2.79	
		9.61	
7	1	-14.06	
		15.03	
8	1	-13.43	
		14.26	
9	0.3	-10.05	
		10.21	
10	1	0.4	
		2.5	
11	1	0.59	
		12.63	

DISEÑO

18.55 MY(+) t.m

-17.1 MY(-) t.m

20.6 V13 t

4.6.5.4. Determinación de esfuerzos en muros para la combinación COMBu2

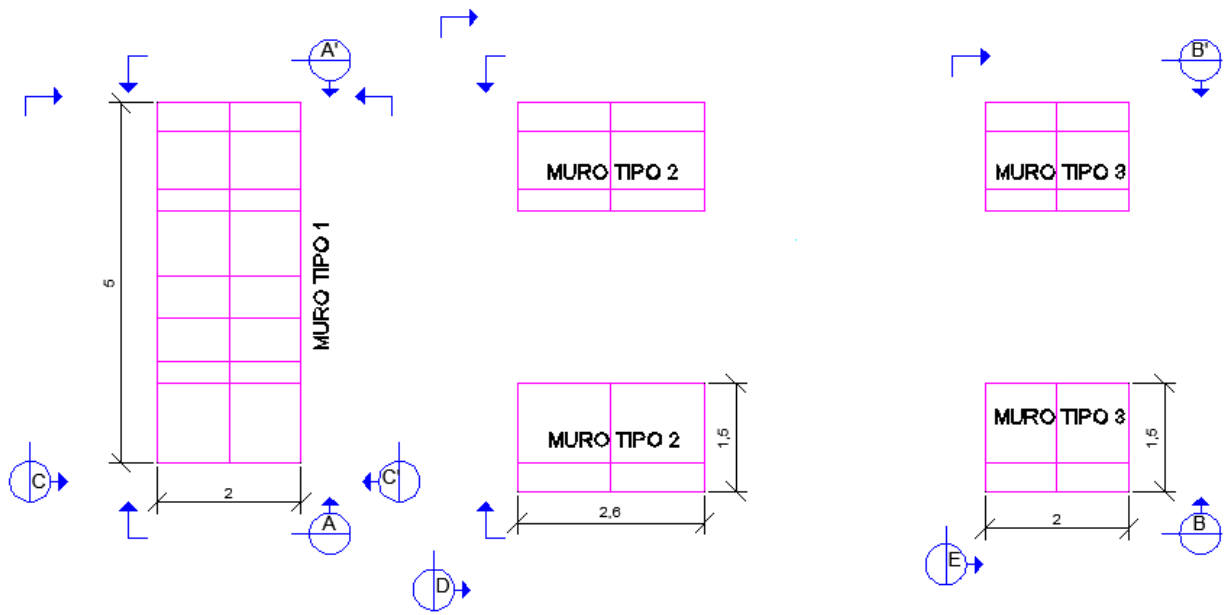
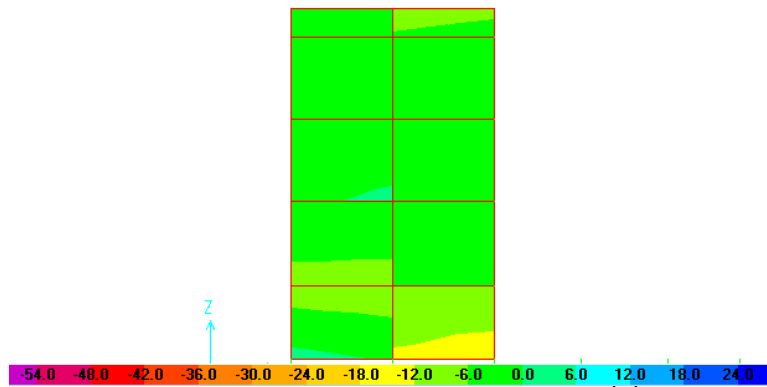
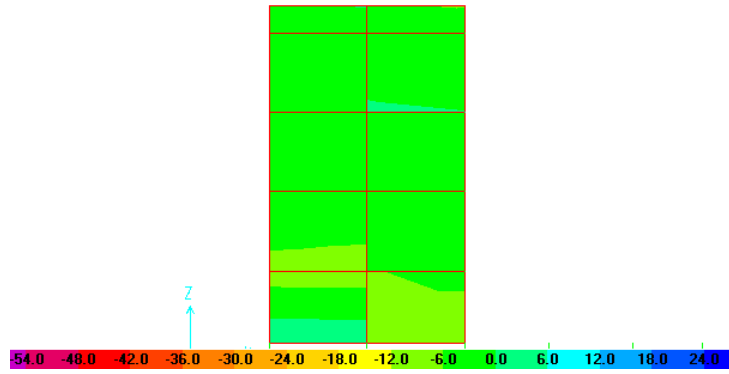


Figura 4.38 Vista en planta de los tipos de muros de la estructura de cimentación



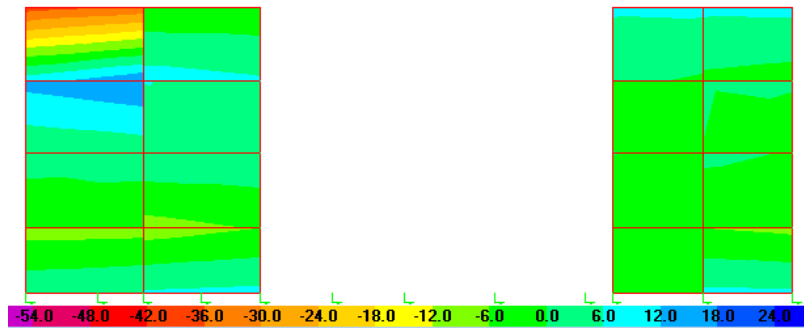
(a)



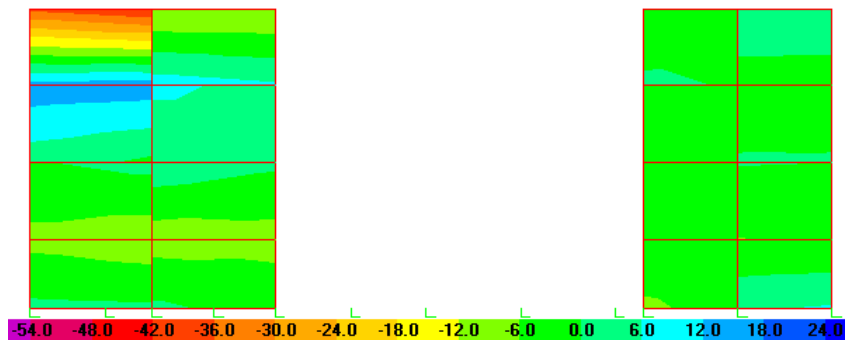
(b)

Figura 4.39. Elevación Muro Tipo 1. (a) Corte A, esfuerzos sentido X (t/m²)

(b) Corte A' , esfuerzos en sentido X (t/m²)



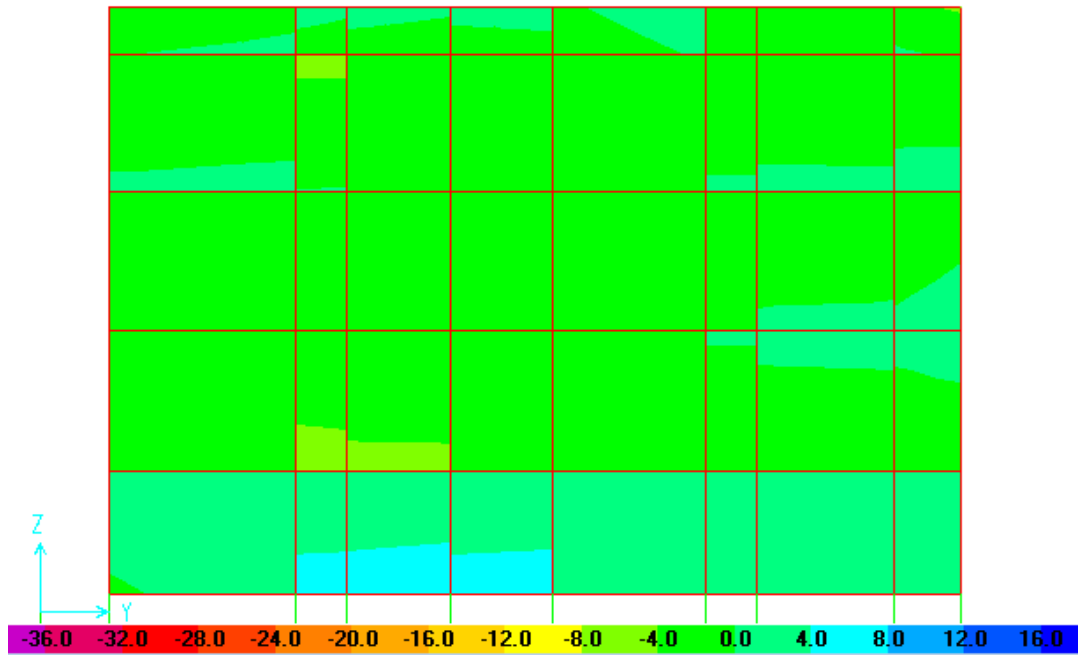
(a)

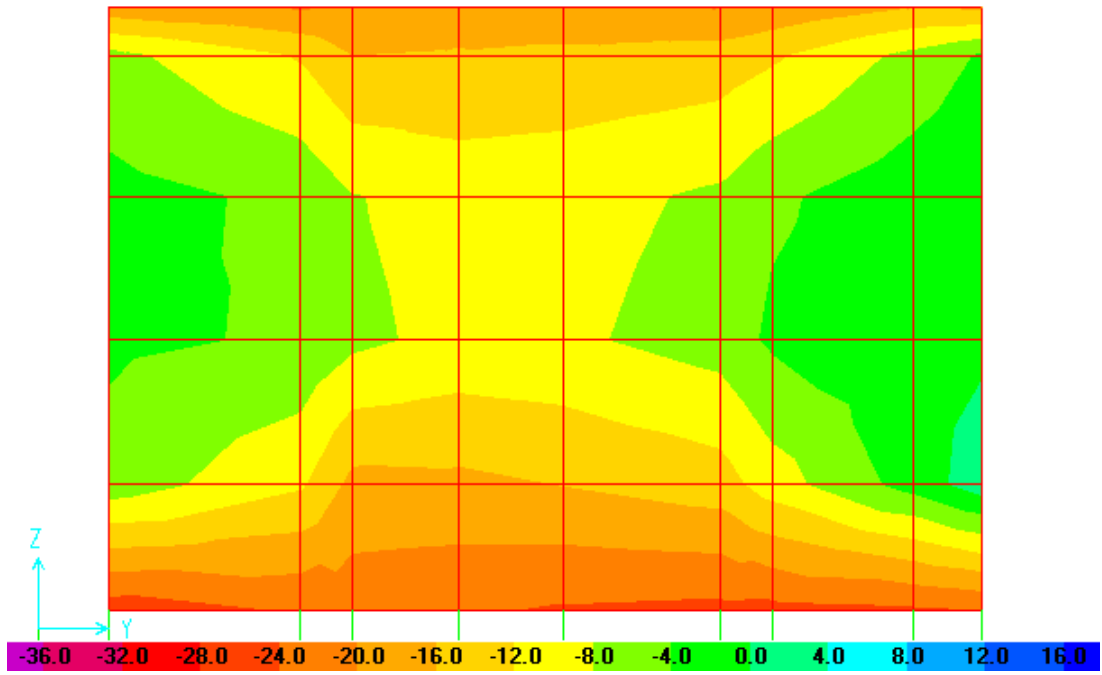


(b)

Figura 4.40. Elevación Muro Tipo 2 y Tipo 3. **(a)** Corte B, esfuerzos sentido X (t/m²)

(b) Corte B' , esfuerzos en sentido X (t/m²)





(b)

Figura 4.41. Elevación Muro Tipo 1. (a) Corte C, esfuerzos sentido Y (t/m²)

(b) Corte C' , esfuerzos en sentido Y (t/m²)

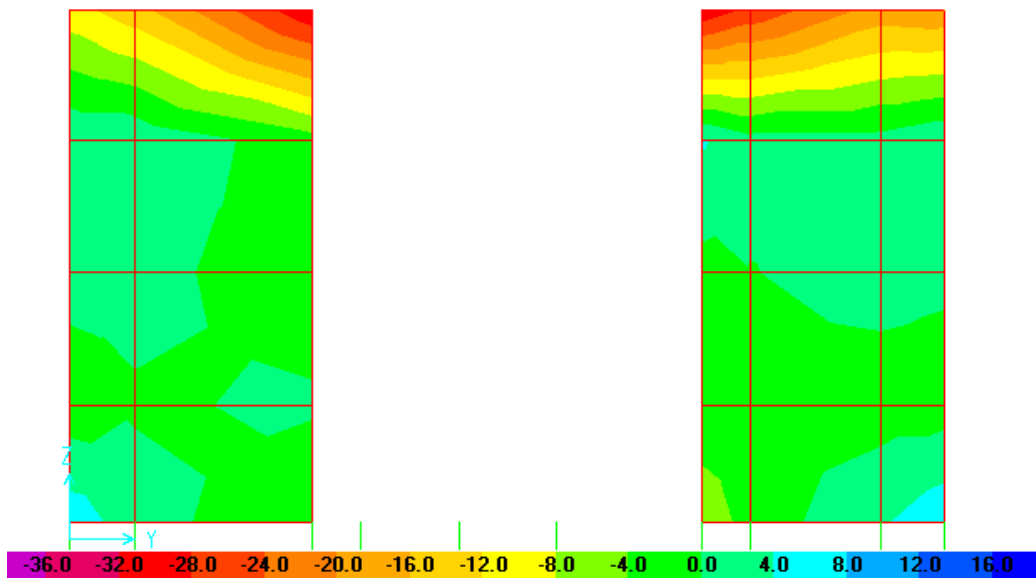


Figura 4.42. Elevación Muros Tipo 2. (a) Corte D, esfuerzos sentido Y (t/m²)

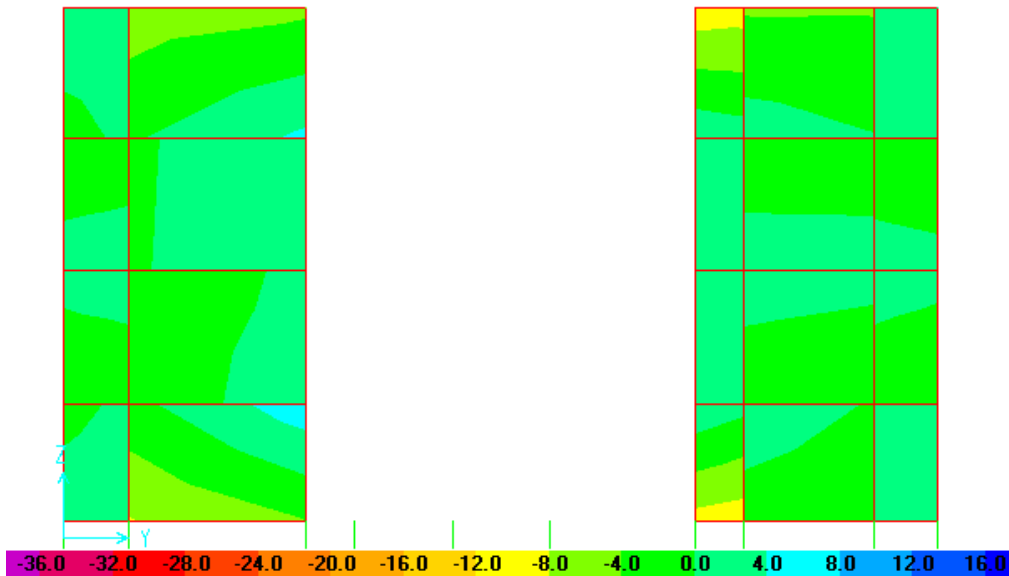


Figura 4.43. Elevación Muros Tipo 2. (a) Corte E, esfuerzos sentido Y (t/m²)

A continuación se presenta los momentos y cargas actuantes en cabeza y pie de muros,

Tabla 4.17 Momentos y cargas actuantes en el “Muro Tipo 1”

MURO TIPO 1			
CARA FRONTAL SENTIDO X		CARA POSTERIOR SENTIDO X	
	MX (t.m)	P (t)	
	MX (t.m)	P (t)	
Pie de muro	50.2	98.95	16.46
Cabeza de muro	33.15	72.33	24.16

		CARA EXTERIOR SENTIDO Y		CARA INTERIOR SENTIDO Y	
		MY (t.m)	P (t)	MY (t.m)	P (t)
Pie de muro		6.54	47.19	14.88	359
Cabeza de muro		1.91	41.26	20.3	260.49

Tabla 4.18 Momentos y cargas actuantes en el “Muro Tipo 2”

MURO TIPO 2					
MURO FRONTAL					
		MX (t.m)	P (t)	MY (t.m)	P (t)
Pie de muro		0.37	7.75	23.46	97.44
Cabeza de muro		5.85	4.73	10.83	76.73
MURO POSTERIOR					
		MX (t.m)	P (t)	MY (t.m)	P (t)
Pie de muro		4.8	24.15	27.96	86.39
Cabeza de muro		1.32	25.46	14.4	66.04

Tabla 4.19 Momentos y cargas actuantes en el “Muro Tipo 3”

MURO TIPO 3					
MURO FRONTAL					
		MX (t.m)	P (t)	MY (t.m)	P (t)
Pie de muro		9.66	2.27	14.68	101
Cabeza de muro		5.25	3.44	14.21	81.05
MURO POSTERIOR					
		MX (t.m)	P (t)	MY (t.m)	P (t)

Pie de muro	12.65	11.01	21.88	88.91
Cabeza de muro	11.32	5.38	15.61	62.67

4.6.6.DISEÑO A FLEXIÓN

Las dimensiones de las losas de la turbina y del generador y de los muros de apoyo fueron dadas por el fabricante de los equipos y son muy grandes en relación a las cargas actuantes.

El refuerzo mínimo cuando existe tensión por flexión será:

$$As_{min} = 0.0018 b h$$

El refuerzo mínimo para contracción y temperatura será:

$$As_{temp.} = 0.0010 b h$$

Los momentos y cargas actuantes en los muros, son muy pequeños por lo que al ingresar a los diagramas de interacción de columnas rectangulares, no es posible determinar una cuantía de armado, las abscisas y ordenadas calculas caen está por debajo del nivel de apreciación. Por lo que solamente se requiere refuerzo mínimo, que se calcula con las siguiente ecuaciones expresiones:

$$As_{horizontal} = 0.0010 b h$$

$$As_{vertical} = 0.0006 b h$$

Para los 4 muros más pequeños, que en algo se parecen a columnas, el refuerzo $As_{vertical}$ se aumenta a 0.0010 b h.

Debido a que las losas y muros tienen espesores muy grandes, se toma como espesor colaborante $h = 80$ cm como máximo para obtener un refuerzo de piel solamente.

Tabla 4.20 Diseño a flexión de losas

Datos generales		b (cm)	f_c (Kg/cm ²)	f_y (Kg/cm ²)						
		100	240	4200	DISEÑO A FLEXION					
		$M_u(-)$	$M_u(+)$	h	d	ρ	ρ_{min}	ρ_{max}	A_s min	Varillas
		(T-m)	(T-m)	(cm)	(cm)			$0.5 \cdot \rho_b$	cm ²	
Cimen.	Mx	32.360		80	72	0.001680	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
			22.780	80	72	0.001177	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
	My	38.550		80	72	0.002009	0.0018	0.0124	14.46	\emptyset 20mm @ 20
			32.160	80	72	0.001670	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
Turbina	Mx	11.770		95	87	0.000413	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
			12.010	95	87	0.000422	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
	My	17.100		95	87	0.000601	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
			18.550	95	87	0.000653	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
Generador	Mx	42.59		150	142	0.000562	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
			47.4	150	142	0.000626	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
	My	39.300		150	142	0.000518	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20
			36.340	150	142	0.000479	0.0018	0.0124	14.40	\emptyset 20mm @ 20

En la tabla se observa que todos las cuantías de armado son menores que la mínima, a excepción de la cuantía 0.002 en la losa de cimentación. Pero queda dentro de la cuantía real de armado que se obtiene con $1\emptyset 20\text{mm}@20\text{cm}$

Para los muros la armadura sería

$$A_s = 0.001 \cdot b \cdot h$$

$$A_s = 0.001 \cdot 100 \cdot 80$$

$$A_s = 8 \text{ cm}^2 \rightarrow 1\emptyset 16@25\text{cm}$$

Los detalles del refuerzo se pueden ver en los planos respectivos.

4.6.7. CHEQUEO DE CORTE

El chequeo de corte en las losas se realiza en la dirección X como en la dirección Y. Para los valores críticos. V_c corresponde al valor que el hormigón resiste a corte y es igual a $0.53(f'c)^{1/2}$, $\phi = 0.85$

Tabla 4.21 Chequeo de cortante

CHEQUEO DE CORTE						
		V_u	h	d	ϕV_c	
		(T)	(cm)	(cm)	(T)	
Cimen.	Vx	25.040	80	72.0	50.25	ok
	Vy	28.930	80	72.0	50.25	ok
Turbina	Vx	23.850	95	87.0	60.718	ok
	Vy	20.600	95	87.0	60.718	ok
Generador	Vx	7.130	150	142.0	99.103	ok
	Vy	35.720	150	142.0	99.103	ok

Contenido

4.1.	ANTESCEDENTES	XCV
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO ESTRUCTURAL	XCV
4.3.	SOLICITACIONES	XCVI
4.4.	MATERIALES	XCVII
4.4.1.	HORMIGÓN.....	XCVII
4.4.2.	ACERO.....	XCVII
4.5.	DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS LATERALES DE DISEÑO MÍNIMAS.	XCVII
4.6.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	XCVIII
4.6.1.	CREACIÓN DEL MODELO	XCVIII
4.6.1.1.	Tipología Geométrica	XCVIII
4.6.1.2.	Definición de Materiales	C
4.6.1.3.	Definición de Secciones.....	CI
i.	Geometría de elementos tipo shell	CI
ii.	Clases de elementos tipo shell	CII
iii.	Creación de la sección del elemento Shell	CIII
iv.	Secciones definidas para el modelo de la cimentación	CIV
4.6.1.4.	Asignación de Cargas	108

i.	Peso propio	108
ii.	Carga estática (peso del turbogenerador)	110
iii.	Carga de operación normal del turbogenerador	113
iv.	Par de corto circuito	116
v.	Fuerzas sísmicas en los cojinetes en sentido X	119
vi.	Fuerzas sísmicas en los cojinetes en sentido Y	122
vii.	Carga viva	127
viii.	Peso del suelo de relleno	127
ix.	Acción Dinámica	127
4.6.1.5.	Combinaciones de Carga	133
4.6.2.	ESFUERZOS EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN	134
i.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMB1	137
ii.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMB2	138
iii.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBu1	139
iv.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBu2	140
v.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBu3	141
vi.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBuX	143
vii.	Esfuerzos en el suelo para la combinación de cargas COMBuy	144
4.6.3.	AMPLITUDES MEDIDAS EN LOS COJINETES	146
4.6.4.	MODELACIÓN DE ACCIONES DINÁMICAS	147
4.6.5.	DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS DE DISEÑO	147
i.	Determinación de la combinación de cargas crítica	147
ii.	Determinación de esfuerzos sobre los elementos debido a la combinación de cargas COMBu2	149
4.6.5.1.	Determinación de momentos y cortantes en la losa de cimentación debido a la combinación de cargas COMBu2	151
4.6.5.2.	Determinación de momentos y cortantes en la losa del generador debido a la combinación de cargas COMBu2	159
4.6.5.3.	Determinación de momentos y cortantes en la losa de la turbina debido a la combinación de cargas COMBu2	163
4.6.5.4.	Determinación de esfuerzos en muros	CLXVIII
4.6.6.	DISEÑO A FLEXIÓN	CLXXIV
4.6.7.	CHEQUEO DE CORTE	CLXXVI

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- i.** El funcionamiento normal de la máquina induce vibraciones en la cimentación, es necesario entonces realizar un análisis dinámico del sistema máquina cimentación, el cual nos permitirá proyectar estructuras seguras y eficientes.
- ii.** Las vibraciones son nocivas para la máquina y el entorno mismo, los movimientos que se presentan en la cimentación de una máquina introducen energía al suelo, la cual se propaga en forma de ondas, cuando mayor es la capacidad de carga del suelo, mayor es la velocidad de propagación de las ondas, estas no deberán ser molestas a personas que requieren permanecer cerca del equipo, ni deberán afectar el funcionamiento de máquinas vecinas.
- iii.** Para funcionar correctamente, tanto las máquinas alternantes como las giratorias requieren que, bajo condiciones de operación no se encuentren sujetas a movimientos excesivos. La vibración a alta frecuencia es peligrosa, entonces la amplitud permisible es inversamente proporcional a la velocidad de operación normal.
- iv.** Las dimensiones de esquema de la cimentación son generalmente proporcionadas por los fabricantes de máquinas. Si la elección de las dimensiones se asigna a la de diseño, debe revisarse que estas sean, por lo menos, igual que las dimensiones mínimas posibles de la cimentación, para que cumplan con los criterios de diseño seleccionados.

- v. En el diseño de una cimentación para maquinaria debe definirse la forma estructural de la 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.
- vi. La frecuencia del sistema es 6.42 Hz y la de la máquina 50 Hz. lo que garantiza que no existirá resonancia.
- vii. En el resumen de materiales de la estructura de cimentación diseñada observamos que se requiere 212.77 m^3 de hormigón y 10811.85 kg. La relación de estos es 50.81 kg/m^3 , cumpliendo de esta manera con la recomendación de colocar una armadura mínima de 50 kg/m^3 para cimentaciones tipo pórtico.

6.2. RECOMENDACIONES

- i. Obtener de los fabricantes toda la información de la máquina y de acuerdo al tipo de la misma escoger el modelo adecuado para el análisis.
- ii. Todas las partes giratorias y oscilantes de la máquina, deberán estar balanceadas. El desbalanceo es una de las principales causas de vibración en maquinaria rotativa, este efecto indeseable, induce fuerzas nocivas en máquina y estructura, lo cual puede provocar falla prematura en rodamientos, acoples, carcasas, estructuras, etc.
- iii. Para disminuir las vibraciones de la cimentación y por tanto la energía transmitida al suelo, se presentan las siguientes recomendaciones.
 - a. Utilizar un amortiguador dinámico, el cual consiste en una pequeña masa y un resorte con valores particulares tales que, al sujetarse a la cimentación atrae gran parte de la energía de vibración, lo que produce que la pequeña masa tenga movimientos grandes pero logra que se reduzcan los de la cimentación.
 - b. Utilizar una cama de corcho aglomerado, este es el material cuya utilización ha sido generalizada. Debido a que es elástico, aislante, imputrescible e inatacable por el agua y el aceite.
- iv. La cimentación debe tener una frecuencia propia tan diferente como sea posible de la de la máquina, para evitar las vibraciones excesivas causadas por el fenómeno de la resonancia, esto debe cumplir no solo la cimentación, sino

también el conjunto de la obra y cada uno de sus elementos. Un margen de al menos 20% debe ser garantizado en el diseño.

- v.** Es recomendable que las amplitudes máximas en direcciones y puntos específicos, se obtengan de los fabricantes de la máquina. Los puntos más importantes para revisar las amplitudes de vibración generalmente son los cojinetes de la máquina. A falta de información de parte del fabricante del equipo puede utilizarse la figura 1.1, presentada en el Manual, es importante cumplir con la limitación de amplitudes ya que de lo contrario puede llevar a desgastes heterogéneos y prematuros que aumentan el costo del mantenimiento y disminuyen la vida útil del equipo.
- vi.** 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 los autores del proyecto general de esas instalaciones.
- vii.** Las estructuras de cimentación tipo pórtico deberán tener un refuerzo mínimo de 50 kg por metro cubico.

BIBLIOGRAFÍA.

- Barkan, D.D., "Dynamics of bases and Foundations", Mc.Graw-Hill Book Company, Inc 1967.
- Luthé García Rodolfo-Resines Javier y Otros, "Análisis dinámico de Cimentaciones", Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, México, 1969.
- Srinivasulu-Vaidyanathan V., "Handbook of Machine Foundation", bulletin, 1983.
- Alexander Major, "Vibration Analysis and design of foundations for machines and turbines", Collet's Holdings Limited, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1962.
- ACI 351.3R-04, "Foundations for Dynamic Equipment", Reported by ACI Committee 351, 2004
- Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Crespo Villalaz
- Dinámica de Estructuras con Matlab, Dr. Roberto Aguiar Falconí.

BIOGRAFÍA

Nombre: Eduardo Sebastián López Moreno

Lugar de Nacimiento: Riobamba-Ecuador

Fecha de Nacimiento: 12 de Enero de 1987

Estudios Primarios: Pensionado Olivo, 1998

Estudios Secundarios: San Felipe Neri, 2004

Estudios Superiores: Escuela Politécnica del Ejército, 2010

Email: eduardolopez.eslm@yahoo.com

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR:

SR. EDUARDO LÓPEZ MORENO

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

SR. ING. JORGE ZUÑIGA GALLEGOS

SECRETARIO ACADEMICO

SR. AB. MARIO LOZADA

Lugar y fecha: Sangolquí, julio de 2010

