UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO ANALITICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES EN CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA INDUSTRIAL

POR

CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERIA ESTRUCTURAL

DICIEMBRE DE 1998

ESTUDIO ANALITICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES EN CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA INDUSTRIAL

C. A. J. A.

TM
TJ249
.J8
1998
c.1

1080098226

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO ANALITICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AUTOMATISMO DE LAS VIBRACIONES DE GEOTECNIA EN LA MAQUINARIA INDUSTRIAL

POR

[illegible] JUAREZ ALVAREZ

[illegible] REQUISITO PARCIAL
[illegible] OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERIA ESTRUCTURAL

DICIEMBRE DE 1989

TM
TJ249
J8
199
.1

BU Raúl Rangel Frías
UANL
FONDO
TESIS MAESTRIA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES EN CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA INDUSTRIAL

Por

CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Estructural

Diciembre, 1 9 9 8

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL U.A.N.L.
SECRETARIA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES EN CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA INDUSTRIAL

Aprobación de la Tesis:

Asesor de la Tesis
Dr. Ricardo González Alcorta

Secretario de la División de Estudios de Postgrado
Dr. Ricardo González Alcorta

CD. UNIVERSITARIA SAN NICOLAS DE LOS GARZA N. L. MEX. TEL Y FAX: 376-39-70 Y 352-49-69 EXT. 202

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SECRETARIA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

COMPROBANTE DE CORRECCION

Tesista: CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Tema de la tesis: ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES EN CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA INDUSTRIAL

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA **del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.**

Recomendaciones adicionales:

NINGUNA

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez

El Secretario de Posgrado:

Dr. Ricardo González Alcorta

Ciudad Universitaria, a 7 **de** diciembre **de 199** 8.

CD. UNIVERSITARIA SAN NICOLAS DE LOS GARZA N. L. MEX. TEL Y FAX: 376-39-70 Y 352-49-69 EXT. 202

San Nicolás de los Garza, N.L. a 4 de diciembre de 1998

DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
SECRETARIO DE LOS ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

Estimado Dr. González:

Por medio de la presente, solicito a Usted la tramitación correspondiente, para sustentar mi examen de grado, ya que he concluido con la elaboración de mi tesis titulada "Estudio Analítico de los Efectos Causados por el Aislamiento de las Vibraciones en Cimentaciones para Maquinaria Industrial"; la que elaboré como requisito para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural, habiendo sido aprobada en el aspecto técnico por mi asesor el Dr. Ricardo González Alcorta y en el aspecto ortográfico, metodológico y estilístico por el Arq. Ramón Longoria Ramírez.

Agradeciendo de antemano las atenciones que se sirva dar a la presente, me despido de usted quedando como su más y seguro servidor.

A T E N T A M E N T E

Ing. César A. Juárez Alvarado

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a su Facultad de Ingeniería Civil que me permitieron cursar esta Maestría.

A todos los maestros que, con sus consejos y conocimientos, me motivaron para finalizar mis estudios.

Pero sobre todo, quiero agradecer la valiosa ayuda que recibí del Dr. Ricardo González Alcorta, al asesorarme en el desarrollo de este trabajo y apoyarme decididamente en la obtención de este objetivo.

DEDICATORIA

A mi amada esposa Gladys por todo el apoyo y la paciencia que me brindo para conseguir esta meta.

A mi querido hijo César Antonio que con su amor me motivo para tratar de ser un ejemplo para él

A mi familia que aunque se encuentra lejos su apoyo y su cariño nunca me faltaron.

Al recuerdo de mi adorada madre que siempre me ha impulsado para la obtención de mis objetivos.

RESUMEN

César Antonio Juárez Alvarado **Fecha de Graduación: diciembre,1998**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES EN CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA

Número de páginas: 255 **Candidato para el Grado de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural.**

Area de Estudio: Dinámica Estructural

Propósito y Método del Estudio: Las cimentaciones de maquinaria requieren una atención especial del ingeniero diseñador, ya que la operación del equipo genera fuerzas y momentos dinámicos desbalanceados. La cimentación de la maquinaria transmite las cargas dinámicas al suelo de desplante y éstas se adicionan a las cargas estáticas debidas a la combinación del peso de la maquinaria y del bloque de soporte. La práctica común en el diseño y construcción de cimentaciones para maquinaria fue la de proporcionar grandes masas de concreto para controlar las amplitudes de vibración. Aunque esto resultó satisfactorio durante algún tiempo, actualmente se buscan las soluciones más eficientes y económicas. Es así como se ha extendido el uso de los sistemas de aisladores de vibración, con la idea fundamental de reducir las amplitudes y tener menores masas de concreto en la cimentación. En este trabajo se evaluó analíticamente los modelos dinámicos de cimentaciones para maquinaria con y sin aislamiento y, se determinó el efecto del aislamiento de la vibración.

Contribuciones y Conclusiones: La veracidad de los resultados obtenidos de los modelos matemáticos discretos, depende en gran medida de los valores elegidos o calculados para la masa, el coeficiente de amortiguamiento y la constante de rigidez. La necesidad de predecir más exacta y completamente el comportamiento dinámico de las cimentaciones para maquinaria, trae inevitablemente consigo el planteamiento de nuevos y más complicados problemas que se deben resolver. Por tal motivo es esencial entender el verdadero núcleo del problema, esto es, la evaluación de la respuesta del cimiento sujeto a efectos dinámicos.

FIRMA DEL ASESOR:_____

PROLOGO

El propósito fundamental que se persigue en este trabajo es el de aportar algunas ideas relacionadas con el aislamiento de vibraciones en maquinarias, aplicando conceptos teóricos que pudieran ser de utilidad al lector, en la solución de problemas prácticos, a los cuales se tenga que enfrentar.

Esta tesis se divide en nueve capítulos, los cuales se describirán brevemente a continuación:

Capítulo 1. *Introducción*.- En este capítulo se menciona la relevancia que tiene el diseño de una cimentación para maquinaria, y los inconvenientes resultantes de los descuidos en el diseño y la construcción. Así también contiene información sobre el alcance y los objetivos de la tesis.

Capítulo 2. *Los Tipos de Maquinaria y sus Cimentaciones*.- Se hace una breve descripción de los diferentes tipos de maquinaria que pueden originar vibraciones clasificándolas de acuerdo con su funcionamiento. También se establecen las características de las cimentaciones que se consideran adecuadas para cada tipo.

Capítulo 3. *Propiedades Dinámicas del Suelo*.- En este capítulo se describen tanto los ensayes de laboratorio como los de campo, los cuales proporcionarán los parámetros del suelo, necesarios para el diseño.

Capítulo 4. *Análisis de Vibraciones*.- Se presenta la teoría de las vibraciones para los modos de vibrar de un bloque de concreto. Este capítulo es la base de los capítulos siguientes.

Capítulo 5. *Análisis del Bloque de Cimentación para Maquinaria*.- Se complementa la información del capítulo anterior y ofrece un procedimiento para el análisis y el diseño de cimentaciones en bloque, para maquinarias.

Capítulo 6. *Sistemas de Aislamiento de Vibración*.- El concepto fundamental de la transmisibilidad de las vibraciones se define en esta parte de la tesis, y se mencionan los tipos de aisladores más usados comercialmente. También, se da un procedimiento de diseño considerando sistemas de aislamiento.

Capítulo 7. *Evaluación Analítica de los Efectos del Aislamiento*.- Este capítulo es de suma importancia, ya que en el se presenta la aplicación de las teorías estudiadas anteriormente, y se obtienen algunos resultados que servirán para obtener las conclusiones.

Capítulo 8. *Aspectos Constructivos de Cimentaciones para Maquinaria*.- Se presentan algunas sugerencias y recomendaciones generales para la adecuada construcción de bloques de cimentación, y la posible instalación de aisladores de vibración.

Capítulo 9. *Discusión de Resultados y Conclusiones*.- Se interpretan los resultados obtenidos en el capítulo 7, y se concluye con respecto a los objetivos planteados en el inicio.

Espero sinceramente que lo tratado en este trabajo sea de utilidad para el lector y que pueda servir de referencia en la solución de algún problema específico, del diseño de cimentaciones para maquinaria.

César A. Juárez A.

INDICE DE CONTENIDO

PROLOGO viii
NOMENCLATURA xiii

Capítulo **Página**

1. INTRODUCCION 1

   1.1 Alcance del Estudio 4
   1.2 Objetivos 5

2. LOS TIPOS DE MAQUINARIA Y SUS CIMENTACIONES 6

   2.1 Máquinas Reciprocantes 6
   2.2 Máquinas Rotatorias 10
   2.3 Máquinas de Impacto 16
   2.4 Equipos Especiales 21
   2.5 Tipos de Cimentaciones 23
   2.6 Requerimientos Generales para Cimentaciones De Maquinaria 25

3. PROPIEDADES DINAMICAS DEL SUELO 28

   3.1 Introducción 28
   3.2 Procedimientos de Laboratorio 31
      3.2.1 Ensayes de Pulsos Ultrasónicos 31
      3.2.2 Ensaye de Columna Resonante 33
      3.2.3 Ensaye de Péndulo de Torsión 37
      3.2.4 Ensaye Triaxial Cíclico 40
      3.2.5 Ensaye de Corte Simple Cíclico 44
      3.2.6 Ensaye en Mesa Vibradora 49
   3.3 Métodos de Campo 52
      3.3.1 Ensayes de Ondas de Superficie 52
      3.3.2 Ensaye de Refracción Sísmica 55
      3.3.3 Ensaye de Resonancia Vertical 59

3.3.4 Ensaye de Resonancia Horizontal 63
3.3.5 Ensayes Up-hole y Down-hole 65
3.3.6 Ensaye Cross-hole 68

4. ANALISIS DE VIBRACIONES 72

4.1 Modos de Vibración de una Cimentación en Bloque 72
4.2 Modo Translacional 75
4.2.1 Vibración Vertical 75
4.2.2 Vibración Horizontal (Deslizamiento) 93
4.3 Modo Rotacional 97
4.3.1 Vibración por Cabeceo 97
4.3.2 Vibración por Torsión 100
4.3.3 Vibración por Cabeceo - Deslizamiento 103

5. ANALISIS DEL BLOQUE DE CIMENTACION PARA MAQUINARIA 112

5.1 Efecto de la Forma de la Cimentación en la Respuesta 112
5.2 Efecto del Encajonamiento de la Cimentación 118
5.3 Procedimiento de Diseño para el Bloque de Cimentación 120
5.4 Concepto de las Fuerzas Desbalanceadas Producidas por la Maquinaria 134
5.5 Amplitud de Vibraciones Permisibles 138

6. SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE VIBRACION 141

6.1 Transmisibilidad-Aislamiento Activos y Pasivos 141
6.2 El Principio de la Absorción de Vibración 146
6.3 Métodos Generales de Sistemas de Aislamiento 153
6.4 Características de los Aisladores de Vibración más comunes 157
6.5 Procedimiento de Diseño para Cimentaciones con Aisladores 165
6.6 Reducción de Amplitudes de Vibración en Cimentaciones de Maquinaria Existentes 170

7. EVALUACION ANALITICA DE LOS EFECTOS DEL AISLAMIENTO 177

7.1 Planteamiento del Problema 177
7.2 Modelos Matemáticos 180
7.2.1 Vibración Vertical 180

7.2.2 Vibración Vertical + Aislamiento 185
7.2.3 Vibración Horizontal + Cabeceo 187
7.2.4 Vibración Horizontal + Cabeceo + Aislamiento 189
7.3 Solución a Casos Prácticos y Ejemplos Numéricos 191

8. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE CIMENTACIONES PARA MAQUINARIA 222

8.1 Construcción de Bloques de Cimentación 222
8.2 Instalación y Conexión de la Maquinaria a la Cimentación 226
8.3 Instalación de Resortes Aisladores de Vibración 230
8.4 Aspectos Generales 234
8.4.1 Cambio a la Frecuencia de la Cimentación 234
8.4.2 Adherencia entre Concreto Fresco y Endurecido 235

9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES 236

REFERENCIAS 241
APENDICES 243

APENDICE A.- Determinación de la Respuesta Dinámica Mediante un Análisis Modal 243
APENDICE B.- Gráficas del Comportamiento Dinámico 246
APENDICE C.- Cálculo de los Periodos y Formas Modales Usando el Programa CAL-91 252

NOMENCLATURA

a	Largo de la cimentación en planta
a_z	Aceleración de vibración
a_h	Aceleración horizontal
a_o	Término dimensional de frecuencia
$a_{o\phi}$	Frecuencia dimensional
b	Relación de masa, ancho de la cimentación en planta o del aislador
$d_{1,2,3}$	Espesores de los estratos del suelo
e	Relación de vacíos, excentricidad
f	Frecuencia de vibración
f_m	Velocidad de operación de la máquina
f_n	Frecuencia de resonancia, frecuencia natural del sistema
f_R	Frecuencia de resonancia vertical ó horizontal
f_1, f_2	Funciones de desplazamiento de Reissner
g	Aceleración debido a la gravedad de la tierra
h	Altura del espécimen, altura del aislador de hule o goma
k_x	Constante de resorte equivalente horizontal
k_z	Constante de resorte equivalente vertical

k_1 Rigidez equivalente del sistema aislador

k_2 Rigidez equivalente del suelo

k_ϕ Constante de resorte para el cabeceo

k_ψ Constante de resorte para la torsión

l Largo del aislador de hule o goma

m Masa total de la cimentación y del mecanismo de excitación

m_e Masa rotatoria, relación de la masa desbalanceada

m_{rec} Masa reciprocante vertical

m_{rot} Masa rotatoria

m_1 Masa del bloque de cimentación + maquinaria

m_2 Masa de la losa de base

q_c Variación del esfuerzo cíclico

r_o Radio de la base del oscilador circular apoyado en el semi-espacio

t Tiempo

t_c Tiempo en el ensaye de pulso a compresión

t_s Tiempo en el ensaye de pulso a torsión

x Desplazamiento horizontal

$\dot{x}$ Primera derivada del desplazamiento horizontal (velocidad)

$\ddot{x}$ Segunda derivada del desplazamiento horizontal (aceleración)

x_o Desplazamiento de la base

$x_{1,2,3}$ Distancias de la fuente a los puntos de cambio de pendiente

z Desplazamiento vertical

z_p Desplazamiento del pistón de un cilindro

z_s Desplazamiento estático

$\dot{z}$ Primera derivada del desplazamiento vertical (velocidad)

$\ddot{z}$ Segunda derivada del desplazamiento vertical (aceleración)

A_b Area de contacto del bloque

A_h Amplitud de vibración del movimiento horizontal

A_r Relación de área

A_x Amplitud amortiguada del deslizamiento acoplado con el cabeceo

A_z Amplitud de vibración del movimiento vertical

A_ϕ Amplitud amortiguada del cabeceo acoplado con el deslizamiento

A_ψ Amplitud de vibración por torsión

B Ancho del área de contacto del bloque

B_x Relación de masa modificada para vibración horizontal

B_z Relación de masa modificada para vibraciones verticales

B_ϕ Relación de masa en rotación

B_ψ Relación de masa en torsión

C $J_a h\ I_p$

C_c Amortiguamiento crítico

C_s Coeficiente en función de la relación $L\ B$

C_u Coeficiente de compresión uniforme elástica

C_τ Coeficiente de cortante

C_x Constante de amortiguamiento horizontal

C_z Constante de amortiguamiento vertical

C_ϕ Constante de amortiguamiento por cabeceo

$C_{\phi c}$ Constante de amortiguamiento crítico por cabeceo

C_ψ Constante de amortiguamiento por torsión

D Diámetro del espécimen

E_{eq} Módulo dinámico equivalente de Young

G Módulo dinámico al esfuerzo cortante

H Altura del bloque de cimentación

I Momento de inercia del área de la base

I_p $\pi D^4\ 32$

I_z Momento polar de inercia del área de la base

J Momento de inercia del espécimen

J_a Momento de inercia de las masas

J_o Momento de inercia de la cabeza del sistema

K Módulo dinámico de deformación volumétrica

K_c Rigidez a compresión de un aislador de hule o goma

K_s Rigidez a corte de un aislador de hule o goma

L Longitud del espécimen, longitud del área de contacto del bloque

L_r Longitud de onda

M Masa del bloque y del vibrador

M_m Momento de inercia de la masa con respecto al eje que del c.g.s.

M_{mo} Momento de inercia de la masa de la cimentación y de la máquina

M_{mz} Momento polar de inercia de la masa

M_R Momento debido a la resistencia del semi-espacio elástico

M_x Factor de amplificación horizontal

M_y Momento de excitación en el plano ZX

M_z Momento de excitación horizontal actuando alrededor del eje Z

M_ϕ Factor de amplificación

P Carga axial

PR Potencia de entrada

P_a Carga efectiva por resorte

P_o Amplitud de la fuerza total aplicada en el área circular de contacto

P_x Amplitud de la fuerza horizontal

P_z Amplitud de la fuerza vertical

Q_o Fuerza externa oscilatoria

R Reducción relativa de la vibración transmitida

R_x Fuerza resistente horizontal en la base

T Transmisibilidad

$T_{1,2,3}$ Tiempo de intercepción

$V_{1,2,3}$ Velocidades de propagación de los estratos

V_c Velocidad en el ensaye de pulso a compresión

V_r Velocidad de onda Rayleigh

V_s Velocidad en el ensaye de pulso a torsión, Velocidad de onda del esfuerzo cortante

W Peso total del sistema máquina - cimentación

Z Profundidad seleccionada en el ensaye de resonancia vertical, amplitud máxima vertical sin aisladores

Z_o Desplazamiento vertical del oscilador

Z_1 Amplitud máxima vertical del bloque + máquina

Z_2 Amplitud máxima vertical de la losa base

δ Deflexión estática del sistema

δ_c Deformación axial

ε_c Variación de la deformación axial cíclica

ϕ Angulo de fase, ángulo de rotación

$\dot{\phi}$ Primera derivada del ángulo de rotación

$\ddot{\phi}$ Segunda derivada del ángulo de rotación

γ Amplitud de deformación angular

γ_c Peso volumétrico del concreto

γ_s Peso volumétrico del suelo

η Grado de absorción de la vibración

λ. Relación de amortiguamiento equivalente

π 3.141593

ρ Densidad de masa del espécimen o del suelo

σ_c Presión de confinamiento

σ_d Esfuerzo axial cíclico de magnitud conocida

σ_z Distribución de presiones bajo la base

σ_{3c} Esfuerzo confinante en ensaye triaxial cíclico

τ_{xy} Esfuerzo cortante

υ Relación de poisson

υ_s Velocidad de propagación de la onda de corte en el cuerpo elástico

ω Deformación angular, frecuencia circular de la fuerza

ω_{ad} Frecuencia circular amortiguada de calibración

ω_e Frecuencia de excitación

ω_n Frecuencia natural no amortiguada del sistema

ω_{nd} Frecuencia natural amortiguada para el cabeceo y el deslizamiento

ω_{nx} Frecuencia natural del sistema suelo – cimentación (horizontal)

ω_{nz} Frecuencia natural del sistema suelo – cimentación (vertical)

$\omega_{n\phi}$ Frecuencia natural sin amortiguamiento para el cabeceo

$\omega_{n\psi}$ Frecuencia natural sin amortiguamiento para la torsión

ω_{sd} Frecuencia circular amortiguada del sistema

$\omega_{1,2}$ Frecuencia natural del sistema

ξ. Amortiguamiento

ξ_x Relación de amortiguamiento para vibraciones por deslizamiento

ξ_z Relación del amortiguamiento vertical

ξ_ϕ Relación del amortiguamiento para el cabeceo

ξ_ψ Relación de amortiguamiento para la torsión

ψ Rotación angular de la cimentación alrededor de su eje vertical

ψ_s Raíz de la ecuación de frecuencias

ζ Fracción del amortiguamiento

ζ_a Relación de amortiguamiento del instrumento

ζ_s Relación de amortiguamiento del sistema

Δ_f Ancho de la curva de respuesta

Δ_u Presión de poro