

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **METODOLOGIA NUMERICA PARA ANALIZAR Y DISEÑAR FUNDACIONES DE MAQUINAS ALTERNATIVAS, ROTATIVAS Y DE IMPACTO.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.:

**Khazam A., José A.**

**Osechas M., Gerardo E.**

Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **METODOLOGIA NUMERICA PARA ANALIZAR Y DISEÑAR FUNDACIONES DE MAQUINAS ALTERNATIVAS, ROTATIVAS Y DE IMPACTO.**

Tutor Académico: **Prof. Jorge Barillas.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.:

**Khazam A., José A.**

**Osechas M., Gerardo E.**

Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

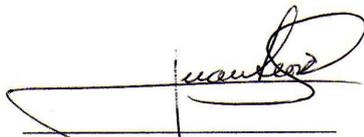
Caracas, 2008

Caracas Noviembre 2008

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Gerardo Ernesto Osechas Martínez y José Antonio Khazam Abdouch  
Titulado:

**“METODOLOGIA NUMERICA PARA ANALIZAR Y DISEÑAR FUNDACIONES DE MAQUINAS ALTERNATIVAS, ROTATIVAS Y DE IMPACTO”.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores:

  
Prof. Juan León.  
Jurado

  
Prof. Manuel Martínez  
Jurado

  
Prof. Jorge Barillas.  
Tutor Académico



## DEDICATORIA

*A dios, por darme fuerza para seguir este camino*

*A mi padre y mi madre por darme la vida*

*A mi hermano por ser mi mejor amigo y compañero*

*A mi novia con quien comencé este recorrido universitario y con quien lo he terminado*

*José Khazam*

*A dios, por guiarme en la vida*

*A mis padres por el apoyo incondicional*

*A todos aquellos que apoyaron a realizar esta tesis*

*Gerardo Osechas*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme salud y la fuerza para culminar esta etapa de mi vida.

A la Universidad Central de Venezuela por brindarnos la oportunidad de prepararnos profesionalmente y alcanzar esta meta tan importante en nuestras vidas.

Al profesor Jorge Barillas, nuestro tutor, por su apoyo, guía, orientación y conocimientos para enriquecer y culminar esta investigación.

A mi novia por su apoyo en los momentos difíciles de esta etapa de la carrera.

A mi compañero de tesis por su amistad, apoyo, esfuerzo y dedicación durante el recorrido de esta etapa tan importante de nuestras vidas.

A todas aquellas personas que de una forma u otra intervinieron en el desarrollo de este trabajo, brindando su apoyo.

**José Khazam**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por las experiencias que he tenido, que la suma de ellas es el resultado de lo que soy hoy.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería por sus enseñanzas y guía.

A la Universidad Central de Venezuela por los momentos y enseñanzas vividos.

Al profesor Jorge Barillas, tutor de esta tesis, sin su guía no sería posible este logro.

A José Khazam, compañero de tesis y amigo de carrera. Su apoyo fue vital en este proyecto

A todos mis compañeros de la universidad, la experiencia universitaria estuviera incompleta sin su compañía.

Pueden contactarnos por los correos electrónicos: Prof. Ing. Jorge Barillas: [jorgebarillas2005@gmail.com](mailto:jorgebarillas2005@gmail.com); Ing Gerardo Osechas: [zzgerardo@gmail.com](mailto:zzgerardo@gmail.com); Ing José Khazam: [khazam.jose@gmail.com](mailto:khazam.jose@gmail.com).

**Gerardo Osechas**

**Khazam A. José A. y Osechas M. Gerardo E.**

**METODOLOGÍA NUMÉRICA PARA ANALIZAR Y DISEÑAR  
FUNDACIONES DE MÁQUINAS ALTERNATIVAS, ROTATIVAS Y DE  
IMPACTO.**

**Tutor Académico: Prof. Jorge Barillas.**

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.**

**Escuela de Ingeniería Mecánica. 2008, 176 pag.**

**Palabras Clave:** (Vibración en Fundaciones, Amplitudes en Fundaciones,  
Fundaciones de máquinas, Resonancia en Fundaciones)

En el siguiente trabajo se realizó un estudio exhaustivo acerca de los parámetros principales que afectan las vibraciones en una fundación. Se estudian las fundaciones para Máquinas de impacto, reciprocantes y rotativas. El estudio abarca una investigación teórica, la cual recopila el estado del arte en el área. Luego se estudian los diversos parámetros de diseño de fundaciones, estos parámetros abarcan constante de resorte, factores de embutimiento, frecuencias naturales y de resonancia, velocidades iniciales de las partes de la máquina, cálculo de cargas en la fundación. Se declaran los límites que deben tener los parámetros, para que las amplitudes generadas por las vibraciones no excedan los límites medio ambientales, y se encuentren en un rango seguro para las máquinas y los usuarios. Al recopilar toda la información teórica y experimental, la presentamos en una metodología que se ilustra con un ejemplo numérico. Para luego compilarla en un lenguaje de programación, que facilitará los cálculos a la hora de analizar una fundación.

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

$\alpha =$  Coeficiente de reducción requerida/ Coeficiente de reducción de capacidad de carga

$\alpha_\psi / \alpha_h / \alpha_z =$  Coeficientes de la relación de amortiguamiento

$\beta =$  Ángulo entre los cilindros

$\beta_\psi / \beta_x / \beta_z =$  Factores para el cálculo de constante de resorte

$\eta =$  Módulo dinámico o factor de amplificación. Coeficiente de contrapresión y fuerzas friccionales

$\sigma =$  Esfuerzo máximo del soporte o almohadilla de madera

$\nu =$  Módulo de Poisson

$\rho =$  Densidad del suelo

$\omega =$  Velocidad de angular del rotor. Frecuencia de operación de la máquina. Frecuencia excitatriz.

$\xi =$  Relación de frecuencias

$\psi =$  Ángulo de torsión de la fundación

$A =$  Amplitud de la fundación. Área de contacto horizontal de la fundación con el suelo. Área del pistón.

$A_2 =$  Área de la base del soporte

$A_f =$  Área de contacto de la fundación con el suelo

$A_{st} =$  Desplazamiento de la fundación bajo la acción de la fuerza  $P$

$A_z =$  Amplitud vertical de vibraciones forzadas

$b =$  Espesor del soporte bajo el yunque

$B_\theta / B_\psi / B_h / B_z =$  Relaciones de masa

$c =$  Constante de amortiguamiento

$c_1 =$  Coeficiente de rigidez de la base del suelo bajo la fundación

$c_\varphi =$  Coeficiente de esfuerzo cortante elástico no uniforme

$c_a =$  Coeficiente de rigidez del coeficiente bajo el yunque

$c_r =$	Coficiente de rigidez de la base
$c_u =$	Coficiente de compresión elástica uniforme del suelo
$D =$	Amortiguamiento total
$D_i =$	Relación de amortiguamiento interno
$D_\theta / D_\psi / D_h / D_z =$	Relación de amortiguamiento geométrico
$E =$	Módulo de Young`s del material del soporte
$e =$	Coficiente de restitución. Excentricidad dinámica
$e_0 =$	Excentricidad estática
$f_{n1}, f_{n2} =$	Frecuencias naturales del sistema
$f_{nd} =$	Frecuencia natural de vibraciones verticales de fundaciones en casos donde la reacción del suelo depende no solo del desplazamiento, sino también de la velocidad.
$f_{n\phi} =$	Frecuencia natural de vibraciones oscilantes de la fundación.
$f_{nz} =$	Frecuencia natural de vibraciones en el esfuerzo cortante.
$f_l^2 =$	Frecuencia límite de la fundación junto con el martillo
$f_r =$	Frecuencia de resonancia
$G =$	Módulo de Corte
$g =$	Aceleración de gravedad
$h =$	Altura de caída del mazo. Profundidad de enterramiento.
$I =$	Momento de Inercia
$J_s =$	Momento polar del área de la base de la fundación
$k =$	Coficiente correctivo
$K_\theta / K_\psi / K_x / K_z =$	Constante de Resorte para los modos de vibración
$l/l_y =$	Distancias entre cilindros
$m_0 =$	Masa del rotor
$m =$	Masa de la fundación
$m_1 =$	Masa de la fundación

$m_2 =$	Masa del yunque
$M =$	Factor de amplificación dinámica
$M_a / M_b =$	Masas del sistema recíprocante
$M_x / M_y / M_z =$	Momentos actuantes en la fundación
$M_z \sin \omega t =$	Momento excitatriz actuando en el plano horizontal
$n_a =$	Peso requerido de la fundación correspondiente a la unidad de peso de las partes que caen
$n_f =$	Peso de la fundación correspondiente a la unidad de peso de las partes que caen
$N_h / N_\psi / N_z =$	Coefficientes de enterramiento
$P(t) =$	Fuerza excitatriz vertical
$p_0 =$	Valor permisible de la presión del suelo bajo la condición de solo carga estática
$p =$	Presión total sobre el pistón
$p_{dy} =$	Presión dinámica sobre el suelo
$p_{st} =$	Presión estática sobre el suelo
$P_x =$	Carga en dirección al eje X
$P_z =$	Carga en dirección al eje Z
$r_0 =$	Radio equivalente
$T_r =$	Transmisibilidad
$v_0 =$	Velocidad inicial del movimiento delantero del centro de masa de la fundación
$v_1 =$	Velocidad con la que rebota el mazo de la fundación
$v_a =$	Velocidad inicial del movimiento del yunque
$W_s =$	Momento de inercia de la masa vibrante con respecto al eje anterior
$W =$	Peso de la fundación y la máquina
$W =$	Peso total de las partes que caen

## Abreviaturas y Símbolos

---

$W_a =$	Peso del yunque y la armadura
$W_f =$	Peso de la fundación junto con el relleno
$W_t =$	Peso del sistema Fundación + Máquina
$z =$	Desplazamiento vertical del centro de masa de la fundación y el yunque, medidos desde la posición de equilibrio
$z_1 =$	Amplitud de desplazamiento de la fundación medido desde la posición de equilibrio
$z_2 =$	Amplitud de desplazamiento del yunque medido desde la posición de equilibrio

## INDICE DE CONTENIDOS

	pp.
<b>INTRODUCCION .....</b>	1
<b>I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.2 ANTECEDENTES .....	4
1.3 OBJETIVOS Y ALCANCES .....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	5
1.3.3 ALCANCES .....	6
<b>II MARCO TEORICO .....</b>	8
2.1 GENERALIDADES SOBRE FUNDACIONES .....	8
2.2 MATERIALES EMPLEADOS EN FUNDACIONES .....	9
2.3 ANCLAJES .....	9
2.4 ARMADURA DE HIERRO .....	10
2.5 EL TERRENO .....	11
2.6 TIPOS DE FUNDACIONES .....	14
2.6.1 FUNDACIONES POR ZAPATAS CONTINUAS .....	14
2.6.2 FUNDACIONES POR ZAPATAS AISLADAS .....	14
2.6.3 FUNDACIONES POR LOSAS .....	15
2.6.4 FUNDACIONES POR POZOS O PILARES .....	15
2.6.5 FUNDACIONES POR PILOTE .....	16
2.7 FUNDACIONES DE MAQUINAS .....	17
2.8 CLASIFICACION EN MAQUINAS .....	18
2.8.1 MAQUINAS CON CARGAS DINAMICAS .....	18
2.8.2 MAQUINAS DE ACCION EQUILIBRADA .....	19
2.9 TIPOS DE CONSTRUCCIONES EN FUNDACIONES PARA MAQUINAS .....	19
2.9.1 FUNDACIONES MACIZAS (RIGIDAS) .....	19
2.9.2 FUNDACIONES PORTICADAS .....	20
2.10 CONDICIONES RECOMENDADAS PARA LAS FUNDACIONES MAS UTILIZADA .....	21
2.10.1 FUNDACIONES EN BLOQUE .....	21
2.10.1.1 SOPORTE DIRECTO .....	21
2.10.1.2 SOPORTE SOBRE PILOTES .....	22
2.10.2 FUNDACION TIPO MESA .....	22
2.11 LAS FRECUENCIAS NATURALES .....	23
2.12 AMORTIGUAMIENTO .....	24
2.13 AISLAMIENTO DE VIBRACIONES (TRANSMISIBILIDAD) .....	25
2.14 VIBRACIONES EN FUNDACIONES DE MÁQUINAS MACIZAS .....	26

2.14.1 VIBRACIONES VERTICALES DE FUNDACIONES DESPRECIANDO EL EFECTO AMORTIGUADOR DEL SUELO .....	27
2.14.2 VIBRACIONES VERTICALES DE FUNDACIONES CONSIDERANDO EL EFECTO AMORTIGUADOR DEL SUELO .....	34
2.15 VIBRACIONES POR ROTACION EN FUNDACIONES ....	39
2.16 VIBRACIONES DE ESFUERZO CORTANTE PURO .....	45
<b>III FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO .....</b>	<b>48</b>
3.1 MAQUINAS DE IMPACTO .....	48
3.1.1 CLASIFICACION DE LOS MARTILLOS DE IMPACTO .....	48
3.1.2 SUPOSICIONES PRINCIPALES ENVUELTAS EN LOS CALCULOS DE DISEÑO .....	50
3.2 ESTUDIO DE UNA FUNDACION BAJO LA ACCION DE CARGAS DE IMPACTO .....	52
3.2.1 VELOCIDAD DE LAS PARTES QUE CAEN AL INICIO DEL IMPACTO .....	52
3.2.2 DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE CORRECCION $\eta$ .....	54
3.2.3 VELOCIDADES INICIALES DEL MOVIMIENTO DE UNA FUNDACION .....	56
3.2.4 COEFICIENTE DE RESTITUCION ( $e$ ) .....	59
3.3 SELECCIÓN DEL PESO Y AREA DE LA BASE DE LA FUNDACION EN CONTACTO CON EL SUELO .....	61
3.4 VIBRACIONES NATURALES DE UN MARTILLO Y SU FUNDACION COMO RESULTADO DE UN IMPACTO CENTRADO .....	69
3.4.1 ECUACIONES DE LAS VIBRACIONES DE LA FUNDACION Y EL YUNKE .....	69
3.5 METODOLOGIA PARA EL ANALISIS Y DISEÑO DE FUNDACIONES DE MAQUINAS DE IMPACTO .....	76
3.5.1 DATOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DE UNA FUNDACION DE MARTILLOS DE IMPACTO .....	76
3.5.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE LAS PARTES QUE CAEN AL INICIO DEL IMPACTO .....	78
3.5.3 CALCULOS PRELIMINARES AL DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACION .....	78
3.5.3.1 CALCULO DEL PESO REQUERIDO DE LA FUNDACION .....	78
3.5.3.2 CALCULO DEL AREA REQUERIDA DE LA FUNDACION .....	79
3.5.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACION .....	79
3.5.5 CALCULO DE LA AMPLITUD DE VIBRACIONES DE LA FUNDACION .....	80

3.5.5.1	AMPLITUD DE VIBRACIONES DE LA FUNDACION .....	80
3.5.5.2	AMPLITUD DE VIBRACIONES DEL YUNQUE Y LA ARMADURA, Y ESFUERZO DINAMICO EN LA ALMOHADILLA .....	82
3.6	ALGORITMIA DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO .....	83
3.7	EJEMPLO NUMERICO DE DISEÑO DE UNA FUNDACION PARA MAQUINAS DE IMPACTO .....	88
<b>IV</b>	<b>FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS .....</b>	<b>94</b>
4.1	FUERZAS DINAMICAS .....	94
4.1.1	CALCULO DE CARGAS EN MAQUINAS RECIPROCANTES .....	94
4.1.2	CALCULO DE CARGAS EN MAQUINAS RECIPROCANTES DE MULTIPLES CILINDROS .....	98
4.1.2.1	MAQUINAS DE DOS CILINDROS VERTICALES .....	101
4.1.2.1.1	CILINDROS EN LA MISMA DIRECCION ... ..	102
4.1.2.1.2	CILINDROS CON ANGULO DE 90° .....	103
4.1.2.1.3	CILINDROS CON ANGULO DE 180° .....	104
4.1.2.2	MÁQUINA DE TRES CILINDROS VERTICALES .....	104
4.1.2.3	MÁQUINA CUATRO CILINDROS .....	105
4.1.2.4	MÁQUINA SEIS CILINDROS .....	106
4.1.3	CALCULO DE CARGAS EN MÁQUINAS ROTATIVAS .....	106
4.2	PARAMETROS DE DISEÑO .....	108
4.2.1	INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA .....	108
4.2.2	CONSTANTE DE RESORTE .....	109
4.2.3	AMORTIGUAMIENTO .....	113
4.3	METODOLOGIA PARA ANALIZAR FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y MAQUINAS ROTATIVAS .....	117
4.3.1	INFORMACION REQUERIDA PARA EL ANALISIS .....	118
4.3.2	CALCULO DE CARGAS EN LA FUNDACION .....	119
4.3.3	DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACION .....	120
4.3.4	PROPIEDADES DEL SUELO .....	121
4.3.5	MATERIALES DE LA FUNDACION .....	123
4.3.6	CALCULO DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO .....	123
4.3.7	ANALISIS DINAMICO DE LA FUNDACION .....	123
4.3.7.1	FRECUENCIA NATURAL .....	124
4.3.7.2	FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICA .....	124
4.3.7.3	FACTOR DE TRANSMISIBILIDAD .....	125
4.3.7.4	FRECUENCIA DE RESONANCIA .....	125
4.3.8	AMPLITUDES DE LA FUNDACION .....	126
4.3.9	ESTUDIO DE RESONANCIA .....	128
4.4	ALGORITMIA DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE	

	FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS .....	129
	4.5 EJEMPLO NUMERICO DE LA METODOLOGIA PARA ANALIZAR FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTE Y ROTATIVAS .....	134
<b>V</b>	<b>PROGRAMA PARA EL ANALISIS DINAMICO PARA FUNDACIONES DE MAQUINAS DE IMPACTO, RECIPROCANTES Y ROTATIVAS.</b>	
	<b>“FUNDEX”</b> .....	147
	5.1 PROGRAMA PARA ANALISIS DINAMICOS EN FUNDACIONES .....	147
	5.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANALISIS DINAMICO PARA FUNDACIONES .....	148
	5.3 ALGORITMO DEL ANALISIS DINAMICO PARA FUNDACIONES .....	152
	5.4 LENGUAJE DE PROGRAMACION USADO .....	153
	5.5 EJECUCION DEL PROGRAMA .....	154
	5.5.1 EJECUCION PROGRAMA MAQUINAS DE IMPACTO .....	155
	5.5.2 EJECUCION PROGRAMA FUNDACION MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS .....	162
	5.6 VALIDACION DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA .....	168
	5.6.1 ANALISIS DE FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO .....	168
	5.6.2 FUNDACIONES DE MAQUINAS PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS .....	170
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	174
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	176
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	177
	<b>ANEXOS</b> .....	184
	<b>LISTADO CODIGO DEL PROGRAMA “FUNDEX”</b> .....	212

## INDICE DE TABLAS

PP.

Tabla 2.1. Tensiones de trabajo admisibles para algunos terrenos.	12
Tabla 3.1. Resultado de eficiencias medidas en martillos	55
Tabla 3.2. Valores de algunos coeficientes de martillos	65
Tabla 3.3. Comparación de valores reales y calculados de pesos reducidos $n_f$ y áreas reducidas $a_f$ de fundaciones de losas para martillos	66
Tabla 3.4. Valores de áreas de contacto reducidas de fundaciones $a_f$ requeridas para diferentes suelos	68
Tabla 3.5. Espesores de soportes de madera bajo el yunque	83
Tabla 4.1. Valores típicos de amortiguamiento interno	116
Tabla 4.2. Distintos valores de el modulo de corte G para diferentes tipos de suelos	122
Tabla 5.1. Resultados Programa vs Ejemplo	168
Tabla 5.2. Resultados Porcentaje diferencia entre resultados	169
Tabla 5.3. Resultados Programa vs Ejemplo	171
Tabla 5.4. Diferencia en porcentaje de los resultados	172

## INDICE DE FIGURAS

	PP.
Figura 2.1. Anclaje fijo.	10
Figura 2.2. Anclaje desmontable.	10
Figura 2.3. Zapata continua.	14
Figura 2.4. Cimentación por losas.	15
Figura 2.5. Cimentación por pilotes.	17
Figura 2.6. Esquema general máquina-fundación.	18
Figura 2.7. Fundación aporticada	20
Figura 2.8. Fundación sobre pilotes de una planta eléctrica	22
Figura 2.9. Vibración de un centro de masa descansando sobre un resorte	28
Figura 2.10. Relación entre la amplitud de vibraciones verticales $A_z$ y la fuerza de excitación $P_z$	33
Figura 2.11. Efecto del amortiguamiento sobre la amplitud de vibración	35
Figura 2.12. Relación entre el módulo dinámico de vibraciones amortiguadas $\eta^*$ y el porcentaje $\xi$	38
Figura 2.13. Análisis del movimiento oscilante de una fundación	40
Figura 2.14. Variación de la amplitud horizontal de oscilamiento de vibraciones forzadas a lo largo de la altura de la fundación	45
Figura 3.1. Martillo de caída con armadura montada sobre un yunque.	48
Figura 3.2. Martillo con armadura de soporte simple	49
Figura 3.3. Martillo con armadura de doble soporte	50
Figura 3.4. Fundación con una masa impactando de manera descentrada	57
Figura 3.5. Variación del coeficiente de restitución de velocidad de impacto $e$ con el número de golpes sobre la pieza	60
Figura 3.6. Diagrama sistema de 2 grados de libertad.	72
Figura 3.7. Medidas de amplitudes de vibraciones de 47 fundaciones de martillos graficadas contra el peso de las partes impactadas	81
Figura 4.1. Partes principales de las máquinas reciprocantes	95
Figura 4.2. Máquina Reciprocante	96
Figura 4.3. Máquina Multicilindro	98
Figura 4.4. Máquina reciprocante de dos cilindros	102
Figura 4.5. Grafica de los valores $\beta$ .	111
Figura 4.6. Corte transversal de una fundación para maquinas reciprocantes y rotativas	120
Figura 4.7. Grafica de demandas medio ambientales	127
Figura 4.8. Grafica relación de frecuencia vs Factor de magnificacion	128

## Indice de Figuras

---

Figura 5.1. Formulario de entrada del programa	155
Figura 5.2. Formulario de entrada de datos, para las fundaciones de impacto	156
Figura 5.3. Formulario de ayuda del programa	157
Figura 5.4. Mensaje de error del programa	158
Figura 5.5. Formulario de salida del programa	159
Figura 5.6. Formulario de respuesta del programa	160
Figura 5.7. Formulario de amplitudes y esfuerzo del programa	161
Figura 5.8. Dimensiones fundación del enunciado	162
Figura 5.9. Formulario de entrada de datos del programa	164
Figura 5.10. Formulario de entrada de datos del programa	164
Figura 5.11. Tabla de resultados formulario del programa	165
Figura 5.12. Formulario de amplitudes del programa	166
Figura 5.13. Formulario de resultados de resonancia del programa	167

---

## INTRODUCCION

Las máquinas se diseñan para que cumplan una tarea específica, y para que cumplan esa tarea en condiciones específicas. ¿Pero que pasa cuando esa máquina entra en resonancia? ó peor aun, ¿Que entre en resonancia el apoyo sobre el cual ella se encuentra? No sería el mejor escenario ni para la máquina o los operadores y personas que la rodean.

Las leyes de trabajo y normativas de seguridad, higiene y ambiente, cada vez son más estrictas con respecto a la ergonomía y el ambiente de trabajo. Pero ese ambiente de trabajo se puede ver afectado por la propagación de vibraciones que puedan generar estas máquinas. Muchos trabajadores ignoran que las vibraciones pueden resultar perjudiciales para la salud. La exposición a las vibraciones no es solamente algo molesto. Se sabe que esta actividad, cuando es constante, causa graves problemas de salud, tales como dolor de espalda, síndrome del túnel carpiano y trastornos vasculares.

Por eso es necesario realizar un estudio de las máquinas y las fundaciones, estudiarlos como un sistema, y ser capaz de predecir estado anormales o de peligro para la máquina así como para las personas que están en su cercanía.

Durante los estudios de la carrera de Ingeniería Mecánica, el estudiante cursa la materia Dinámica de Máquinas en la cual adquiere conocimientos en el análisis de problemas dinámicos en sistemas vibratorios. Entre los temas que se estudian durante el curso de la materia está el montaje de motores y máquinas, en donde se estudia la transmisión de fuerzas dinámicas que provienen de desequilibrios internos del motor o de excitaciones externas provenientes de otros sistemas mecánicos, hacia las bases rígidas que los soportan.

Debido al tiempo de duración del semestre, la materia abarca de manera general el estudio de la transmisión de estas fuerzas y los aislamientos que soportan este tipo de máquinas o mecanismos. Es por esta razón que surge la necesidad de desarrollar un proyecto de grado, el cual pretende estudiar las fuerzas transmitidas por sistemas mecánicos con elementos alternativos, rotativos y de carácter impulsivo con la finalidad de aislar el sistema vibrante de la base que lo soporta de manera que esta no falle y no se transmitan vibraciones estructurales.

Actualmente la mayor parte de las maquinarias presentes en la industria generan vibraciones y por esto deben ser montadas sobre fundaciones que eviten la propagación de las mismas. Lo que se quiere lograr en este proyecto es hacer un estudio teórico, para poder desarrollar una metodología, que nos permita analizar el sistema máquina – fundación, y de esta manera determinar los factores más importantes que influyen en el sistema, y poder predecir estados anormales, o confirmar el buen diseño de la fundación.

El estudio de transmisibilidad de fuerzas a fundaciones para máquinas alternativas, rotativas y de impacto con el objetivo de controlar las vibraciones proporciona una oportunidad y un campo de estudio para la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, otorgando oportunidades de desarrollo para el crecimiento académico de los estudiantes de la materia Dinámica de Máquinas y dará a los autores de este proyecto herramientas que le permitirán afrontar nuevos retos.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

### *1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*

A principios de la década de los sesenta, los estudiantes de pregrado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, Cruz Bolívar y Jorge Lizarralde, hicieron un estudio en donde se realizó el diseño de fundaciones para máquinas de movimiento alternativo en el que también incluyeron luego máquinas de impacto y turbomaquinarias.

Debido a la carencia de investigación en esta área, el objetivo de este nuevo proyecto es modernizar el contenido de la misma de manera que se actualice y amplíe toda la información, aplicando conocimientos y tecnología actuales de diseño y construcción de fundaciones, además de dar un enfoque más detallado de todos los aspectos que influyen en el análisis y diseño de fundaciones.

Uno de los aspectos fundamentales de esta temática, se basa en hacer un estudio que permita conocer los parámetros necesarios para controlar el nivel de vibraciones que se pueden generar en estas máquinas, que muchas veces vienen acompañadas con generación de ruido, y como estas fuerzas son transmitidas a la fundación que los soporta, se pueda diseñar una base adecuada que absorba gran parte de las vibraciones evitando que se generen daños en el equipo sin que esta falle.

El desafío que se pretende abordar es la insuficiencia de estudios realizados en la Escuela de Ingeniería Mecánica de La Universidad Central de

Venezuela en cuanto al tema del diseño de fundaciones el cual representa una alta competencia de los profesionales de ingeniería mecánica, ingeniería industrial e ingeniería civil, donde el ingeniero mecánico es el más capacitado a nivel de análisis dinámico de mecanismos, máquinas y estructuras, sobre todo en vibraciones mecánicas u oscilaciones.

Por ello se desea establecer, o desarrollar, una metodología que permita generar un modelo físico - matemático que luego pueda ser validado, el cual se compilará en un programa de computación que facilite al ingeniero predecir que tipo de fundación es la más adecuada para soportar el tipo de máquina a soportar, en condiciones seguras de operación.

## ***1.2 ANTECEDENTES***

Cruz Bolívar; Jorge Lizarralde (1964): Estudiaron en su tesis de nombre “Diseño de fundaciones para la reducción de vibraciones en un motor de combustión interna” los parámetros mecánicos que están envueltos en un análisis de fundaciones de máquinas, con los recursos que se disponían para esa época.

Pascual Luís (1980): En su estudio “Determinación del tamaño de la base para máquinas estacionarias. (Vibraciones verticales).” Revisa para el caso de vibraciones verticales, los parámetros más importantes en el estudio de la vibración vertical.

D.D.Barkan (1959): Es el pionero en el estudio de vibraciones para fundaciones. En sus estudios analiza la fundación, tomando en cuenta todas las variables que la rodean, aquí se determina el papel que tiene el suelo como amortiguador en el sistema, y se determina los factores principales que afectan las vibraciones en una fundación.

F.E RICHART (1970): Sus estudios se concentran en fundaciones para maquinas que generan vibraciones. A partir de las teorías de BARKAN, el desarrolla nuevas formulas para el estudio de fundaciones.

C. SURESH (1979): Continúa los estudios para el analisis y diseño de fundaciones. Arrojando nuevas teorías para el estudio de las mismas.

### ***1.3 OBJETIVOS Y ALCANCES***

#### ***1.3.1 OBJETIVO GENERAL***

Realizar un estudio exhaustivo de los parámetros mecánicos que influyen en la transmisibilidad de fuerzas a fundaciones, para obtener un modelo matemático que permita analizar y diseñar las mismas según el tipo de máquina, posteriormente, estos modelos se llevarán (compilarán) en un programa de computadora.

#### ***1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS***

- Investigar y estudiar publicaciones (estado del arte) referente al tema.
- Determinar los criterios y procedimientos más apropiados para establecer un modelo matemático.
- Estudio de los parámetros principales al momento de evaluar el diseño de una fundación.

- Establecer los distintos modelos matemáticos, para luego descomponerlos en un algoritmo flexible, capaz de procesar la información.
- Desarrollar una metodología, que sirva de guía al momento de analizar una fundación sometida a vibraciones.
- Diseñar un programa de computación, usando un código de programación, que le permita al usuario evaluar la transmisibilidad de fuerzas a la fundación, considerando los parámetros más importantes que influyen en el diseño de la fundación.
- Diseñar el programa, de manera que su funcionalidad y su ergonomía sea óptima, mediante una interfaz amigable y de fácil comprensión.
- Comparar los resultados obtenidos con el programa con aquellos obtenidos de manera experimental, numérica y analítica.

### ***1.3.3 ALCANCES***

- Consultar manuales, libros, catálogos impresos o digitales, normas, etc. Relacionados con fundaciones de maquinaria.
- Partiendo de las referencias encontradas. Se estudiará de forma teórica la transmisibilidad de fuerzas para fundaciones de máquinas recíprocas, rotativas y de impacto, describiendo los factores mecánicos principales que afectan a la fundación.
- Desarrollar un marco teórico que permita al ingeniero el estudio y comprensión de la transmisibilidad de esfuerzos de las máquinas a las fundaciones.
- Predecir estados de resonancia de la máquina, o de riesgo de la fundación con respecto a los esfuerzos transmitidos.

- Construir el programa de manera modular, permitiendo al usuario elegir la complejidad de la simulación y opciones disponibles para la utilización del programa.
- Simular de manera real diversos estados de la fundación, para poder evaluar el diseño de la fundación
- Permitir tanto al estudiante como al profesional de Ingeniería Mecánica utilizar un programa, que facilite el estudio de los esfuerzos que transmiten las máquinas a sus fundaciones.
- Obtener una metodología computacional que pueda usarse en la aplicación de la ingeniería.
- Obtener resultados que se compararán con datos obtenidos de manera: numérica, experimental y analítica

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### *2.1 GENERALIDADES SOBRE FUNDACIONES*

La fundación de una máquina es un elemento constructivo que tiene por misión conducir al terreno (suelo de la cimentación) los esfuerzos debidos a la existencia de maquinaria, tanto los de carácter estático (pesos propios) como los de carácter dinámico originado por el hecho de existir masas en movimiento. Las fundaciones de máquinas deben ser capaces de transmitir estos esfuerzos de tal forma que no se produzcan asentamientos y reducir desplazamientos y vibraciones, que podrían perjudicar el funcionamiento de la máquina o el de las contiguas a ella. Podemos en líneas generales clasificarlas en superficiales y profundas.

Las fundaciones superficiales consisten fundamentalmente en superficies grandes de repartición de las cargas, por ejemplo, un cubo de concreto.

Cuando las capas superiores del terreno no tienen suficiente resistencia, las estructuras se apoyan sobre otras más profundas a las que se llega con unos elementos de fundación conocidos con el nombre de pilares o pilotes.

En general podemos decir que la elección de uno u otro sistema de fundación dependen de dos factores fundamentalmente:

- Clase de terreno sobre el que se apoya la fundación
- Características funcionales de las estructuras

## ***2.2 MATERIALES EMPLEADOS EN FUNDACIONES***

Las fundaciones de máquinas se construyen fundamentalmente con tres tipos de materiales:

- Ladrillo
- Hormigón en masa
- Concreto armado

Los dos primeros se emplean cuando existen únicamente esfuerzos estáticos que deben de ser canalizados al terreno debido a que no son capaces de soportar esfuerzos de tracción ni esfuerzos cortantes de importancia.

El material más utilizado, sin duda, es el concreto armado, que es capaz de soportar y transmitir toda clase de esfuerzos satisfactoriamente y además, tiene la densidad suficiente para poder hacer que la fundación tenga gran masa y así poder reducir las vibraciones que producen las máquinas. Se emplean otros materiales en menor cuantía, aunque no menos importantes, como son el corcho aglomerado, el caucho y otros materiales elásticos, que juegan siempre el papel de amortiguadores. También en esta línea se emplean los resortes metálicos aunque con menos profusión.

## ***2.3 ANCLAJES***

Los anclajes tienen la misión de unir la fundación a la bancada de la máquina para asegurar su fijación. Desde el punto de vista de su comportamiento se pueden clasificar en rígidos y elásticos. Los anclajes rígidos unen de forma rígida a la máquina con su fundación, constituyendo un conjunto único. Los anclajes elásticos actúan por expansión y se fijan al hormigón mediante unas garras que se anclan en una cavidad en el fondo; estos pernos no tienen ningún

deslizamiento con cargas vibratorias y no reducen su resistencia en hormigón fisurado además de tener gran rigidez y capacidad de carga.

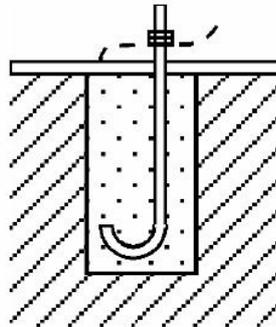


Figura 2.1. Anclaje fijo. Fuente: YÉVENES, U “Fundaciones de equipos reciprocantes”.

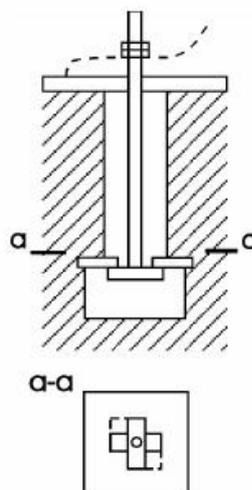


Figura 2.2. Anclaje desmontable. Fuente: YÉVENES, U. “Fundaciones de equipos reciprocantes”.

## 2.4 ARMADURA DE HIERRO

La armadura de hierro es una malla colocada bien sea en la superficie superior de la fundación o en la superficie de apoyo, se utiliza generalmente en fundaciones de máquinas sometidas a esfuerzos dinámicos, aunque también se

puede aplicar a fundaciones que soportan carga estática cuando el volumen de hormigón o los esfuerzos lo requieran.

## ***2.5 EL TERRENO***

Un terreno queda definido por su resistencia a la rotura por compresión y por su capacidad de asentamiento frente a un determinado estado de cargas. El terreno está compuesto por una serie de estratos, cada uno de los cuales tiene características físicas y químicas diferentes.

Suelos indeformables o incompresibles: a los suelos indeformables pertenecen las rocas, pizarras o conglomerados. Estos suelos no presentan problemas para determinar su resistencia ya que se realiza con una probeta tomada de suelo.

Suelos deformables o compresibles: a los suelos deformables pertenecen las gravas, arenas gruesas o finas, arcillas, limos y fangos. Los suelos deformables pueden clasificarse según el tamaño de las partículas que lo componen en estado puro. Por lo tanto, las gravas al estar constituidas por partículas de tamaño superior a 5mm de diámetro tendrán mejor capacidad portante que las arenas gruesas que tienen un tamaño de grano de 0,4mm a 2mm, donde su comportamiento vendrá determinado por su granulometría. Para tamaños menores el comportamiento depende del grado de saturación y de la granulometría que define su estabilidad. Es el caso de las arenas finas que tienen un tamaño de partículas de 0.075mm a 0.2 mm. Para tamaños de partículas inferiores a 0.075mm como es el caso de limos, arcillas y fangos disminuye mucho su resistencia, por lo tanto, son los más deformables.

Entre estas partículas o granos existen huecos de aire o agua, que dependerán de los tamaños de los granos. Evidentemente una carga reducirá el

volumen de estos huecos, por consiguiente, el volumen total del suelo. Por lo tanto, un suelo formado por granos de diferente tamaño es más compacto que otro con granos iguales.

El agua intersticial es responsable de la cohesión del suelo, por la existencia de las fuerzas de cohesión desarrolladas por las tensiones capilares y por la presencia de la película de agua absorbida alrededor de los granos. Estas fuerzas disminuyen en razón inversa al grosor de los granos, hasta llegar a ser nulas, donde nos encontramos entonces con un suelo polvoriento, en el cual el equilibrio interno es obtenido por el rozamiento interno de sus partículas. En caso contrario, se dice que el suelo es coherente. La aplicación de la carga tiene por efecto expulsar lentamente el agua intersticial por disminución del volumen de los huecos. La característica de hinchamiento de un suelo por variaciones de humedad constituye quizás la propiedad más importante de los suelos arcillosos. Según la proporción de granos minerales y de materiales coloidales que las constituyen, las arcillas en lugar de tener un débil contenido en agua, son susceptibles incluso de absorber una gran cantidad de agua, generando el hinchamiento del suelo. En la tabla (2.1) se recogen los valores de las tensiones de trabajo admisibles para algunos terrenos de cimentación.

Naturaleza del Suelo	R (Kg/cm)
<u>Arenas:</u>	
Arena gruesa	0,5
Arena húmeda	2
Arena fina, resistente y seca	2,5 a 3

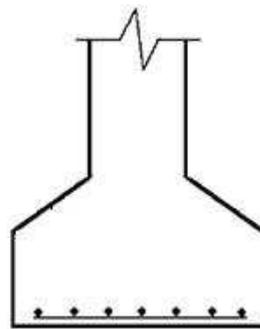
Arena gruesa, en terreno de buen drenaje	3
Arena gruesa muy resistente	3 a 6
Gravas y arena gruesa en capas de gran espesor	5 a 8
<b><u>Arcillas</u></b>	
Arcilla mojada o húmeda en capas de 5 m de espesor, como mínimo	1 a 2
Arcilla mojada con arena y limos	1
Arcilla mojada y arena húmeda	1 a 1,5
Arcilla mojada con gran consistencia	2
Arcilla resistente	2
Arcilla moderadamente seca en capas de gran espesor	2 a 4
Arcilla sólida y seca	2,5 a 3
Arcilla dura	3 a 4
Arcilla dura y seca	4
Arcilla en capas de gran espesor, siempre seca	4 a 6
<b><u>Terrenos intermedios y terrenos rocosos:</u></b>	
Terrenos de relleno, no compactado artificialmente, según la calidad de la fundación, así como la compacidad y la uniformidad del terreno...	1
<b>Terreno natural, no removido:</b>	
- Lodos, turbas y ciénagas	0
- Terrenos polvorientos	1,5 a 8
<b>Terreno consistente (Limos, Arcillas, Calcarios):</b>	
- Plástico (puede moldearse con la mano)	0
- Blando (petrificable)	0,4
- Consistente	1
- Semirresistente	2
- Duro (seco, se rompe en trozos)	4
<b>Rocas poco agrietadas en estado sano, no descompuestas y en posición favorable (estratos horizontales)</b>	
- En estratos cerrados	15
- En masas compactas	30

**Tabla 2.1. Tensiones de trabajo admisibles para algunos terrenos. Fuente: Valores de arenas y arcillas tomados de “Mecánica de suelos Aplicada”, por Tersaghi y Peck. Datos para otros terrenos tomados de “Practica de la construcción de edificios”, por Mittag.**

## **2.6 TIPOS DE FUNDACIONES**

### **2.6.1 FUNDACIONES POR ZAPATAS CONTINUAS**

Se utilizan fundamentalmente para el apoyo de muros de cerramiento. La distribución de reacciones del terreno para el caso de carga uniforme que pasa por un eje sobre el centro de gravedad de la cimentación suele ser uniforme. La distribución de reacciones depende de la rigidez transversal de la zapata y de las características del terreno. Su dimensionado se hace fijando el ancho de la zapata de acuerdo con la tensión admisible que estemos considerando para el terreno donde se apoyan. Son fundaciones de gran longitud en comparación con su sección transversal.



**Figura 2.3. Zapata continúa. Fuente : DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK “Soil Dynamics and Special Design Aspects”.**

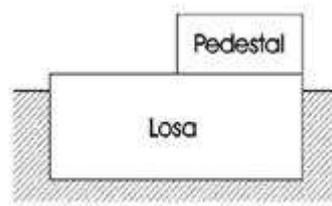
### **2.6.2 FUNDACIONES POR ZAPATAS AISLADAS**

Se utilizan para soportar elementos estructurales que suministre la suficiente rigidez para evitar en lo posible los asentamientos diferenciales. Es la encargada de transmitir a través de su superficie las cargas al terreno.

### 2.6.3 FUNDACIONES POR LOSAS

Se utiliza esta solución cuando la superficie cubierta en planta por las zapatas resulta muy alta comparada con la superficie en planta cubierta por las losas. Se suele estimar que las losas son convenientes cuando la superficie cubierta por las zapatas resulta superior a un 25% o 30% de la superficie total del elemento estructural. Además se suele emplear en terrenos de muy baja resistencia (inferior a  $1 \text{ Kg/cm}^2$ ) y en los que se presume la existencia de asentamientos diferenciales importantes. El espesor de las losas debe ser como mínimo de 25cm. Al ser de gran rigidez el conjunto (losas y vigas), el objetivo es conseguir uniformizar lo mejor posible la tensión del terreno.

Una losa de cimentación es, por lo tanto, un elemento estructural de hormigón armado cuyas dimensiones en planta son muy elevadas; define un plano normal a la dirección de soportes.



**Figura 2.4. Cimentación por losas. Fuente: DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK. “Soil Dynamics and Special Desing Aspects”**

### 2.6.4 FUNDACIONES POR POZOS O PILARES

Se emplea la fundación por pozos, pilares cuando en el terreno existe una capa sobre la que se puede cimentar por tener alta resistencia a compresión y poca deformabilidad a profundidades comprendidas entre cuatro y siete metros por debajo del nivel del terreno natural. Consiste en hacer una excavación profunda de

0,9m a 1,2m la cual se rellena con hormigón en masa o pobremente armado. Sobre esta masa de hormigón circular se apoya la estructura. Se calcula como una zapata de gran altura (despreciando los esfuerzos cortantes) y se considera que la reacción del terreno es uniforme.

No es una solución buena, cuando las cargas que transmite la fundación y los momentos presentan un valor importante frente a los esfuerzos normales. Su utilización queda pues prácticamente reducida al caso de vigas verticales procedentes de estructuras isostáticas.

### ***2.6.5 FUNDACIONES POR PILOTE***

Se realizan cimentaciones mediante pilotes cuando el terreno resistente se encuentra a profundidades superiores a 6m o cuando son de prever variaciones importantes de las características fundamentales del terreno, bien por elevaciones o depresiones de la capa freática o bien porque se produzcan filtraciones de agua procedente de la superficie. También se emplea en terrenos poco consistentes en los cuales no se encuentra ninguna capa resistente.

Por su modo de fabricarse se clasifican en:

- Pilotes prefabricados en taller o en obra (pilotes de hinca)
- Pilotes colocados “in situ” (pilotes de extracción de tierra previa por sondeo)

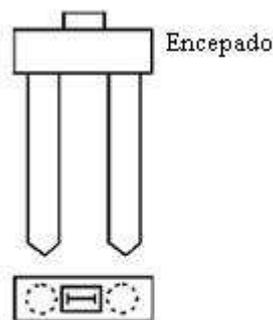
Por su forma de trabajo se clasifican en:

- Pilotes que trabajan fundamentalmente de punta

### -Pilotes que trabajan por fracción lateral

En cualquiera de los tipos mencionados, los pilotes son elementos contruidos en hormigón armado con sección cilíndrica o hexagonal, de diámetro comprendido entre 40cm y 70cm. En la parte superior del pilote o grupo de pilotes se dispone un elemento también de hormigón armado que tiene por misión transmitir las cargas de la estructura a los pilotes. Este elemento se llama encepado. Se debe considerar que la unión del pilote o pilotes al encepado es rígida, es decir, que constituye un verdadero empotramiento.

Puede suceder que el esfuerzo de la máquina pase por el centro de gravedad del macizo de la cimentación, o bien que presenten excentricidades. En el primer caso la carga total transmitida al terreno será la suma del peso del macizo y de la máquina. La tensión producida en el terreno, que tendrá que ser menor que la admisible, resultará de dividir cargas entre la sección de apoyo de la cimentación.

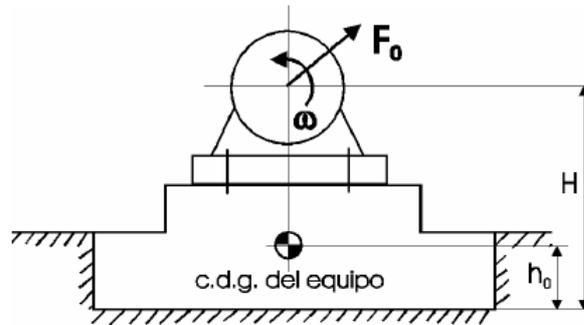


**Figura 2.5. Cimentación por pilotes. Fuente: DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK. "Soil Dynamics and Special Desing Aspects".**

## **2.7 FUNDACIONES DE MAQUINAS**

Los elementos principales que deben considerarse como básicos de las máquinas son: intensidad, tipo y frecuencia de las acciones dinámicas de la

máquina sobre la fundación lo que condiciona el tipo de cimentación que deberá soportarla.



**Figura 2.6. Esquema general máquina-fundación. Fuente: SURESH C. Arya. “Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines”.**

$F_0$  = Fuerza generada por la maquinaria

$\omega$  = Velocidad de operación de la maquina

$H$  = Distancia de eje e giro de la maquina al área de contacto con el suelo

$h_0$  = Espesor de la zapata.

## 2.8 CLASIFICACION EN MAQUINAS

Las máquinas se pueden clasificar en dos grandes grupos respecto a la fuerza de inercia que actúa sobre ellas:

### 2.8.1 MAQUINAS CON CARGAS DINAMICAS

En estas máquinas la fuerza de inercia que actúa sobre ellas es comparable con el peso de la máquina. El diseño de la fundación debe responder a especificaciones técnicas y cálculos especiales.

### ***2.8.2 MAQUINAS DE ACCION EQUILIBRADA***

Difieren del tipo anterior en que las fuerzas de inercia no son comparables con el peso de la máquina, por lo que su diseño se realizará de acuerdo con las normas usadas para la construcción de las bases de edificios e instalaciones similares.

## ***2.9 TIPOS DE CONSTRUCCIONES EN FUNDACIONES PARA MAQUINAS***

Según su construcción las fundaciones para máquinas con cargas dinámicas se dividen en dos grupos: fundaciones macizas (rígidas) y fundaciones porticadas (con la construcción superior no rígida).

### ***2.9.1 FUNDACIONES MACIZAS (RIGIDAS)***

Se utilizan para máquinas con mecanismo biela-manivela y para los martinets. También en trituradoras, electro máquinas (de potencias medias y pequeñas en general), compresores, bombas, etc. La gran rigidez que poseen permite despreñar las deformaciones de los macizos y considerarles por tanto como cuerpos rígidos. Se construyen en forma de bloques con cavidades adecuadas, tanto para los bulones de anclaje como para las tareas de operación y mantenimiento en explotación.

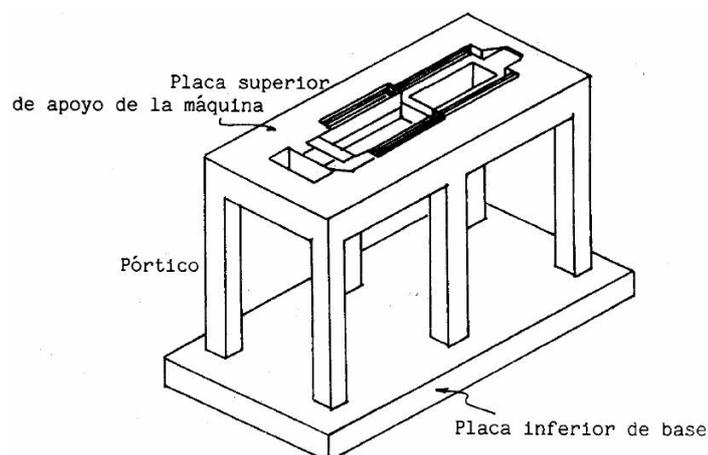
Según las características de la instalación se clasifica en:

- Fundaciones sin sótano, que son las más comunes, caracterizándose por que sobresalen poco sobre el nivel del terreno; se utilizan para máquinas que se instalan en plante baja.

- Fundaciones con sótano, que sobresalen poco sobre el nivel del terreno, la cual tiene una altura en general, igual a la altura del terreno. Se distingue entre los que tienen la parte superior maciza y los que tienen la parte superior construida por paredes longitudinales y transversales.

### 2.9.2 FUNDACIONES PORTICADAS

Se utilizan para máquinas de alta velocidad y tienen la particularidad de tener la parte superior no rígida.



**Figura 2.7. Fundación aporcionada. Fuente: FRATELLI, María . Suelos, Fundaciones y Muros**

## **2.10 CONDICIONES RECOMENDADAS PARA LAS FUNDACIONES MAS UTILIZADA**

Esta recopilación de condiciones fueron extraídas de diversos autores como Suresh y Richard y de normas como las normas para la construcción de fundaciones de empresas como PDVSA , PEMEX.

### **2.10.1 FUNDACIONES EN BLOQUE**

#### **2.10.1.1 SOPORTE DIRECTO**

- La masa del bloque está condicionada por el principio de funcionamiento de la máquina:

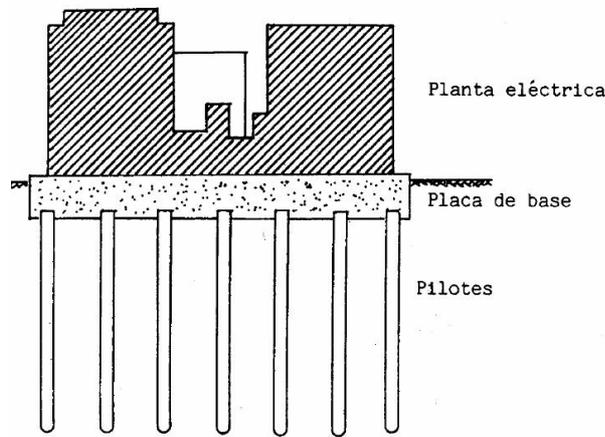
$$\frac{\text{Masa de la Cimentación}}{\text{Masa de la Máquina}} = \begin{cases} \text{de 2 a 3 para Máquinas Rotativas} \\ \text{de 3 a 5 para Máquinas Alternativas} \end{cases}$$

- El grado de enterramiento que es el porcentaje en masa enterrada del bloque, en máquinas alternativas se recomienda una masa del bloque enterrada del 50-80%, aunque por regla general y para cualquier tipo de máquina se dejan 30 a 40cm desde el nivel de la superficie del terreno a la cara superior.

- Las dimensiones del bloque por la necesidad de asegurar una buena rigidez, requieren que el espesor sea mayor a 70cm y el ancho debe ser 1 a 1,5 veces mayor que la distancia entre el centro de gravedad de la máquina y la base del bloque.

- El centro de gravedad de las cargas (estáticas más las dinámicas) debe estar dentro de un cuadrado de lado un 5% de cualquier dimensión lineal y centrado en el bloque.

### 2.10.1.2 SOPORTE SOBRE PILOTES



**Figura 2.8. Fundación sobre pilotes de una planta eléctrica con máquinas que producen vibraciones horizontales de gran amplitud. Fuente: FRATELLI, María “Suelos, Fundaciones y Muros”**

- La masa esta condicionada por el principio:

$$\frac{\text{Masa de la Cimentación}}{\text{Masa de la Máquina}} = \begin{cases} \text{de 1,5 a 2,5 para Máquinas rotativas} \\ \text{de 2,5 a 4 para Máquinas para Alternativas} \end{cases}$$

- Los pilotes deben ser inclinados en caso de fuerzas horizontales. El tamaño de los pilotes debe ser de 1 a 2 veces la fundación. El ángulo de inclinación de los pilotes se determina por la magnitud de las fuerzas horizontales.

- El Centroides de los pilotes debe estar alineado con el centro de gravedad del conjunto máquina-bloque.

### 2.10.2 FUNDACION TIPO MESA

- La masa debe estar condicionada por:

$$\frac{\text{Masa de la Cimentación}}{\text{Masa de la Máquina}} = \begin{cases} > 3 \text{ para Máquinas rotativas} \\ > 5 \text{ para Máquinas Alternativas} \end{cases}$$

- Las columnas deben tener igual carga vertical (6 veces la capacidad de carga), con igual deformación.
- El centro resistente de dichas columnas debe coincidir con el centro de gravedad del conjunto máquina mas la parte superior de la cimentación.
- Las vigas deben tener un canto mayor de 1 a 5 veces la luz, con una rigidez mayor a dos veces la rigidez de los pilares.
- La losa debe tener un espesor mayor o igual a  $0,07L^{4/3}$ , siendo L la distancia media entre dos columnas.
- La presión sobre el terreno debe ser menor de 1 a 2 veces la presión permisible el suelo.

### ***2.11 LAS FRECUENCIAS NATURALES***

Sabemos que cuando la frecuencia de excitación coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, tiene lugar el fenómeno de resonancia. La característica más importante de la resonancia es que da lugar a grandes desplazamientos, al amplificar de manera importante las vibraciones del sistema. En la mayor parte de los sistemas mecánicos, la presencia de grandes desplazamientos es un fenómeno indeseable ya que provoca la aparición de tensiones y deformaciones grandes que puede ocasionar el fallo del sistema.

En consecuencia, las condiciones de resonancia deben ser evitadas en el diseño y construcción de cualquier sistema. No obstante, en la mayor parte de los

casos, las frecuencias de excitación no pueden controlarse al venir impuestas por los requerimientos de carácter funcional del sistema (por ejemplo, velocidades de giro). En tal caso, el objetivo será el control de las frecuencias naturales del sistema para evitar la presencia de resonancias.

Sabemos por definición que para un sistema de un grado de libertad (1 gdl), la frecuencia natural del sistema  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  puede cambiarse variando tanto la masa ( $m$ ) como la rigidez ( $k$ ) del mismo. Aunque la definición se haya establecido para un sistema de 1 gdl, la conclusión obtenida es, en general, aplicable a sistemas de N grados de libertad. En muchas situaciones en la práctica, sin embargo, la masa no resulta fácil de cambiar, ya que su valor suele venir determinado por los requerimientos funcionales del sistema. Por ello, la rigidez del sistema es el parámetro que se modifica de forma más habitual a la hora de alterar las frecuencias naturales de un sistema.

## **2.12 AMORTIGUAMIENTO**

El amortiguamiento es a menudo despreciado para simplificar el análisis de un sistema, especialmente en la búsqueda de sus frecuencias naturales. Sin embargo, todos los sistemas mecánicos reales poseen amortiguamiento en mayor o menor medida. Su presencia resulta de gran ayuda en la mayoría de los casos.

Si el sistema se encuentra en condición de vibración forzada, su respuesta (la amplitud de la vibración resultante) tiende a amplificarse en las cercanías de la resonancia, tanto más cuanto menor sea el amortiguamiento. La presencia de amortiguamiento siempre limita la amplitud de la vibración. Si la fuerza o fuerzas de excitación son de frecuencias conocidas, será posible evitar las resonancias cambiando la frecuencia natural del sistema y alejándola de aquella o aquellas. Sin embargo, en el caso de que el sistema tenga que operar en un determinado rango

de velocidades (como es el caso de un motor de combustión interna), puede que no resulte posible evitar la resonancia en todo el rango de condiciones de operación. En tales casos, podremos tratar de aportar amortiguamiento al sistema con el objetivo de controlar su respuesta dinámica, mediante la introducción de fluidos (agua, aceites) que envuelvan al sistema aportando amortiguamiento externo, o el uso de materiales estructurales con un alto amortiguamiento interno: hierro fundido, laminado. Otra posibilidad es hacer uso de materiales viscoelásticos que proporcionan valores muy altos de amortiguamiento interno. Cuando se emplean este tipo de materiales en el control de vibraciones, los mismos están sometidos a la acción de tensiones de corte o tensiones principales. Existen diferentes tipos de disposiciones. La más sencilla es colocar una capa de material viscoelástico sujeta a otra de material elástico. Otra, más habitual y que da muy buenos resultados, es la formada por una capa de viscoelástico entre dos de material elástico. Una desventaja importante asociada al uso de los materiales viscoelásticos es que sus propiedades mecánicas se ven muy afectadas por la temperatura, la frecuencia de las cargas aplicadas sobre ellos y la tensión a la que están sometidos.

### ***2.13 AISLAMIENTO DE VIBRACIONES (TRANSMISIBILIDAD)***

Se conoce como aislamiento de vibraciones a todo aquél procedimiento que permite reducir los efectos indeseables asociados a toda vibración. Básicamente, ello suele suponer la introducción de un elemento elástico (aislante) entre la masa vibrante y la fuente de vibración, de forma que se consigue reducir la magnitud de la respuesta dinámica del sistema, bajo unas determinadas condiciones de la excitación en vibración.

La efectividad de un aislante de vibraciones se establece en términos de su transmisibilidad. La Transmisibilidad ( $T_r$ ) puede definirse como el cociente entre

la amplitud de la fuerza transmitida a la base y la de la fuerza de excitación de la máquina.

$$T_r = \frac{F_{T_{MAXIMA}}}{F_{IMPRESA_{MAXIMA}}} \quad (2.1)$$

### ***2.14 VIBRACIONES EN FUNDACIONES DE MÁQUINAS MACIZAS.***

En general, las investigaciones de vibraciones de una fundación maciza colocadas sobre la superficie del suelo pueden reducirse a las investigaciones de vibraciones de un bloque sólido descansando sobre un medio elástico semi-infinito. Hasta la fecha ninguna solución de este problema ha sido encontrada. Por lo tanto, son necesarias varias simplificaciones concernientes a las vibraciones de bloques sólidos colocados sobre el suelo son necesarias.

La primera de todas las suposiciones es una relación lineal entre las reacciones del suelo sobre una fundación vibrando y el desplazamiento de esta fundación. Entonces la relación entre los desplazamientos y las reacciones pueden ser determinadas en términos de los coeficientes de elasticidad uniforme y compresión no uniforme, así como un coeficiente de corte elástico. Estos coeficientes dependen de las propiedades elásticas del suelo y del tamaño de la fundación.

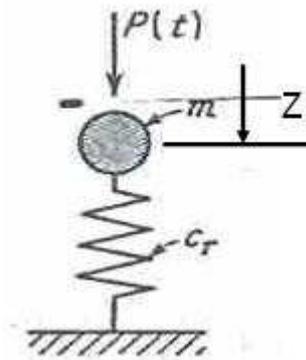
Además, es necesario suponer que estos suelos bajo la fundación no poseen propiedades inerciales, sino solo propiedades elásticas como las descritas por los coeficientes. Así, se considera que la fundación solo posee propiedades inerciales y carece de propiedades elásticas, mientras el suelo es considerado que solo tiene propiedades elásticas y carece de propiedades de inercia. Estas suposiciones concernientes a la fundación y el suelo pueden ser posibles, en casos generales, para analizar las vibraciones de la fundación como un problema de un cuerpo sólido descansando sobre resortes livianos.

Frecuentemente las fundaciones bajo maquinarias son incrustadas dentro del suelo a cierta profundidad. En estos casos, las reacciones elásticas actúan no solo a lo largo de la superficie de contacto horizontal entre el suelo y la fundación, sino también a lo largo de los lados de la superficie de la fundación.

En algunos casos es difícil evaluar, los efectos de las reacciones laterales sobre la vibración de la fundación. Estos efectos se pueden tener tentativamente en cuenta en el cálculo para el diseño incrementando los valores de los coeficientes de elasticidad de la base. Por ejemplo, estos métodos son aplicados en los cálculos de las fundaciones para martillos de forja. Si una fundación experimenta solo vibraciones forzadas (como, por ejemplo, fundaciones bajo máquinas reciprocantes), y los valores de diseño de las frecuencias naturales de esta fundación son mayores que la frecuencia operacional de rotación de la máquina, entonces los efectos de las reacciones laterales son relativamente pequeños y pueden ser despreciados.

### ***2.14.1 VIBRACIONES VERTICALES DE FUNDACIONES DESPRECIANDO EL EFECTO AMORTIGUADOR DEL SUELO***

Consideremos las vibraciones de la fundación debido a una fuerza excitatriz vertical  $P(t)$  con cambios en el tiempo. Asumamos que el centro de gravedad de la fundación y la máquina y el centroide del área de la fundación en contacto con el suelo esta sobre una línea vertical coincidiendo con la dirección de acción de la fuerza excitatriz  $P(t)$ . En estos casos, la fundación puede experimentar solo vibraciones verticales. Por lo tanto, la fundación puede ser considerada como un cuerpo rígido, y su desplazamiento es determinado por el desplazamiento del centro de gravedad. Como se mencionó anteriormente, resortes livianos sirven como modelo para estos suelos. Así, el problema de las vibraciones verticales de una fundación es reducido al estudio de vibraciones de un centro de masa descansando sobre un resorte (Figura 2.9).



**Figura 2.9. Vibración de un centro de masa descansando sobre un resorte. Fuente: BOWLES, J.E. “Foundation Analysis and Design”.**

Denotando como  $z$  el desplazamiento vertical de la fundación calculado con respecto a la posición de equilibrio. Consideremos  $z$  como positivo apuntando hacia abajo. Si el desplazamiento del centro de gravedad de la fundación es igual a  $z$ , entonces la reacción del resorte (por ejemplo, la base de la fundación) es igual a:

$$R = W + c_r z \quad (2.2)$$

Donde:

$W$  = Peso de la fundación y la máquina [Tons]

$c_r$  = Coeficiente de rigidez de la base [Tons/m]

$$c_r = c_u A \quad (2.3)$$

$c_u$  = Coeficiente de compresión elástica uniforme del suelo [Tons/m<sup>3</sup>]

$A$  = Área de contacto horizontal de la fundación con el suelo [m<sup>2</sup>]

Entonces la ecuación de movimiento para la fundación será:

$$m \ddot{z} + c_r z = P(t) \quad (2.4)$$

$m$  = Masa de la fundación y la máquina:  $m = W/g$  [Tons]

$g$  = Aceleración de gravedad  $[m/s^2]$

Dividiendo ambas partes de la ecuación (2.4) por la masa  $m$ , se puede reescribir la siguiente ecuación de la siguiente manera:

$$\ddot{z} + f_{nz}^2 z = p(t) \quad (2.5)$$

Donde:

$$f_{nz}^2 = \frac{c_r}{m} = \frac{c_u A}{m} \quad (2.6)$$

En la carrera de ingeniería utilizamos la siguiente terminología:

$$\omega_n^2 = \frac{K}{m}$$

$$p(t) = \frac{P(t)}{m}$$

La ecuación (2.5) describe las vibraciones verticales de una fundación bajo la acción de una fuerza excitatriz.

Considerando el caso en donde no exista una fuerza actuando sobre la fundación, excepto el movimiento resultante de un impacto o de un

desplazamiento inicial de la fundación. Haciendo  $p(t) = 0$  en la ecuación (2.5), se obtiene:

$$\ddot{z} + f_{nz}^2 z = 0 \quad (2.7)$$

Esta ecuación diferencial corresponde al caso en que el movimiento ocurre solo bajo la acción de las fuerzas inerciales de la fundación y las reacciones elásticas de la base. Tales vibraciones son designadas vibraciones naturales o libres. Por ejemplo, fundaciones bajo martillos de forja pueden estar sujetas a vibraciones semejantes.

La solución general de la ecuación diferencial homogénea (2.7) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$z = A \sin f_{nz} t + B \cos f_{nz} t \quad (2.8)$$

Los coeficientes A y B en la ecuación (2.8) representan las amplitudes de las vibraciones naturales de la fundación. Estos valores solo dependen de la condición inicial del movimiento, por ejemplo, sobre las magnitudes de la velocidad (o los desplazamientos) de la fundación en ciertos momentos de tiempo tomados como el momento inicial. Las vibraciones naturales de fundaciones bajo maquinarias son usualmente causadas por impactos, por ejemplo, las fundaciones que experimentan ciertas velocidades iniciales. Por consiguiente consideremos sólo este caso particular.

Asumiendo que  $t = 0$ , quedan los valores:

$$z = 0 \quad \text{y} \quad \dot{z} = v_0 \quad (2.9)$$

Derivando ambas partes de la solución (2.8) con respecto al tiempo, se obtiene la siguiente expresión para la velocidad de la fundación:

$$\dot{z} = Af_{nz} \cos f_{nz} t - Bf_{nz} \sin f_{nz} t \quad (2.10)$$

Haciendo  $t = 0$  en la ecuación (2.8) y (2.10), se obtiene la siguiente expresión para las constantes A y B:

$$A = \frac{v_0}{f_{nz}}, \quad B = 0$$

Por lo tanto, cuando las vibraciones naturales verticales son causadas por un impacto, el desplazamiento es determinado por la ecuación:

$$z = \frac{v_0}{f_{nz}} \sin f_{nz} t \quad (2.11)$$

Retornando a la ecuación (2.5) para vibraciones verticales forzadas de fundaciones, se puede considerar el caso en que la fuerza excitatriz  $P(t)$  es una función armónica que depende del tiempo, por ejemplo,  $P(t) = p \sin(\omega t)$  ( $\omega$  es la frecuencia excitatriz y  $p = \frac{P}{m}$  donde  $P$  es la magnitud de la fuerza excitatriz).

Una fuerza excitatriz que cambia con el tiempo de acuerdo a las expresiones  $\sin(\omega t)$  o  $\cos(\omega t)$  es de especial interés en el estudio de vibraciones forzadas de fundaciones, ya que en las labores de diseño, las cargas excitatrices impuestas por máquinas son usualmente funciones armónicas del tiempo. Sustituyendo la parte derecha de la igualdad de la ecuación (2.5) por la expresión:

$$p(t) = p \sin(\omega t)$$

Se obtiene la ecuación de vibraciones verticales armónicas forzadas de fundaciones:

$$\ddot{z} + f_{nz}^2 z = p \sin(\omega t) \quad (2.12)$$

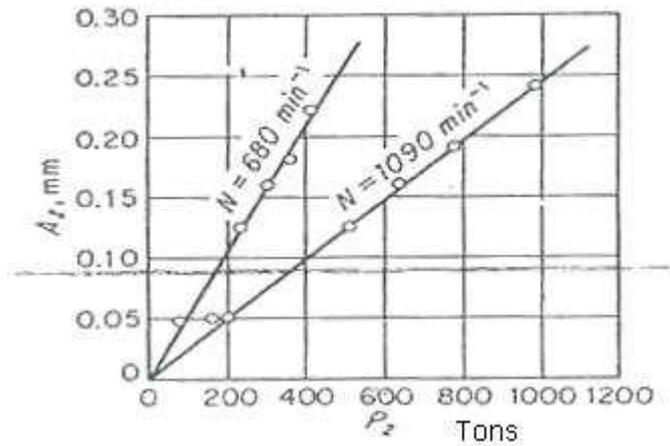
La solución general de esta ecuación diferencial presenta la suma de dos soluciones, correspondiente a las vibraciones libres y forzadas causadas por una fuerza excitatriz dada. Debido a la acción de las reacciones de amortiguamiento del suelo, las vibraciones libres son amortiguadas por un corto período de tiempo después del inicio del movimiento forzado de la fundación, y quedan solo vibraciones forzadas. La solución de la ecuación (2.12), correspondiente solo a este estado estable de movimientos de vibraciones es la siguiente:

$$z = A \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

Obtenemos la expresión para la amplitud  $A_z$  de vibraciones forzadas sustituyendo la fórmula para  $z$  (2.13) en la ecuación diferencial (2.12); entonces tenemos:

$$A_z = \frac{P}{m(f_{nz}^2 - \omega^2)} \quad (2.14)$$

En general, esta solución es válida para todos los sistemas mecánicos lineales incapaces de producir una vibración auto-excitada.



**Figura 2.10. Relación entre la amplitud de vibraciones verticales  $A_z$  y la fuerza de excitación  $P_z$ . Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

La Figura 2.10 presenta el gráfico del efecto de la magnitud de la fuerza de excitación sobre la amplitud de las vibraciones verticales forzadas de una fundación experimental. Estos gráficos sustentan el carácter lineal de las relaciones establecidas por la ecuación (2.14). En el gráfico cada recta representa distintas velocidades de operación de la maquina.

Para entender mejor la influencia de la masa y la frecuencia natural de la fundación, transformaremos la expresión (2.14) en:

$$A_z = \frac{P}{mf_{nz}^2} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{f_{nz}^2}} \tag{2.15}$$

Y  $\xi = \frac{\omega}{f_{nz}}$  es la relación de frecuencia.

En la carrera de ingeniería utilizamos la siguiente metodología:

$$r = \frac{\omega}{\omega_{nz}} \qquad A_z = \frac{P}{m \cdot \omega_{nz}^2} \cdot \frac{1}{1 - r^2}$$

Por lo tanto:

$$\frac{P}{mf_{nz}^2} = A_{st}$$

$A_{st}$  es el desplazamiento de la fundación bajo la acción de la fuerza  $P$ , la expresión (2.15) puede ser escrita como:

$$A_z = \eta A_{st} \quad (2.16)$$

Donde  $\eta$  es un módulo dinámico (o factor de amplificación).

$$\eta = \frac{1}{1 - \xi^2} \quad (2.17)$$

Fundaciones bajo máquinas reciprocantes son usualmente diseñadas de tal manera que la frecuencia natural de una fundación es superior que la frecuencia de funcionamiento de la máquina.

### **2.14.2 VIBRACIONES VERTICALES DE FUNDACIONES CONSIDERANDO EL EFECTO AMORTIGUADOR DEL SUELO**

La ecuación de vibraciones libres amortiguadas de fundaciones puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\ddot{z} + 2c\dot{z} + f_{nz}^2 z = 0 \quad (2.18)$$

Esta ecuación difiere de la ecuación (2.17) por la presencia del término  $2c\dot{z}$ . Si usamos la notación:

$$c = \frac{\alpha}{2m} \quad (2.18a)$$

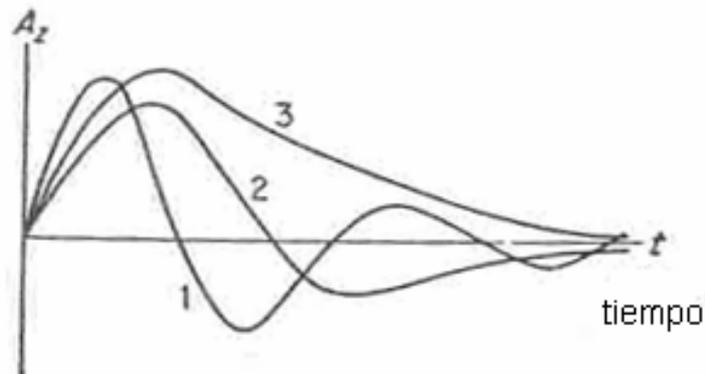
Donde  $c$  es llamada constante de amortiguamiento; este doble valor es igual al coeficiente de resistencia  $\alpha$  (resistencia del suelo) por unidad de masa de fundación. Usualmente  $c < f_{nz}$ . La solución de la ecuación (2.18) correspondiente a este caso es la siguiente:

$$z = e^{(-ct)} (A \sin f_{nd} t + B \cos f_{nd} t) \quad (2.19)$$

Donde  $f_{nd}$  (en los estudios de ingeniería durante la carrera,  $f_{nd} = \omega_{nd}$ ) es la frecuencia natural amortiguada de vibraciones verticales de fundaciones en casos donde la reacción del suelo depende no solo del desplazamiento, sino también de la velocidad. Sustituyendo la solución (2.19) en el lado izquierdo de la ecuación diferencial (2.18), encontramos que la solución que satisface esta ecuación para cualquier valor de A y B es:

$$f_{nd}^2 = f_{nz}^2 - c^2$$

Siguiendo directamente la ecuación (2.19) estas amplitudes de vibraciones decrecen exponencialmente con el tiempo. Esto se puede ver en la curva 1 de la figura 2.7.



**Figura 2.11.** Efecto del amortiguamiento sobre la amplitud de vibración  $A_z$ ; curva 1, coeficiente de amortiguamiento  $c$  es pequeño; curva 2,  $c$  aproximadamente igual a la frecuencia natural  $f_{nz}$ ; curva 3,  $c$  es mayor que  $f_{nz}$ . Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.

Si  $c \cong f_{nz}$  entonces el carácter de las vibraciones libres de la fundación corresponde a la curva 2. Para grandes valores de la constante de amortiguamiento, donde  $c > f_{nz}$ , las vibraciones libres no son posibles, y, bajo la acción de un impacto o un desplazamiento inicial, la fundación puede desarrollar un movimiento no periódico, como se muestra en la curva 3 de la figura 2.11.

Para obtener una ecuación que modele las vibraciones forzadas de fundaciones, incluyendo el efecto de amortiguamiento de las reacciones del suelo, se introduce en la parte derecha de la igualdad de la ecuación (2.18) el valor de la fuerza excitatriz; y después, se asume la igualdad  $p \sin(\omega t) = \left(\frac{P}{m}\right) \sin(\omega t)$ ; entonces se tiene:

$$\ddot{z} + 2c \dot{z} + f_{nz}^2 z = p \sin(\omega t) \quad (2.20)$$

La solución de esta ecuación, correspondiente a vibraciones forzadas de fundaciones, será:

$$z = A_z^* \sin(\omega t - \gamma) \quad (2.21)$$

Donde  $A_z^*$  es la amplitud de las vibraciones forzadas medida en metros:

$$A_z^* = \frac{P}{m\sqrt{(f_{nz}^2 - \omega^2)^2 + 4c^2\omega^2}} \quad (2.22)$$

El defasaje de la fuerza excitatriz y el desplazamiento inducido por esta fuerza es igual:

$$\tan \gamma = \frac{2c\omega}{f_{nz}^2 - \omega^2} \quad (2.23)$$

Análogamente la ecuación (2.22) puede ser reducida a la forma:

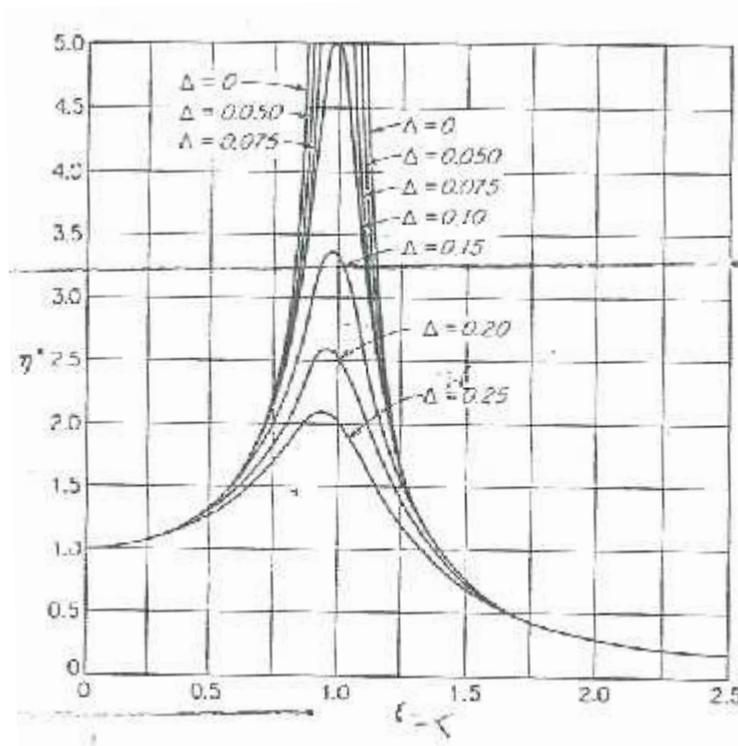
$$A_z^* = \eta^* A_{st}$$

El módulo dinámico  $\eta^*$  en este caso es igual a:

$$\eta^* = \frac{1}{\sqrt{(1 - \xi^2)^2 + 4\Delta^2\xi^2}} \quad (2.24)$$

$$\Delta = \frac{c}{f_{nz}}$$

La figura 2.12 presenta curvas de interrelación entre  $\eta^*$  y  $\xi$ ; este último es la proporción de la frecuencia de vibraciones forzadas a la frecuencia natural de la fundación. Estas gráficas representan diferentes magnitudes de  $\Delta$ , proporcionales a la constante de amortiguamiento.



**Figura 2.12. Relación entre el módulo dinámico de vibraciones amortiguadas  $\eta^*$  y el porcentaje  $\xi$  de la actual frecuencia natural  $\omega/f_{nz}$ , para varios valores reducidos del coeficiente de amortiguamiento  $\Delta$ . Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

El caso particular  $\Delta = 0$  corresponde a la discusión previa del caso de vibraciones de fundaciones donde el efecto de amortiguamiento de las reacciones del suelo no fue considerado. En los casos donde  $\Delta \neq 0$ , la amplitud permanece finita. Mientras mayor es el tamaño de  $\Delta$ , menor es la amplitud. Bajo condiciones de resonancia, el valor máximo de la amplitud corresponde a:

$$\xi = \sqrt{1 - 2\Delta^2} \tag{2.25}$$

Por lo tanto si el amortiguamiento existe, la frecuencia de resonancia decrece algo, y el módulo dinámico de resonancia es igual:

$$\eta_{\max}^* = \frac{1}{2\Delta\sqrt{1 - \Delta^2}} \tag{2.26}$$

Por lo tanto mientras más grande es la constante de amortiguamiento, más pequeño es el modulo dinámico de resonancia.

El gráfico presentado en la figura 2.12 muestra el máximo efecto de amortiguamiento de las reacciones del suelo que puede ser observado en la zona de resonancia, cuando el valor de  $\xi$  es aproximadamente igual a la unidad. Cuando la diferencia  $1 - \xi^2$  incrementa, la influencia de las propiedades de amortiguamiento del suelo sobre amplitudes de vibraciones forzadas decrece; cuando  $\xi$  es grande en comparación de la unidad, este efecto puede ser despreciado. Por lo tanto, fundaciones bajo maquinarias con régimen constante de trabajo son usualmente diseñadas de varias maneras donde una diferencia significativa esta entre  $\xi$  y la unidad, el efecto de amortiguamiento del suelo puede ser despreciado en muchos cálculos de amplitudes de vibraciones forzadas.

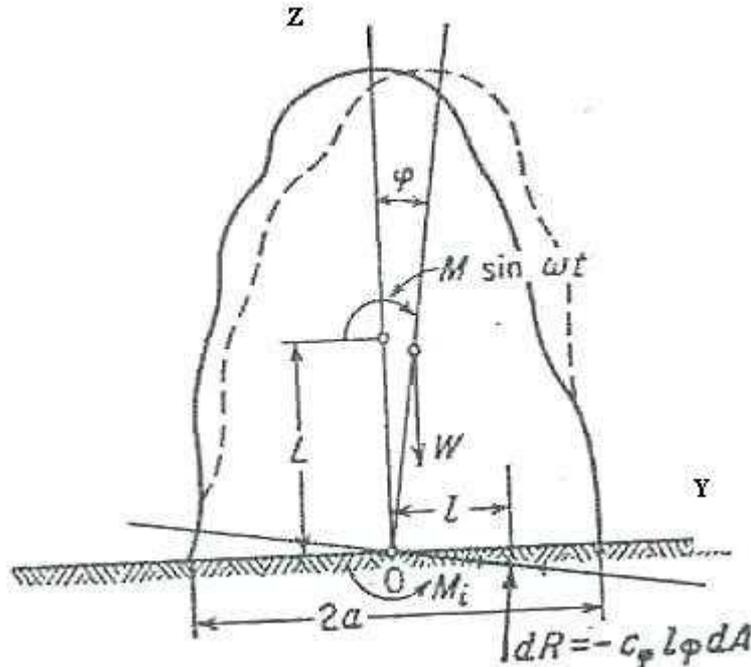
### ***2.15 VIBRACIONES POR ROTACION EN FUNDACIONES***

Si consideramos vibraciones de fundaciones debido a la acción de un momento externo oscilante con cambios en el tiempo de acuerdo a la función  $M \sin \omega t$  que recae bajo uno de los principales planos de la fundación (figura 2.13). Si asumimos que el centro de inercia de la masa de la fundación y el centroide de la base de área horizontal recae sobre una línea vertical situada en el plano del momento oscilante.

Suponiendo que la resistencia elástica de deslizamiento del suelo contra la fundación es muy grande en comparación a la resistencia de la fundación entonces el oscilamiento se puede considerar infinitamente grande.

En estos casos, el movimiento inducido por un momento externo  $M \sin \omega t$  será un movimiento oscilante alrededor del eje que pasa por el centroide del área de contacto de la fundación con el suelo, perpendicular al plano de

vibraciones. La posición de la fundación es determinada por una variable independiente: el ángulo de rotación  $\varphi$  de la fundación alrededor del eje que pasa por el punto 0. (Figura 2.13).



**Figura 2.13. Análisis del movimiento oscilante de una fundación. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Si asumimos que en un cierto instante la fundación rota un pequeño ángulo  $\varphi$  alrededor del eje 0.

La ecuación de movimiento puede ser escrita:

$$-W_0 \ddot{\varphi} + \sum M_i = 0 \tag{2.27}$$

$W_0 =$  Momento de inercia de la masa de la fundación y la máquina con respecto al eje de rotación.

$\sum M_i$  = Suma de todos los momentos externos con respecto al mismo eje. En el caso, en que el peso de la fundación y las reacciones del suelo sean fuerzas externas.

En los estudios vistos durante la carrera, la nomenclatura vista es la siguiente  $W_0 = I_0$

a. Peso de la Fundación. El momento de esta fuerza con respecto al eje de rotación es:

$$LW\varphi \quad (2.28)$$

Donde L es la distancia entre el eje de rotación y el centro de gravedad de la masa vibrando.

b. Reacción del Suelo. Un elemento  $dA$  del área de la fundación en contacto con el suelo, localizado a una distancia  $l$  del eje de rotación, es actuado por la reacción del terreno:

$$dR = C_\varphi l \varphi dA \quad (2.29)$$

Donde  $C_\varphi$  es el coeficiente de elasticidad no uniforme de la compresión del suelo.

El momento de la fuerza elemental  $dR$  con respecto al eje de rotación es:

$$dM_r = -ldR = -c_\varphi l \varphi dA \quad (2.30)$$

Si suponemos que la fundación no pierde contacto con el suelo, entonces el momento total reactivo en contra el área de fundación en contacto con el suelo es:

$$M_r = -c_\varphi \varphi \int_A dA = -c_\varphi I \varphi \quad (2.31)$$

Donde  $I$  es el momento de inercia del área de la fundación en contacto con el suelo con respecto al eje de rotación de la fundación.

Agregando el momento excitatriz  $M \sin(\omega t)$  a los dos otros momentos, se obtiene la ecuación de vibraciones forzadas de la fundación:

$$-W_0 \ddot{\varphi} + WL\varphi - c_\varphi I \varphi + M \sin \omega t = 0 \quad (2.32)$$

Agrupando los términos

$$W_0 \ddot{\varphi} + (c_\varphi I - WL)\varphi = M \sin \omega t \quad (2.33)$$

Haciendo  $M$  igual a cero, se obtiene la ecuación de vibraciones oscilantes libres con respecto al eje  $y$ :

$$W_0 \ddot{\varphi} + (c_\varphi I - WL)\varphi = 0 \quad (2.31)$$

La solución de esta ecuación es:

$$\varphi = C \sin(f_{n\varphi} t + \varphi_0) \quad (2.32)$$

Donde:

$$f_{n\varphi} = \frac{c_\varphi I - WL}{W_0} \quad (2.33)$$

$f_{n\varphi}$  = Frecuencia natural de vibraciones oscilantes de la fundación  $\left[ \frac{rad}{s} \right]$ .

$C, \varphi_0$  = Constantes arbitrarias determinadas por las condiciones iniciales del movimiento de la fundación.

La siguiente expresión se puede obtener para la amplitud de vibraciones:

$$A_\varphi = \frac{M}{W_0(f_{n\varphi}^2 - \omega^2)} \quad (2.34)$$

Como el producto  $WL$  es usualmente pequeño en comparación con  $c_\varphi I$ , este término puede ser despreciado en la ecuación (2.29); por lo tanto para la frecuencia natural de vibraciones:

$$f_{n\varphi}^2 = \frac{c_\varphi I}{W_0} \quad (2.35)$$

Si el área base de la fundación tiene forma rectangular de lados  $a$  y  $b$ , y  $a$  es el lado perpendicular al eje de rotación, obtenemos:

$$I = \frac{ba^3}{12} \quad (2.36)$$

$$f_{n\varphi}^2 = \frac{ba^3 c_\varphi}{12 W_0} \quad (2.37)$$

Se observa de la última fórmula que esta longitud del lado del área de la fundación en contacto con el suelo y perpendicular al eje de rotación tiene un

considerable efecto sobre la frecuencia natural de vibraciones oscilantes de la fundación. Dependiendo de la longitud seleccionada, la frecuencia natural puede cambiar considerablemente. La longitud del otro lado del área de la fundación, por ejemplo, el lado paralelo al eje de rotación, no influye mucho en los valores de  $f_{n\varphi}$  y  $A_\varphi$ . Esta longitud es usualmente seleccionada sobre las bases de consideración de diseño.

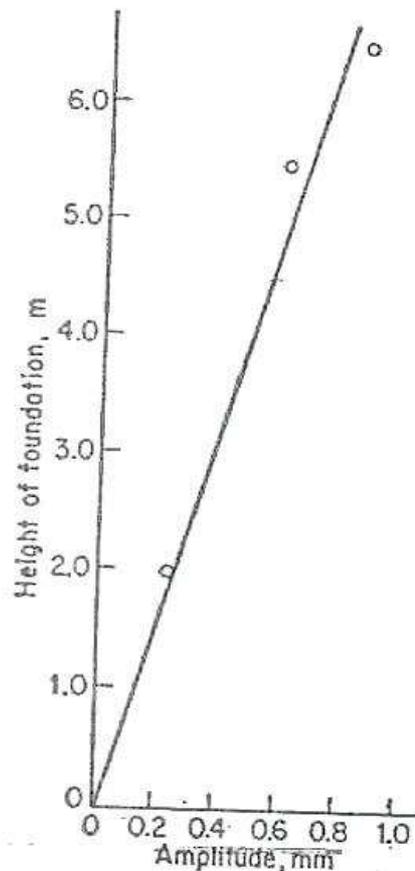
La amplitud de la componente vertical de las vibraciones del borde del área de contacto de la fundación con el suelo es:

$$A = \frac{a}{2} A_\varphi \quad (2.38)$$

$$A = \frac{Ma}{2W_0(f_{n\varphi}^2 - \omega^2)} \quad (2.39)$$

Las vibraciones oscilantes ocurren mayormente en grandes fundaciones bajo maquinarias que tienen un desbalance en la componente horizontal de las fuerzas excitatrices y los momentos excitatrices.

La figura 2.14 ilustra la distribución de amplitudes de vibraciones debido a fuerzas horizontales a lo largo de la fundación bajo una armadura de madera. Como podemos ver de la gráfica el centroide del área de la fundación en contacto con el suelo está sujeto a vibraciones oscilantes forzadas.



**Figura 2.14.** Variación de la amplitud horizontal de oscilamiento de vibraciones forzadas a lo largo de la altura de la fundación. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.

### **2.16 VIBRACIONES DE ESFUERZO CORTANTE PURO**

Si la resistencia del suelo a la compresión es grande con respecto a la resistencia de corte, entonces el desplazamiento de la fundación bajo la acción de fuerzas horizontales puede ocurrir principalmente en la dirección de las fuerzas excitatrices horizontales.

Si asumimos que esta fuerza excitatriz horizontal  $P_t \sin \omega t$  actúa sobre la fundación. Las ecuaciones tanto de vibraciones forzadas como libres pueden ser análogas a las ecuaciones de vibraciones verticales de una fundación, por ejemplo,

la ecuación (2.11), en lugar de insertar  $c_r$ , debería estar insertado  $c_u$ ; por lo tanto la ecuación de vibraciones forzadas horizontales será:

$$\ddot{x} + f_{nz}^2 x = P_T \text{sen}(\omega t) \quad (2.40)$$

Donde  $x$  es el desplazamiento horizontal del centro de gravedad de la fundación y la frecuencia natural de vibraciones en el esfuerzo cortante se expresa como:

$$f_{nz}^2 = \frac{c_r A}{m} \quad (2.41)$$

La solución de la ecuación (2.40) es:

$$x = A_x \text{sen}(\omega t)$$

Por lo tanto, la formula de la amplitud es:

$$A_x = \frac{P_T}{m(f_{nz}^2 - \omega^2)} \quad (2.42)$$

Todas las conclusiones obtenidas considerando vibraciones verticales de fundaciones aplican también a las vibraciones con esfuerzo cortante.

Análogamente en adición a los anteriores tipos de vibraciones de fundaciones, caracterizadas por un desplazamiento horizontal del centro de gravedad de la masa vibrando, las vibraciones con esfuerzo cortante pueden tener la forma de vibraciones rotacionales con respecto al eje vertical  $z$  pasando por el centro de gravedad de la fundación y el centroide de área de esta base.

Donde:

$W_s$  = Momento de inercia de la masa vibrante con respecto al eje anterior

$J_s$  = Momento polar del área de la base de la fundación

$\psi$  = Ángulo de torsión de la fundación

$M_z \sin \omega t$  = Momento excitatriz actuando en el plano horizontal

$c_\varphi$  = Coeficiente de esfuerzo cortante elástico no uniforme

Obtenemos la siguiente ecuación diferencial de vibraciones forzadas de una fundación sometida por un momento excitatriz:

$$W_s \ddot{\psi} + c_\psi J_s \dot{\psi} = M_z \sin \omega t \quad (2.43)$$

Una solución particular de esta ecuación puede ser presentada de la forma:

$$\psi = \frac{M_z}{W_z (f_{n\psi}^2 - \omega^2)} \quad (2.44)$$

Donde  $f_{n\psi}^2 = c_\psi J_z / W_z$  es el cuadrado de la frecuencia natural de vibraciones de una fundación para las vibraciones consideradas.

## CAPITULO III

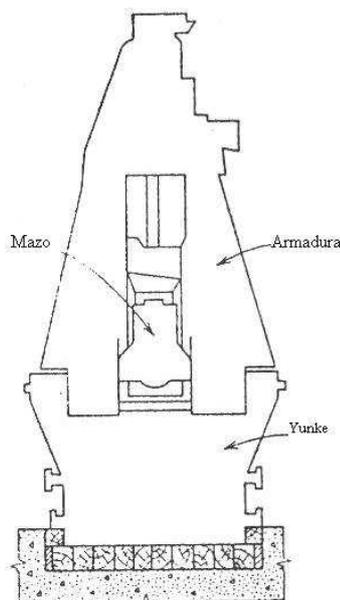
### FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO

#### 3.1 MAQUINAS DE IMPACTO.

##### 3.1.1 CLASIFICACION DE LOS MARTILLOS DE IMPACTO

Los martillos de máquinas de impacto se dividen en dos grupos: los martillos de caída libre y los martillos propios de forja.

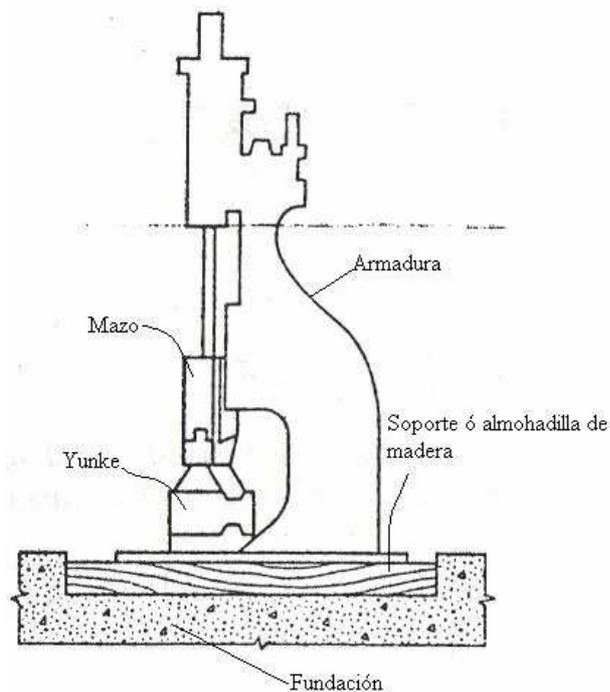
La armadura de un martillo de caída es montada sobre un yunque (Figura 3.1), esto le proporciona rigidez al sistema. La armadura junto con las guías del mazo contribuye a la precisión requerida en el proceso de forja. Esta peculiaridad en el diseño de martillos de caída determina un cierto grado de diseño de estas fundaciones, por lo tanto, el bloque de la fundación bajo el yunque sirve como soporte para el conjunto del martillo.



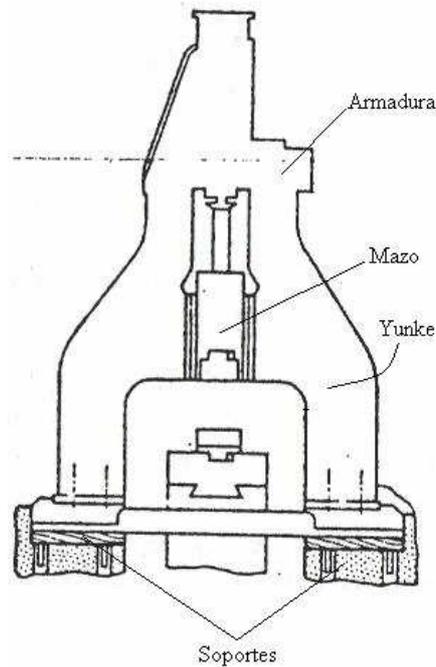
**Figura 3.1. Martillo de caída con armadura montada sobre un yunque. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

El martillo de caída libre es el martillo originario, consiste en un peso que se levanta y luego se suelta directamente sobre el pilote; siendo la frecuencia de golpeo de aproximadamente 3 a 12 golpes/minuto. Los martillos de caída libre han sido reemplazados por varios diseños modernos, pero continúan empleándose ya que se ha encontrado que son muy efectivos en arcillas muy blandas.

La operación de forja libre es usualmente desarrollada por martillos apropiados para la forja. El yunque y la armadura, como norma, son montados de forma separada. Los martillos de forja son construidos con armaduras de soporte simple (Figura 3.2) y de doble soporte (Figura 3.3). El anterior puede ser de arco o puente. Los martillos neumáticos con compresores de aire son martillos de armadura simple.



**Figura 3.2. Martillo con armadura de soporte simple. Fuente: BARKAN, D.D. "Dynamics of bases and foundations".**



**Figura 3.3. Martillo con armadura de doble soporte. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

### ***3.1.2 SUPOSICIONES PRINCIPALES ENVUELTAS EN LOS CALCULOS DE DISEÑO***

La fundación y el martillo presentan un sistema que incluye al menos siete cuerpos: la armadura, las partes que caen, la pieza a forjar, el yunque, el soporte elástico bajo el yunque, el bloque de la fundación y finalmente el suelo.

Desde el punto de vista mecánico, el fenómeno que se desarrolla como resultado del impacto del mazo contra una pieza forjada descansando sobre el yunque es extremadamente complicado y puede ser solo analizado con un elevado grado de aproximación.

El problema principal para diseñar martillos de forja es el de determinar la amplitud de vibraciones de la fundación y establecer los valores de esfuerzos en el soporte bajo el yunque.

La solución a este problema se basa usualmente en suponer que la armadura del martillo, la pieza forjada, el yunque, el soporte elástico bajo el yunque y el bloque de la fundación forman un solo bloque rígido. Tal suposición considera que el factor de deformación (debido al impacto) de la fundación, el yunque y la armadura, es pequeño en comparación con los asentamientos del suelo bajo la fundación, y por lo tanto, puede ser descartado.

Sin embargo, la deformación del soporte bajo el yunque puede ser mucho mayor que los asentamientos del suelo. Por consiguiente, la suposición de que el soporte es infinitamente grande y rígido puede llevar a una cierta cantidad de errores de cálculo. Esta suposición es permisible solo cuando las masas del yunque y la armadura son comparativamente pequeñas en relación a la masa de la fundación.

Solo en este caso el soporte no tiene un efecto considerable sobre la amplitud de vibración de la fundación. De otra manera, la elasticidad del soporte no debe ser despreciada. En este caso los cálculos deben ser reducidos a un sistema formado por tres cuerpos: mazo, el cual es el cuerpo más contundente; el yunque que es separado de la fundación por una conexión elástica; y la fundación sobre una base elástica. El yunque y la fundación son los cuerpos receptores de impacto.

Para determinar las amplitudes de vibración de una fundación, es posible asumir que el tiempo de impacto real es pequeño en comparación con el período de vibraciones naturales del sistema; por consiguiente, durante el impacto, no hay tiempo para que entre la fundación y el yunque se experimente desplazamiento comparable con su desplazamiento durante la vibración que sigue al impacto. Entonces las reacciones de la almohadilla y el suelo dependen solo de los desplazamientos del yunque y la fundación (sin contar las reacciones de amortiguamiento) es posible asumir que durante el impacto no ocurren reacciones adicionales para la almohadilla y el suelo. De esta manera solo se desarrollan

cargas elásticas impuestas por el peso de la fundación, el martillo y el yunque. Estas reacciones existen antes del impacto y son balanceadas por el peso de la instalación.

Por consiguiente durante el impacto, la fundación (con el yunque y la armadura) y el mazo que cae, en la primera aproximación pueden ser considerados como cuerpos libres. Entonces un análisis del impacto del sistema puede ser reducido al análisis de un impacto libre de dos o más cuerpos sólidos absolutos moviéndose con una velocidad inicial.

El cuerpo que impacta (el mazo) en todos los cálculos es asumido como absolutamente rígido.

### ***3.2 ESTUDIO DE UNA FUNDACION BAJO LA ACCION DE CARGAS DE IMPACTO***

#### ***3.2.1 VELOCIDAD DE LAS PARTES QUE CAEN AL INICIO DEL IMPACTO***

Los grandes martillos pueden ser divididos en dos grupos: de caída no restringida del martillo y de movimiento restringido del martillo.

El primer grupo incluye martillos de levantamiento friccional y de martillos con pistones atados rígidamente y levantados por presión de vapor. En martillos de fricción, el martillo es conectado a un plato que se mueve entre dos discos friccionales ajustados contra el plato. Cuando el martillo es levantado a una altura deseada, uno de los discos se mueve fuera del plato y el martillo cae, moviéndose a lo largo de estas guías.

En martillos de acción simple, el martillo que es atado rígidamente al pistón por una barra, es levantado por la presión del vapor a un punto mínimo en la

válvula que esta localizada bajo el pistón y se abre después de que este extremo baja su posición. Después de que el pistón es levantado a la altura deseada, el acceso del vapor dentro del cilindro bajo el pistón se detiene, la válvula se abre y el vapor o el aire comprimido escapan. El pistón junto con el martillo cae y aumenta su velocidad. Después de cortar el acceso del vapor, la válvula de escape se abre, el vapor no escapa de inmediato por el espacio del cilindro bajo el pistón. Por lo tanto, la contrapresión en contra de la caída del martillo es producida, resultando una pérdida de velocidad y de energía cinética de esta caída.

La velocidad de caída del martillo bajo la condición de movimiento restringido de acción simple es igual a:

$$v = \eta \sqrt{2gh} \quad (3.1)$$

Donde:

$g$  = Aceleración de gravedad  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$

$h$  = Altura de caída del mazo  $[m]$

$\eta$  = Coeficiente de contrapresión y fuerzas friccionales

El valor numérico de  $\eta$  depende del diseño del martillo, la regulación de las válvulas, etc.

Las modernas prácticas emplean mayormente martillos de doble acción. En estos martillos, el vapor o el aire comprimido actúa sobre el martillo no solo cuando está siendo levantado, sino también durante la caída; por lo tanto la velocidad y la energía cinética son considerablemente grandes al momento del impacto del martilleo sobre la piedra de trabajo.

Los cambios en la presión del vapor durante la caída del martillo, ambas presiones, una bajo el pistón (contrapresión) y otra sobre el pistón (presión activa) dependen de varios factores como lo son las propiedades de operación de las válvulas, la luz entre el pistón y el cilindro, y el trabajo de las empaquetaduras. Es difícil tomar estos factores con suficiente exactitud. Por consiguiente para calcular la velocidad del martillo, usualmente se trabaja con una presión promedio de vapor y de aire en la tubería de alimentación. Entonces la velocidad del movimiento forzado del martillo y la presión estable es igual a:

$$v = \eta \sqrt{\frac{2g(W + Ap)h}{W}} \quad (3.2)$$

Donde:

$A =$  Área del pistón  $[m^2]$

$p =$  Presión total sobre el pistón  $[Tons/m^2]$

$W =$  Peso total de las partes que caen  $[Tons]$

$\eta =$  Coeficiente de corrección.

$h =$  Altura de caída  $[m]$

### ***3.2.2 DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE CORRECCION $\eta$***

Los valores del coeficiente de corrección en la ecuación 3.1 y 3.2 pueden obtenerse de la siguiente tabla:

Tipo de Martillo	Peso nominal de las partes que caen [Tons]	Velocidad al inicio del impacto [m/s]		Relación $\eta$ entre las medidas y el cálculo de velocidades
		Medidas	Cálculos de la ecuación (V-2-2) o (V-2-1) para $\eta = 1$	
Martillos de doble acción	5,4	6,2	9,0	0,69
	3,6	6,0	8,4	0,71
	2,25	5,4	8,6	0,63
	1,8	4,5	8,1	0,56
	1,125	6,2	8,6	0,72
	1,0	6,8	8,5	0,80
	1,0	5,8	9,8	0,59
	0,635	5,5	9,0	0,61
Martillos de simple acción	0,54	3,3	3,56	0,96
	1,125	3,5	3,93	0,89

**Tabla 3.1. Resultado de eficiencias medidas en martillos. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

La tabla 3.1 presenta valores resultados de medidas realizadas por Barkan (1964) con velocidades calculadas de las ecuaciones 3.1 y 3.2 con  $\eta = 1$ .

Esta tabla muestra que estos datos de velocidad de caída de las partes al momento del impacto son más bajas en martillos de doble acción que los valores calculados por la ecuación 3.2. Para estos martillos, la relación entre los valores medidos y las velocidades calculadas tienen un rango de 0,45 a 0,80; el promedio de valores de  $\eta$  en la ecuación 3.2 puede ser llevado a 0,65.

Continuando con el análisis de la tabla 3.1 la velocidad absoluta no depende mucho de la potencia del martillo. Esto se explica en parte por el hecho de que la

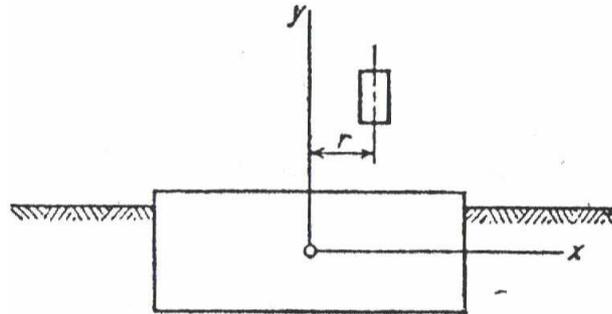
altura de caída del martillo y la presión de vapor o de aire varía para diferentes martillos dentro de un rango comparativamente estrecho. Sin embargo, en muchos casos el valor de la velocidad de diseño puede ser aproximadamente el valor promedio de la velocidad medida en martillos de diferente potencia. Este valor para martillos de doble acción es de 6,0 a 6,5 m/s.

En martillos con una caída no restringida, especialmente martillos de fricción, donde no hay presencia de la contrapresión de vapor y de decrecimiento de la velocidad de caída de las partes es causado por la fricción de las guías. Cuando el martillo es adecuadamente ajustado, el efecto de la fricción es insignificante, sin embargo, el coeficiente de fricción en la ecuación 3.1 puede acercarse a la unidad. Esta conclusión es confirmada por los datos para martillos con caída no restringida, presentada en la tabla 3.1.

### ***3.2.3 VELOCIDADES INICIALES DEL MOVIMIENTO DE UNA FUNDACION***

Supongamos que cuando ocurre un impacto por la caída de un martillo sin que exista un soporte bajo el yunque, donde el yunque y la fundación forman un solo cuerpo cuya elasticidad puede ser despreciada en comparación con la elasticidad del suelo, la fundación puede ser representada por el cuerpo mostrado en la figura 3.4, donde la excentricidad del impacto de la masa cayendo para nuestro caso particular en estudio es despreciable, ya que estamos estudiando martillos donde no existe excentricidad en el impacto y el centro de gravedad de la fundación y el centroide de esta área de contacto con el suelo esta sobre la misma línea vertical (eje y).

Debido al impacto la fundación experimenta vibraciones que ocurren en el plano principal anteriormente mencionado.



**Figura 3.4. Fundación con una masa impactando de manera descentrada (donde r representa la excentricidad medida en mm). Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Si el mazo y la fundación son considerados como un sistema cerrado, entonces se puede considerar que el momento lineal se conserva durante el impacto. La fundación esta inmóvil antes del impacto; para ese instante el momento lineal es igual al momento de mazo, esto es, donde  $v$  es la velocidad del mazo de masa  $m_0$  en el momento en que toca la fundación (al comienzo del impacto).

Después del impacto, durante el período siguiente al instante en que el mazo se separa de la fundación, el momento del mazo y de la fundación es:

$$m_0 v_1 + m v_0$$

$$r = 0$$

Donde:

$v_1$  = Velocidad con la que rebota el mazo de la fundación  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

$m$  = Masa de la fundación  $[Tons]$

$v_0$  = Velocidad inicial del movimiento delantero del centro de masa de la fundación  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

El momento del sistema después del impacto iguala al momento antes del impacto y por consiguiente:

$$m_0 v = m_0 v_1 + m v_0 \quad (3.3)$$

De acuerdo a la hipótesis de Newton concerniente a la restitución de impacto, si ocurre un impacto entre dos cuerpos moviéndose uno en relación al otro, la velocidad relativa después del impacto es proporcional a la velocidad relativa antes del impacto. La fundación se encuentra inmóvil antes del impacto; sin embargo, la velocidad relativa del mazo es igual a  $v$ . Después del impacto, la velocidad absoluta del movimiento del mazo es igual a  $v_1$ , pero el punto de la fundación que es sometido al impacto adquiere una velocidad cuya componente vertical es igual a  $v_0 + r\varphi_0$ ; por consiguiente, la velocidad relativa del mazo después del impacto es igual a  $v_0 + r\varphi_0 - v_1$ . De acuerdo a la hipótesis de Newton:

$$e = \frac{v_0 + r\varphi_0 - v_1}{v} \quad (3.4)$$

Donde  $e$  es el coeficiente de restitución.

De la ecuación 3.3 para la 3.4 se obtiene la expresión para la velocidad inicial del movimiento de la fundación:

$$v_0 = (1+e) \frac{p}{(1+\mu)(r^2 + \rho^2) - r^2} v \quad (3.5)$$

$$\varphi_0 = \frac{\mu r(1+e)}{(1+\mu)(r^2 + \rho^2) - r^2} v \quad (3.6)$$

Donde:

$$\rho^2 = \frac{I}{m_0} \quad \mu = \frac{m}{m_0}$$

Si el impacto es en el centro de la fundación entonces  $r = 0$  y:

$$v_0 = \frac{1+e}{1+\mu} v \quad \varphi_0 = 0 \quad (3.7)$$

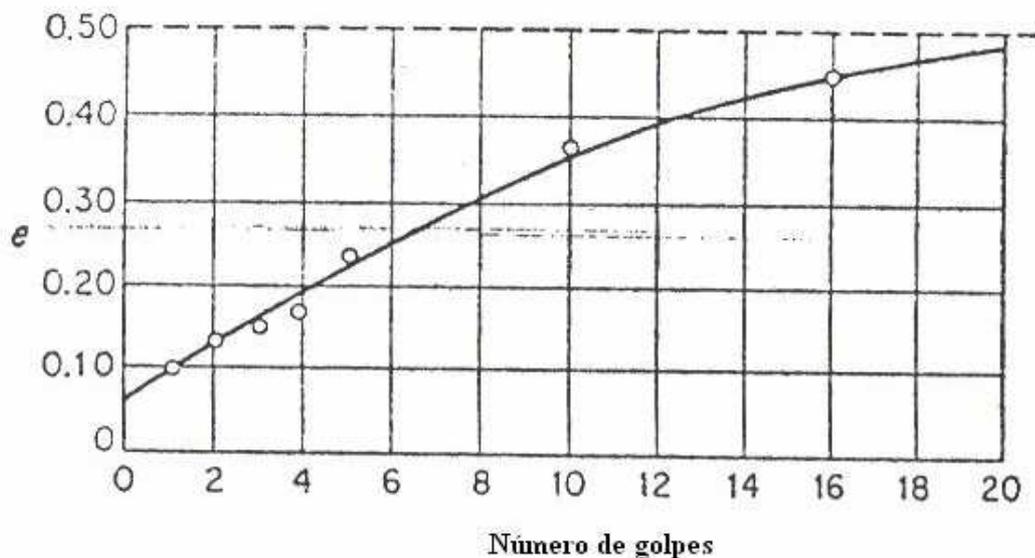
### 3.2.4 COEFICIENTE DE RESTITUCION ( $e$ )

Siguiendo las fórmulas anteriores, la velocidad inicial del movimiento de la fundación o el yunque depende considerablemente del coeficiente de restitución  $e$ . Si el impacto es perfectamente elástico, entonces  $v = v_1$  y consecuentemente  $e = 1$ . Para el impacto de un cuerpo rígido contra uno plástico,  $v_1 = 0$  y consecuentemente  $e = 0$ . En la práctica, el valor numérico de  $e$  se encuentra en el rango de  $0 < e < 1$ . En máquinas de impacto,  $e$  depende de muchos factores, los más importantes de estos son: la temperatura de la pieza a trabajar, las dimensiones, las propiedades de los materiales del mazo, la parte superior y el yunque.

Por lo tanto, los valores de diseño de amplitud de vibraciones de martillos de forja dependen de los valores seleccionados para el coeficiente de restitución  $e$ . Los cálculos de “ $e$ ” se basan en los valores medidos de altura de caída y rebote del mazo después del impacto o del intervalo de tiempo entre dos rebotes de martillo.

Los resultados muestran que estos valores del coeficiente de restitución dependen en gran medida del estado de la pieza trabajada. La figura 3.5 presenta un gráfico de cambios en “ $e$ ” como función del número de golpes sobre la pieza forjada bajo un martillo que tiene un peso de las partes de caída igual a 5,3

toneladas. Siguiendo este gráfico durante el primer golpe contra la pieza forjada, cuando la temperatura es alta y la pieza forjada está en estado plástico el coeficiente de restitución de velocidad de impacto es muy pequeño, siendo aproximadamente igual a 0,10. Cuando el número de golpes se incrementa, la temperatura de la pieza forjada decrece, el impacto rígido se incrementa y consecuentemente el valor de  $e$  aumenta. Para los últimos golpes, cuando comparativamente una pieza más fría esta siendo forjada, el coeficiente de restitución se aproxima a 0,5. Según Barkan, las medidas de estos coeficientes durante los golpes y bajo condiciones de forjado en frío muestran que estos valores no exceden 0,5.



**Figura 3.5. Variación del coeficiente de restitución de velocidad de impacto  $e$  con el número de golpes sobre la pieza. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Los valores de “ $e$ ” para martillos de forja son mucho menores que para troqueladoras y corresponden a valores de diseño que pueden ser iguales a 0,25.

Finalmente, para martillos de forja no metálicos, este coeficiente es considerablemente más pequeño que para martillos que trabajan con partes metálicas y puede ser considerado igual a cero.

### 3.3 SELECCIÓN DEL PESO Y AREA DE LA BASE DE LA FUNDACION EN CONTACTO CON EL SUELO

El peso de la fundación y el tamaño del área en contacto con el suelo pueden ser seleccionados de tal manera que cumplan con los siguientes requerimientos: la presión total sobre el suelo no debe exceder la capacidad de carga del suelo; la fundación no debe rebotar sobre el suelo. Estas condiciones se pueden escribir de la siguiente manera:

$$p_{st} + p_{dy} \leq \alpha p_0 \quad (3.8)$$

$$p_{st} > p_{dy} \quad (3.9)$$

Donde:

$$p_{st} = \text{Presión estática sobre el suelo } \left[ \frac{\text{Tons}}{\text{m}^2} \right]$$

$$p_{dy} = \text{Presión dinámica sobre el suelo } \left[ \frac{\text{Tons}}{\text{m}^2} \right]$$

$$p_0 = \text{Valor permisible bajo la condición de solo carga estática } \left[ \frac{\text{Tons}}{\text{m}^2} \right]$$

$\alpha$  = Coeficiente de reducción requerida

La condición expresada por la ecuación 3.8 está basada en la suposición de que la presión estática y dinámica son equivalentes o que el coeficiente de reducción requerido no es una constante para el suelo dado y la fundación. La presión dinámica transmitida a los suelos (especialmente en suelos granulados) puede inducir asentamientos y deformaciones con tensiones que son cien veces más grandes que las causadas por presiones estáticas de la misma magnitud. Sin embargo, si uno de los términos de la parte izquierda de la expresión 3.8 cambia, pero la suma de estos términos permanece constante, los asentamientos totales y las deformaciones podrían cambiar. Por lo tanto, siguiendo la suposición de que  $\alpha$

es un valor constante para el suelo dado y la fundación, la condición expresada por la ecuación 3.8 no puede ser aceptada porque va en contra del fenómeno físico natural.

La condición expresada por la ecuación 3.9 no tiene un significado práctico, porque el rebote de la fundación no es de esencial importancia y no puede ser observado bajo condiciones de trabajo. Por lo tanto en el diseño se deben llevar las fundaciones bajo una profundidad considerable de 2mm o más y para obtener un buen asentamiento es necesario incrementar considerablemente la altura de la fundación. Como resultado de esto, todas las fundaciones construidas que cumplen con las condiciones de las ecuaciones 3.8 y 3.9 representan bloques macizos llevados a una profundidad considerable.

La limitación de la amplitud de vibración de una fundación de martillo es la condición más importante que debe satisfacer el diseñador de este tipo de fundaciones. Otra condición significativa es el valor límite de la presión estática sobre el suelo; el menor asentamiento (las otras condiciones permanecen iguales).

Así en lugar de las condiciones de la ecuación 3.8 y 3.9 el diseñador de la fundación debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$A_z < A_0 \quad (3.10)$$

$$p_{st} \leq \alpha p_0 \quad (3.11)$$

Numerosas investigaciones indican que el valor promedio de las amplitudes de vibración de fundaciones de martillos, están alrededor de aproximadamente 1mm. Esto se puede tener como un valor de diseño para amplitudes permisibles. Sin embargo, la condición de la ecuación 3.10 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$A_z < 1 \text{ mm} \quad (3.12)$$

En el mejor de los casos bajo la suposición de que la fundación junto con el yunke presenta un sistema de un grado de libertad, el valor de la amplitud de vibraciones es determinado por la ecuación 3.13 y la condición de la ecuación 3.12 puede ser escrita de la forma:

$$\frac{(1+e)W_0v}{\sqrt{kc_u WAg}} < 10^{-3} \quad (3.13)$$

Donde todas las dimensiones son en metros, toneladas y segundos.

De las ecuaciones 3.11 y 3.13 los valores del área de contacto de la fundación y el peso para amplitudes de vibración de fundaciones que no excedan 1mm y la presión estática sobre el suelo no exceda  $\alpha p_0$ ; entonces se obtiene:

$$A \gg \frac{(1+e)W_0v}{\sqrt{kc_u \alpha p_0 g}} \quad [\text{m}^2] \quad (3.14)$$

$$W_f = \frac{(1+e)W_0v\sqrt{\alpha p_0}}{\sqrt{kc_u g}} 10^{-3} - W_a \quad (3.15)$$

Donde:

$W_f$  = Peso de la fundación [Tons]

$W_a$  = Peso del yunke y la armadura [Tons]

Dividiendo ambas partes de la ecuación 3.15 por  $W_0$ , se obtiene una fórmula para determinar la relación del peso de la fundación correspondientemente a la unidad de peso real de las partes que caen del martillo:

$$n_f = \frac{(1+e)\sqrt{\alpha p_0}}{\sqrt{k c_u g}} v \times 10^3 - n_a \quad (3.16)$$

$$n_f = \frac{W_f}{W_0} \quad (3.17)$$

$n_f$  = relación de peso de la fundación correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen

$$n_a = \frac{W_a}{W_0} \quad (3.18)$$

$n_a$  = relación de peso del yunke y la armadura correspondiente a la unidad de peso real las partes que caen

$k$  = Coeficiente correctivo

$\alpha$  = Coeficiente de reducción de capacidad de carga

De acuerdo con los valores de  $p_0$  y  $c_u$  de diferentes suelos dados en tablas o los datos geotécnicos, la siguiente relación de aproximación puede ser usada:

$$\frac{p_0}{c_u} = 0.07 \quad (3.19)$$

El coeficiente correctivo  $k$  se puede establecer igual a 3,0 ya que esto permite tener una buena seguridad para la estabilidad dinámica; el coeficiente de reducción de capacidad de carga  $\alpha$ , puede ser igual a 0,4.

Tipo de Martillo	$v$ [m/s]	$c$	$n_a$	$n_f$
<b>Martillos de Troqueladoras:</b>				
- Martillos de doble acción (troquelado de piezas de acero).....	6,5	0,5	30	48
- Martillos de simple acción:				
- Troquelado de piezas de acero.....	4,5	0,5	20	34
- Troquelado de metales no ferrosos.....	4,5	0,0	----	16
<b>Martillos de Forja:</b>				
- Martillos de doble acción.....	6,5	0,25	30	35
- Martillos de simple acción.....	4,5	0,25	20	25

**Tabla 3.2. Valores de algunos coeficientes de martillos. (Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”).**

Sustituyendo los valores de estos coeficientes en la ecuación 3.16, se obtiene una fórmula simple para la determinación del peso de la fundación dependiendo de la velocidad de las partes de caída del martillo y del coeficiente de restitución:

$$n_f = 8.0(1 + e)v - n_a \tag{3.20}$$

De acuerdo con los datos de empresas constructoras de máquinas, se puede tener aproximadamente:

Para martillos de doble acción:  $n_f = 30$

Para martillos no restringidos:  $n_a = 20$

Valores numéricos de  $n_f$  para diferentes martillos son dados en la tabla 3.2.

Para comparar los valores calculados de  $n_f$  con los datos obtenidos experimentalmente, la tabla 3.3 muestra valores de  $n_f$  para algunos de los

martillos de caída de las fundaciones de losa investigadas por una planta fabricadora.

El valor promedio experimental de  $n_f$  para los martillos de la tabla 4.6 es 46. Sin embargo, se debe mencionar que el peso real de caída de las partes de los martillos estudiados es mucho más grande que este peso nominal. En muchos otros casos los dados operativos son más ligeros y consecuentemente la diferencia entre el peso real y el nominal de las partes que caen es pequeña. Además, estos martillos tienen un valor grande de  $n_f$ , aproximadamente de 50 a 55 para el mismo peso de la fundación. Para fundaciones macizas, caen en el rango de 70 a 80 y a menudo alcanzando de 100 a 200.

Peso nominal de las partes que caen [Tons]	$W_0$ [Tons]	$W_f$ [Tons]	A [ $m^2$ ]	Valor actual de $n_f$	Valor actual de $a_f$	Valores calculados de $n_f$	$\frac{W_b}{W_0}$	Valores calculados de $a_f$
1	1,2	49,7	14,7	41,1	12,2	48	32,6	12,2
1,25	2,1	92	20	43,8	9,6	48	31,3	9,5
5,4	7,5	502	65,6	67	8,8	48	30,8	8,8
2,25	4,1	217	38,2	53	9,4	48	32,4	9,3
1,35	2	73,5	16,5	36,8	8,2	48	36,8	8,2
0,54	0,75	28,4	9,9	38	13	48	31	13,2
2,25	4,1	168	40	41,1	10,00	48	34	9,8

**Tabla 3.3. Comparación de valores reales y calculados de pesos reducidos  $n_f$  y áreas reducidas  $a_f$  de fundaciones de losas para martillos. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Si en las fundaciones de losa se puede tomar en cuenta solo el peso del concreto, despreciando el peso del concreto sobre la losa, entonces el valor de  $n_f$  está alrededor de 30 a 35. En fundaciones macizas donde no hay relleno presente; el valor de  $n_f$  representa la relación entre el peso de la fundación y el peso real de las partes en caída. De esta manera, el gasto de material para la losa de la fundación es dos veces menor que para fundaciones macizas.

La ecuación 3.14 para la selección del área de la fundación en contacto con el suelo puede ser simplificada basándose en la siguiente consideración: de

acuerdo con los datos disponibles de  $c_u$  y  $p_0$  para diferentes suelos, se puede indicar que:

$$\frac{P_0}{c_u} \cong 0.5 \times 10^{-2} m \quad (3.21)$$

Por lo tanto:

$$c_u = 2 \times 10^2 p_0 \quad (3.22)$$

Donde todas las dimensiones están en toneladas y en metros.

Dividiendo ambas partes de la ecuación 3.14 por  $W_0$ , se obtiene una expresión para la reducción del área de contacto de la fundación correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen:

$$a_f = \frac{A}{W_0} = \frac{(1+e)v \times 10^3}{p_0 \sqrt{\alpha k g \times 2 \times 10^2}} \quad (3.23)$$

Como se dijo anteriormente con  $k = 3,0$  y  $\alpha = 0,4$ , obtenemos una fórmula simple para la determinación tentativa de  $a_f$  y consecuentemente el contacto entero del área de la fundación:

$$a_f = \frac{20(1+e)v}{p_0} \quad (3.24)$$

La ecuación 3.24 establece la dependencia del área de contacto de la fundación no solo de las características del martillo, sino también de las propiedades del suelo; las dimensiones requeridas del área de contacto de la fundación se incrementan en proporción inversa a la capacidad de soporte del suelo.

Tipo de Martillo	Valores de $a_f$ para los siguientes grupos de suelos:		
	Suelos débiles $p_0 < 1,5$ Kg/cm <sup>2</sup>	Suelos de mediana resistencia $p_0 = 1,5 - 3,5$ Kg/cm <sup>2</sup>	Suelos de alta resistencia $p_0 = 3,5 - 6$ Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Martillos de Troqueladoras:</b>			
- Martillos de doble acción (troquelado de piezas de acero).....	13	5,5 – 13	3,3 -5,5
- Martillos de simple acción:			
- Troquelado de piezas de acero.....	9	4 – 9	2,5 – 4
- Troquelado de metales no ferrosos.....	6	5 – 6,2	1,5 – 2,5
<b>Martillos de Forja:</b>			
- Martillos de doble acción.....	11	5 – 11	3 – 5
- Martillos de simple acción.....	7.5	5,3 – 7	2 – 3

**Tabla 3.4. Valores de áreas de contacto reducidas de fundaciones  $a_f$  requeridas para diferentes suelos. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Por ejemplo si vemos de esta tabla los martillos de caída de doble acción usados por el troquelado (o acuñado) de piezas de acero, estos son del tipo más frecuente empleados en la industria del forjado, son caracterizados por la siguiente relación: cuando el suelo es de esfuerzo medio, en promedio cerca de  $9 m^2$  del área de contacto de la fundación será requerida por unidad de peso real de las partes que caen.

La tabla 3.4 suministra valores de  $a_f$  que fueron usados con fundaciones de losa para martillos cuando  $p_0 = 2,5 \text{ Kg/cm}^2$ . De los datos de esta tabla los valores de  $a_f$  establecidos de la ecuación 3.24 están próximos a los aceptados por

el diseño de fundaciones de losa para martillos. Fundaciones macizas de martillos caracterizadas por valores de  $a_f$  de 7 a 8, estos son algo menores a los valores usados para fundaciones de losas.

### **3.4 VIBRACIONES NATURALES DE UN MARTILLO Y SU FUNDACION COMO RESULTADO DE UN IMPACTO CENTRADO**

#### **3.4.1 ECUACIONES DE LAS VIBRACIONES DE LA FUNDACION Y EL YUNKE**

Considerando una condición simple en la cual el soporte o almohadilla elástica es despreciada, en este caso, las vibraciones de la fundación, el yunque y armadura ocurren como vibraciones de un cuerpo con solo un grado de libertad.

En este caso la ecuación diferencial de vibraciones verticales libres de la fundación es:

$$\ddot{z} + f_{nz}^2 z = 0 \quad (3.25)$$

$z$  = Desplazamiento vertical del centro de masa de la fundación y el yunque, medidos desde la posición de equilibrio  $[mm]$

$f_{nz}^2$  = cuadrado de la frecuencia natural de vibraciones verticales  $\left[ \frac{rad}{s^2} \right]$

$$f_{nz}^2 = \frac{c_u A}{m} \quad (3.26)$$

$A$  = Área de la fundación en contacto con el suelo  $[m^2]$

$m$  = Masa total vibrando  $[Kg]$

$c_u$  = Coeficiente de compresión elástica uniforme del suelo  $\left[ \frac{\text{Tons}}{m^3} \right]$

La ecuación 3.25 es la ecuación de vibraciones libres de la fundación sin amortiguamiento. La solución general de esta ecuación es:

$$z = A \sin f_{nz}t + B \cos f_{nz}t \quad (3.27)$$

Las constantes A y B usualmente, son determinadas de las condiciones iniciales del movimiento. Tomando en cuenta el instante cuando el mazo impacta con el yunque, se obtiene para  $t = 0$ :

$$z = 0 \quad \dot{z} = v_0$$

Usando las condiciones iniciales se obtiene:

$$A = \frac{v_0}{f_{nz}} \quad B = 0$$

La ecuación 3.27 toma la forma:

$$z = \frac{v_0}{f_{nz}} \sin f_{nz}t \quad (3.28)$$

La máxima deflexión de la fundación ocurrirá después del tiempo  $t_1$ :

$$t_1 = \frac{\pi}{2f_{nz}}$$

Este valor será:

$$A_z = \frac{v_0}{f_{nz}} \quad (3.29)$$

Si tomamos en cuenta que las reacciones del suelo son proporcionales a la velocidad de desplazamiento de la fundación, entonces la amplitud de vibraciones reales será más pequeña que las calculadas sin considerar las fuerzas de amortiguamiento. Sin embargo, es una difícil tarea evaluar la influencia de las fuerzas de amortiguamiento por medio de los cálculos. Estas fuerzas dependen de muchos factores (por ejemplo, el área de la fundación en contacto con el suelo, la masa de la fundación, el período de estas vibraciones libres, la profundidad de la fundación y las características del suelo).

El soporte bajo el yunque es medianamente elástico en comparación con el yunque y la fundación; sin embargo, el yunque y la armadura no solo participan en las vibraciones de la fundación sobre el suelo, sino que experimentan vibraciones con respecto a la fundación.

Para evaluar la amplitud de vibraciones del yunque en relación a la fundación, es necesario considerar las vibraciones del sistema con dos grados de libertad. Las vibraciones de este sistema son determinadas por las siguientes ecuaciones diferenciales:

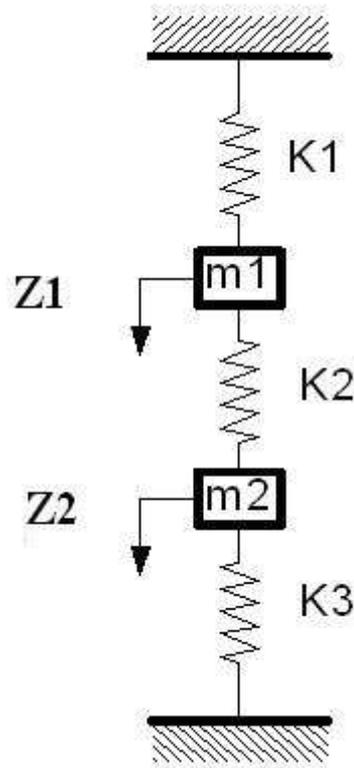


Figura 3.6. Diagrama sistema de 2 grados de libertad. Fuente: Los Autores.

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{z}_1 + c_1 z_1 - c_a (z_2 - z_1) &= 0 \\
 m_2 \ddot{z}_2 + c_a (z_2 - z_1) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.30}$$

Donde:

$m_1, m_2$  = Masas de la fundación y el yunque [Kg]

$c_1 = c_u A$  = Coeficiente de rigidez de la base del suelo bajo la fundación

[Tons/m]

$c_a = \left(\frac{E}{b}\right) A_2$  = Coeficiente de rigidez del soporte bajo el yunque [Tons/m]

$A_2$  = Área de la base del soporte [m<sup>2</sup>]

$b$  = Espesor del soporte [m]

$E$  = Módulo de Young's del material del soporte [Tons/m<sup>2</sup>]

$z_1, z_2$  = Desplazamiento de la fundación y el yunque medidos desde la posición de equilibrio [mm]

Denotando como  $f_{n1}$  y  $f_{n2}$  a las frecuencias naturales del sistema cuyo movimiento es determinado por la ecuación (3.30); donde:

$$f_{na}^2 = \frac{c_a}{m_2} \quad (3.31)$$

La cual determina la frecuencia de vibraciones naturales del yunque con la armadura; entonces, se obtiene la solución general del sistema de la ecuación 3.30:

$$\begin{aligned} z_1 &= C_1(f_{na}^2 - f_{n1}^2) \sin(f_{n1}t + \alpha_1) + C_2(f_{na}^2 - f_{n2}^2) \sin(f_{n2}t + \alpha_2) \\ z_2 &= C_1 f_{na}^2 \sin(f_{n1}t + \alpha_1) + C_2 f_{na}^2 \sin(f_{n2}t + \alpha_2) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Haciendo:

$$\begin{aligned} C^{(1)} &= C_1 \cos \alpha_1 & C^{(2)} &= C_1 \sin \alpha_1 \\ C^{(3)} &= C_2 \cos \alpha_2 & C^{(4)} &= C_2 \sin \alpha_2 \end{aligned}$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned} z_1 &= C^{(1)}(f_{na}^2 - f_{n1}^2) \sin f_{n1}t + C^{(2)}(f_{na}^2 - f_{n1}^2) \cos f_{n1}t + C^{(3)}(f_{na}^2 - f_{n2}^2) \sin f_{n2}t - C^{(4)}(f_{na}^2 - f_{n2}^2) \cos f_{n2}t \\ z_2 &= C^{(1)} f_{na}^2 \sin f_{n1}t + C^{(2)} f_{na}^2 \cos f_{n1}t + C^{(3)} f_{na}^2 \sin f_{n2}t + C^{(4)} f_{na}^2 \cos f_{n2}t \end{aligned} \quad (3.33)$$

Las frecuencias naturales  $f_{n1}$  y  $f_{n2}$  son determinadas de las raíces de la ecuación:

$$f_n^4 - (f_l^2 + f_{na}^2)(1 + \mu) f_n^2 + (1 + \mu) f_l^2 f_{na}^2 = 0 \quad (3.34)$$

Donde:

$$\mu = \frac{m_2}{m_1}$$

$$f_l^2 = \frac{c_1}{m_1 + m_2} = \frac{c_u A}{m_1 + m_2} \quad (3.35)$$

$f_l^2$  es la frecuencia límite de la fundación junto con el martillo colocadas sobre el suelo (para la condición en que la almohadilla o soporte es infinitamente rígido).

Las condiciones iniciales del movimiento en el caso considerado ( $t = 0$ ) son las siguientes:

$$z_1 = z_2 = 0 \quad \dot{z}_1 = 0 \quad \dot{z}_2 = v_a$$

Donde  $v_a$  es la velocidad inicial del movimiento del yunque,

$$v_a = \frac{1+e}{1+\mu_a} v \quad (3.36)$$

$$\mu_a = \frac{m_2}{m_0} \quad (3.37)$$

Las soluciones particulares del sistema 3.30 que corresponden a estas condiciones iniciales son las siguientes:

$$\begin{aligned}
z_1 &= \frac{(f_{na}^2 - f_{n2}^2)(f_{na}^2 - f_{n1}^2)}{f_{na}^2(f_{n1}^2 - f_{n2}^2)} v_a \left( \frac{\sin f_{n1}t}{f_{n1}} - \frac{\sin f_{n2}t}{f_{n2}} \right) \\
z_2 &= \frac{v_a}{f_{n1}^2 - f_{n2}^2} \left( \frac{f_{na}^2 - f_{n2}^2}{f_{n1}} \sin f_{n1}t - \frac{f_{na}^2 - f_{n1}^2}{f_{n2}} \sin f_{n2}t \right)
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Con estas expresiones es posible calcular los esfuerzos que se desarrollan en el soporte como resultado de las vibraciones combinadas del yunque y la fundación.

Para los propósitos prácticos la amplitud de vibración para  $\sin f_{n1}t$  (donde  $f_{n1} > f_{n2}$ ) es igual a cero. Por lo tanto, aproximando la expresión para el desplazamiento dinámico de la fundación y el yunque resulta lo siguiente:

$$\begin{aligned}
z_1 &= -\frac{(f_{na}^2 - f_{n2}^2)(f_{na}^2 - f_{n1}^2)}{f_{na}^2(f_{n1}^2 - f_{n2}^2)f_{n2}} v_a \sin f_{n2}t \\
z_1 &= -\frac{f_{na}^2 - f_{n1}^2}{(f_{n1}^2 - f_{n2}^2)f_{n2}} v_a \sin f_{n2}t
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Pero el valor de  $\sin f_{n2}t$  tiende a 1 debido a que el tiempo de impacto del mazo tiende a cero, por lo tanto, esta ecuación puede simplificarse aún más quedando:

$$z_1 = -\frac{(f_{na}^2 - f_{n2}^2)(f_{na}^2 - f_{n1}^2)}{f_{na}^2(f_{n1}^2 - f_{n2}^2)f_{n2}} v_a \tag{3.40}$$

$$z_2 = -\frac{f_{na}^2 - f_{n1}^2}{(f_{n1}^2 - f_{n2}^2)f_{n2}} v_a \tag{3.41}$$

El máximo esfuerzo  $\sigma$  en el soporte debe ser igual a:

$$\sigma = \frac{c_2}{A_2} (z_2 - z_1) \quad (3.42)$$

### ***3.5 METODOLOGIA PARA EL ANALISIS Y DISEÑO DE FUNDACIONES DE MAQUINAS DE IMPACTO***

#### ***3.5.1 DATOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DE UNA FUNDACION DE MARTILLOS DE IMPACTO***

Los siguientes datos de la máquina son requeridos para el diseño de una fundación para máquinas de impacto:

- Peso nominal de las partes que caen, que usualmente caracterizan la potencia del martillo. En los martillos de caída libre el peso real de las partes que caen, en adición al peso del mazo, pistón, incluyen solo la parte superior de la caída. Por lo tanto para estos martillos el peso real de las partes en caída es mayor al peso nominal encontrado en catálogos. El diseño de la fundación de martillos se realiza basándose en el peso real de las partes que caen.

- El peso real de las partes que caen.
- La altura máxima de caída del mazo (o la máxima carrera del pistón).
- El área superior del pistón.
- La presión media de trabajo sobre el pistón (o la presión de vapor).
- El peso del yunke y la armadura.
- El área base del yunke.

- Dimensiones en el plano y espesor del soporte bajo la armadura y el yunque del martillo de impacto.

Además de esto para el diseño se deben conocer los datos del suelo y de la fundación:

- Presión permisible del suelo.
  - Coeficiente de contrapresión y fuerzas friccionales.
  - Coeficiente de restitución.
  - Peso de la fundación junto con el relleno.
  - Área de contacto de la fundación con el suelo.
  - Módulo de elasticidad del soporte bajo el yunque.
  - Coeficiente de compresión elástica uniforme
  - Coeficiente de corrección.
  - Coeficiente de la capacidad de carga.
- La localización del lugar del martillo con respecto a las fundaciones adyacentes bajo maquinarias, motores y soportes de estructuras del edificio; las dimensiones, elevaciones y profundidades de esta fundación.

### ***3.5.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE LAS PARTES QUE CAEN AL INICIO DEL IMPACTO***

En el caso de estudio para el cálculo se está suponiendo que el mazo es elevado por presión de vapor, y por lo tanto, debemos usar la siguiente ecuación 3.2 para calcular la velocidad.

Además, el coeficiente de contrapresión como se indicó anteriormente debe estar en un rango de 0,45 a 0.80, por lo cual, para efectos de nuestros cálculos se tomará un valor promedio de 0,65.

### ***3.5.3 CALCULOS PRELIMINARES AL DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACION***

#### ***3.5.3.1 CALCULO DEL PESO REQUERIDO DE LA FUNDACION***

Para poder calcular el peso de la fundación y su área de contacto con el suelo, primero debemos calcular los valores mínimos requeridos de peso y área de contacto con el suelo; por lo cual debemos usar la ecuación (3.18) para obtener la relación de peso del yunque y la armadura correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen de la fundación.

Una vez calculado este valor se procede a calcular de la ecuación (3.20) la relación de peso de la fundación correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen, donde el coeficiente de restitución “ $e$ ” a usar será de 0,5 ya que de lo anterior, es el valor máximo que podemos obtener mediante los golpes producidos por el impacto, por lo tanto podemos tomarlo como un límite.

Por lo tanto, el peso de la fundación requerida para tener un buen dimensionamiento vendrá dado por la ecuación (3.17), de donde obtenemos:

$$W_f = n_f \cdot W_0$$

Con esto obtendremos el peso requerido de la fundación a diseñar de acuerdo a los datos de diseño.

### **3.5.3.2 CALCULO DEL AREA REQUERIDA DE LA FUNDACION**

Para obtener el área requerida de la fundación debemos proceder a utilizar la ecuación (3.24) para determinar el valor de la reducción del área de contacto de la fundación correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen.

Una vez realizado este procedimiento calculamos el área requerida usando la relación de la ecuación (3.23), donde:

$$A^* = a_f \cdot W_0$$

### **3.5.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACION**

Basándonos en los valores determinados anteriormente del peso requerido de la fundación y el área de contacto con el suelo, podemos proceder a diseñar la fundación.

El diseño de este tipo de fundaciones generalmente es del tipo losa. Una vez que se tenga el dibujo en plano de la fundación se deberá calcular el volumen de concreto ( $V_c$ ) y el volumen del relleno ( $V_b$ ), los cuales viene dados en  $m^3$ .

Una vez calculados estos dos volúmenes y teniendo el peso específico del concreto y del relleno procedemos a calcular el peso de la fundación ( $W_f$ ) el cual vendrá dado por la siguiente ecuación:

$$W_f = V_c \cdot \gamma_c + V_b \cdot \gamma_b$$

Donde  $\gamma_c$  y  $\gamma_b$  están expresados en  $Tons/m^3$ . El peso de la fundación deberá ser superior al peso de la fundación requerido.

El área de contacto de la fundación con el suelo es determinada por la longitud (ancho y largo) de la fundación, la cual debe ser mayor que el área requerida.

### ***3.5.5 CALCULO DE LA AMPLITUD DE VIBRACIONES DE LA FUNDACION***

Usando la ecuación 3.31 hallamos el cuadrado de la frecuencia límite de vibraciones naturales del yunque con la armadura.

Calculada la frecuencia límite de vibraciones naturales del yunque junto con la armadura, procedemos a calcular el cuadrado de la frecuencia límite de la fundación junto con el martillo usando la ecuación (3.35).

Una vez calculadas estas frecuencias podemos obtener las frecuencias naturales del sistema mazo-fundación resolviendo la ecuación (3.34).

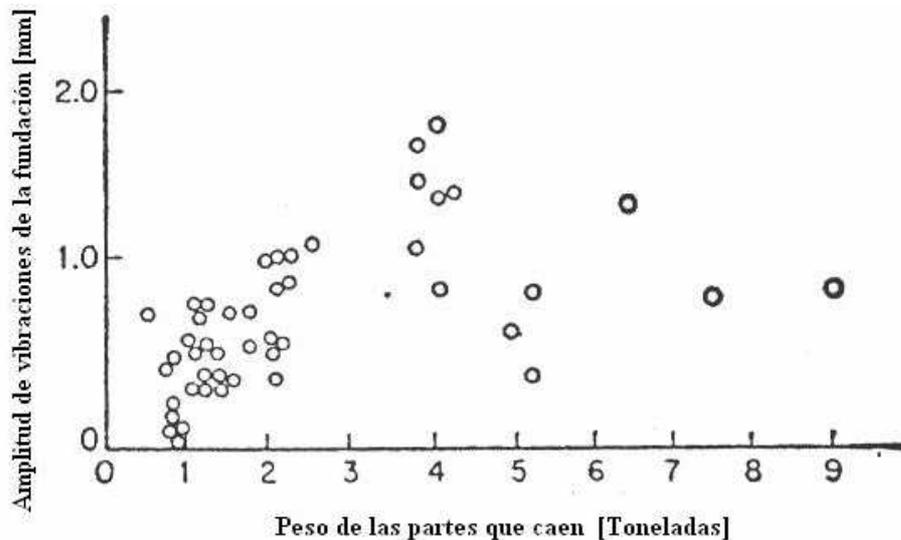
La velocidad inicial del yunque junto con la armadura viene dada por la ecuación (3.7).

#### ***3.5.5.1 AMPLITUD DE VIBRACIONES DE LA FUNDACION***

El cálculo de esta amplitud viene dado por la ecuación (3.40). La figura 3.6 nos da medidas de amplitudes de vibración contra el peso actual de las partes que

caen del martillo. En vista de que estas amplitudes de martillo alcanzan un valor de 2,0mm, este es el valor que debe tomar como permisible para los cálculos.

Sin embargo, con un decrecimiento en la potencia del martillo, se puede observar un decrecimiento en las vibraciones de la fundación. La mayor parte de las fundaciones representadas en el gráfico tiene amplitudes de vibraciones de 1,0 a 1,2mm más o menos; por lo tanto para efectos de nuestros cálculos procederemos a tomar como valor permisible de diseño, valores que estén dentro de este rango.



**Figura 3.7. Medidas de amplitudes de vibraciones de 47 fundaciones de martillos graficadas contra el peso de las partes impactadas. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Lo anterior nos lleva a la conclusión de que el valor de diseño de vibraciones verticales de martillos de impacto puede estar en el rango de 1,0 a 1,2mm.

### ***3.5.5.2 AMPLITUD DE VIBRACIONES DEL YUNQUE Y LA ARMADURA, Y ESFUERZO DINAMICO EN LA ALMOHADILLA***

La ecuación (3.41) nos permite hallar el valor de la amplitud de vibraciones del yunque junto con la armadura.

Las amplitudes de vibraciones de yunques y armaduras de las máquinas de impacto son mucho más grandes que las amplitudes de vibración de la fundación. Para martillos de gran potencia se coloca un soporte de mayor espesor bajo el yunque, los valores absolutos de las vibraciones del yunque alcanzan los 5mm aunque con un incremento en la potencia del martillo, la amplitud de vibraciones del yunque incrementa. Para martillos con un peso de las partes en caída superior a 1 tonelada, una amplitud típica alcanza 1mm; para martillos de 2 toneladas esta amplitud alcanza los 2mm; para martillos donde el peso de las partes que caen excede las 3 toneladas, la amplitud de vibración del yunque es usualmente de 3 a 4mm. Estos valores de vibración de yunques y martillos pueden ser tomados como permisibles.

Los valores dados anteriormente se dan cuando los martillos están en operación y el yunque rebota sobre el soporte. El impacto del yunque y la armadura tiene un efecto perjudicial sobre la condición del martillo. Además a mayor amplitud de vibración del yunque más energía cinética de impacto es consumida por estas vibraciones y consecuentemente menor es la eficiencia del martillo. La pérdida de energía de impacto junto con vibraciones alcanza un 10% del trabajo de las partes que caen del martillo. Las grandes amplitudes de yunques son explicadas por deficiencias, rigidez en el soporte bajo el yunque, las cuales en muchos martillos tienen espesores de 1,5m.

Los espesores de las almohadillas deben ser seleccionados de tal manera que las amplitudes de vibración no excedan un valor particular; además, los esfuerzos en el soporte no serán mayores que los permisibles. La tabla 3.4 contiene las bases

de estas consideraciones. El decrecimiento del espesor del soporte en comparación con los usualmente aceptados se basa en las consideraciones concernientes a los efectos perjudiciales de vibraciones de yunques de grandes amplitudes.

Tipos de Martillos	Espesor del soporte, si el peso de las partes que caen es:		
	Hasta 1 Ton	De 1 a 3 Tons	Más de 3 Tons
Martillos de doble acción	Hasta 0,20	0,20 – 0,60	0,60 – 1,20
Martillos de simple acción	Hasta 0,10	0,10 – 0,40	0,40 – 0,90
Martillos de Forja	Hasta 0,20	0,20 – 0,60	0,60 - 1

**Tabla 3.5. Espesores de soportes de madera bajo el yunque. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

El esfuerzo dinámico que se presenta en la almohadilla bajo el yunque viene dado por la expresión (3.42).

El espesor del soporte puede ser seleccionado mientras que el esfuerzo no exceda los valores permisibles, los cuales son los siguientes:

- Roble: de 300 a 350 Tons/m<sup>2</sup>
- Pino: de 200 a 250 Tons/m<sup>2</sup>
- Pino Alerce: de 150 a 200 Tons/m<sup>2</sup>

### **3.6 ALGORITMIA DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO**

**PASO N° 1:** Obtener los datos requeridos de la máquina,.

**PASO N° 2:** Obtener los datos de diseño y del suelo.

**PASO N° 3:** Calcular la velocidad de las partes que caen al inicio del impacto.

$$v = \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (W_0 + A \cdot p) \cdot h}{W_0}} \quad \left[ \frac{m}{s} \right]$$

**PASO N° 4:** Calcular de la relación de peso del yunke y de la armadura correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen.

$$n_a = \frac{W_a}{W_0}$$

**PASO N° 5:** Calcular de la relación de peso de la fundación correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen.

$$n_f = 8(1 + e)v - n_a$$

**PASO N° 6:** Calcular el peso requerido de la fundación.

$$W_f^* = n_f \cdot W_0 \quad [Tons]$$

**PASO N° 7:** Calcular la reducción del área de contacto de la fundación correspondiente a la unidad de peso real de las partes que caen.

$$a_f = \frac{20 \cdot (1 + e) \cdot v}{p_0} \quad \left[ \frac{m^2}{Tons} \right]$$

**PASO N° 8:** Calcular el área requerida de la fundación en contacto con el suelo.

$$A_f^* = a_f \cdot W_0 \quad [m^2]$$

**PASO N° 9:** Calcular el área de contacto de la fundación con el suelo y el peso de la fundación, sabiendo que el área es determinada por la longitud (largo y ancho) y el peso de la fundación por la siguiente expresión:

$$W_f = V_c \cdot \gamma_c + V_b \cdot \gamma_b \quad [Tons]$$

**PASO N° 10:** Calcular el coeficiente de rigidez del soporte bajo el yunke.

$$C_a = \frac{E}{b} \cdot A_2 \quad [Tons/m]$$

**PASO N° 11:** Calcular la masa del martillo.

$$m_a = \frac{W_a}{g} \quad [Tons \cdot s^2/m]$$

**PASO N° 12:** Calcular la frecuencia límite de vibraciones naturales del yunke sobre el soporte

$$f_{na}^2 = \frac{C_a}{m_a} \quad [s^{-2}].$$

**PASO N° 13:** Calcular el coeficiente de compresión elástica uniforme corregida.

$$C'_u = k \cdot C_u \quad [Tons/m^3]$$

**PASO N° 14:** Calcular el coeficiente de rigidez del suelo base bajo la fundación.

$$C_1 = C'_u \cdot A_f \left[ \frac{\text{Tons}}{m} \right]$$

**PASO N° 15:** Calcular la masa de la fundación

$$m_f = \frac{W_f}{g} \left[ \frac{\text{Tons} \cdot s^2}{m} \right].$$

**PASO N° 16:** Calcular la frecuencia límite de vibraciones naturales del sistema.

$$f_L^2 = \frac{C_1}{m_f + m_a} \left[ s^{-2} \right]$$

**PASO N° 17:** Calcular la relación entre la masa del martillo y la masa de la fundación junto con el relleno.

$$\mu = \frac{m_a}{m_f}$$

**PASO N° 18:** Calcular las frecuencias naturales del sistema martillo-fundación.

$$f_n^4 - (f_L^2 + f_{na}^2)(1 + \mu)f_n^2 + (1 + \mu)f_L^2 f_{na} = 0 \quad \left[ s^{-2} \right]$$

**PASO N° 19:** Calcular la masa real de las partes que caen.

$$m_0 = \frac{W_0}{g} \left[ \frac{\text{Tons} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \right]$$

**PASO N° 20:** Calcular la relación entre la masa del martillo y la masa real de las partes que caen.

$$\mu_a = \frac{m_a}{m_0}$$

**PASO N° 21:** Calcular la velocidad inicial del yunke.

$$v_a = \frac{1+e}{1+\mu_a} v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

**PASO N° 22:** Calcular la amplitud de vibración de la fundación.

$$Z_1 = - \frac{(f_{na}^2 - f_{n2}^2)(f_{na}^2 - f_{n1}^2)}{f_{na}^2 (f_{n1}^2 - f_{n2}^2) f_{n2}} v_a \cdot 1000 \quad [\text{mm}]$$

**PASO N° 23:** Calcular La amplitud de vibración del yunke.

$$Z_2 = - \frac{f_{na}^2 - f_{n1}^2}{(f_{n1}^2 - f_{n2}^2) f_{n2}} \cdot v_a \cdot 1000 \quad [\text{mm}]$$

**PASO N° 24:** Calcular el esfuerzo dinámico en la almohadilla bajo el yunke.

$$\sigma = \frac{C_a \cdot (Z_2 - Z_1)}{A_2} \left[ \frac{\text{Tons}}{\text{m}^2} \right]$$

### 3.7 EJEMPLO NUMERICO DE DISEÑO DE UNA FUNDACION PARA MAQUINAS DE IMPACTO

#### Datos de la máquina:

$W_n =$	2	Peso nominal de las partes que caen [Tons]
$W_0 =$	2,5	Peso real de las partes que caen [Tons]
$h =$	0,7	Altura de caída del mazo [m]
$A =$	0,11	Área del pistón [m <sup>2</sup> ]
$p =$	56	Presión de vapor [Tons/m <sup>2</sup> ]
$W_a =$	63	Peso de yunke y la armadura [Tons]
$A_2 =$	3.35	Área de la base del yunke [m <sup>2</sup> ]
$b =$	0,4	Espesor del soporte bajo el yunke [m]
$p_0 =$	20	Presión permisible del suelo [Tons/m <sup>2</sup> ]

#### Datos de diseño:

$g =$	9,81	Aceleración de gravedad [m/s <sup>2</sup> ]
$\eta =$	0,65	Coefficiente de contrapresión y fuerzas friccionales
$e =$	0,5	Coefficiente de restitución
$W_f =$	75	Peso de la fundación junto con el relleno [Tons]
$A_f =$	20	Área de contacto de la fundación con el suelo [m <sup>2</sup> ]
$E =$	50000	Módulo de elasticidad del soporte bajo el yunke [Tons/m <sup>2</sup> ]
$C_u =$	4000	Coefficiente de compresión elástica uniforme [Tons/m <sup>3</sup> ]
$K =$	3	Coefficiente de corrección

$\alpha = 0,4$  Coeficiente de reducción de capacidad de carga

### **Cálculos:**

#### **Velocidad de las partes que caen al inicio del impacto:**

$$v = \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (W_0 + A \cdot p) \cdot h}{W_0}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (2,5 + 0,11 \cdot 56) \cdot 0,7}{2,5}} = 4,48 \text{ m/s}$$

El valor del coeficiente de contrapresión es tomado como 0,65 debido a lo expuesto anteriormente en la metodología.

#### **Área de contacto de la fundación con el suelo:**

Primero calculamos el peso requerido de la fundación correspondiente a las partes que caen:

$$n_a = \frac{W_a}{W_0} = \frac{63}{2,5} = 25,2$$

Tomando como 0,5 el valor del coeficiente de restitución procedemos a calcular el valor del peso de la fundación correspondiente a la unidad de peso de las partes que caen:

$$n_f = 8(1 + e)v - n_a = 8 \cdot (1 + 0,5) \cdot 4,48 - 25,2 = 28,56$$

Una vez hallado este valor procedemos a calcular el peso requerido de la fundación.

$$W_f^* = n_f \cdot W_0 = 28,56 \cdot 2,5 = 71,4 \text{ Tons}$$

El peso de la fundación suministrado en los datos es mayor al peso requerido por lo cual el dimensionamiento de la fundación es correcto con respecto a esta variable.

Hallamos el área de contacto correspondiente a la unidad de peso de las partes que caen:

$$a_f = \frac{20 \cdot (1 + e) \cdot v}{p_0} = \frac{20 \cdot (1 + 0,5) \cdot 4,48}{20} = 6,72 \text{ m}^2/\text{Tons}$$

Con este valor procedemos a hallar el valor del área de contacto requerida de la fundación con el suelo:

$$A_f^* = a_f \cdot W_0 = 6,72 \cdot 2,5 = 16,80 \text{ m}^2$$

El área de contacto suministrada como dato es mayor al área de contacto requerida de la fundación con el suelo por lo tanto podemos continuar los cálculos.

### **Amplitud de vibraciones de la fundación:**

Calculamos el coeficiente de rigidez del soporte:

$$C_a = \frac{E}{b} \cdot A_2 = \frac{50000}{0,40} \cdot 3,35 = 418750 \text{ Tons}/\text{m}$$

La masa del martillo será igual a:

$$m_a = \frac{W_a}{g} = \frac{63}{9,81} = 6,42 \text{ Tons} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

Donde la frecuencia límite de vibraciones naturales del yunke sobre el soporte es:

$$f_{na}^2 = \frac{C_a}{m_a} = \frac{418750}{6,42} = 65225,86 \text{ s}^{-2}$$

Con el valor del coeficiente de compresión elástica y el coeficiente de corrección procedemos a calcular el coeficiente de compresión elástica uniforme corregida:

$$C'_u = k \cdot C_u = 3 \cdot 4000 = 12000 \text{ Tons/m}^3$$

Donde el coeficiente de rigidez del suelo base bajo la fundación será:

$$C_1 = C'_u \cdot A_f = 12000 \cdot 20 = 240000 \text{ Tons/m}$$

Y la masa de la fundación:

$$m_f = \frac{W_f}{g} = \frac{75}{9,81} = 7,65 \text{ Tons} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

Calculamos la frecuencia límite de vibraciones naturales del sistema:

$$f_L^2 = \frac{C_1}{m_f + m_a} = \frac{240000}{7,65 + 6,42} = 17057,57 \text{ s}^{-2}$$

Hallamos la relación entre la masa del martillo y la masa de la fundación junto con el relleno:

$$\mu = \frac{m_a}{m_f} = \frac{6,42}{7,65} = 0,84$$

Calculamos las frecuencias naturales del sistema martillo-fundación:

$$f_n^4 - (f_L^2 + f_{na}^2)(1 + \mu)f_n^2 + (1 + \mu)f_L^2 f_{na}^2 = 0$$

$$f_n^4 - (17057,57 + 65225,86)(1 + 0,84)f_n^2 + (1 + 0,84) \cdot 17057,57 \cdot 65225,86 = 0$$

$$f_n^4 - 151401,51f_n^2 + 2047174198 = 0$$

$$f_{n1}^2 = \frac{-(-151401,51) + \sqrt{151401,51^2 - 4 \cdot 1 \cdot 2047174198}}{2 \cdot 1} = 136392,02 \text{ s}^{-2}$$

$$f_{n1} = \sqrt{136392,02} = 369,31 \text{ s}^{-1}$$

$$f_{n2}^2 = \frac{-(-151401,51) - \sqrt{151401,51^2 - 4 \cdot 1 \cdot 2047174198}}{2 \cdot 1} = 15009,49 \text{ s}^{-2}$$

$$f_{n2} = \sqrt{15009,49} = 122,51 \text{ s}^{-1}$$

$$m_0 = \frac{W_0}{g} = \frac{2,5}{9,81} = 0,25 \text{ Tons} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$$

$$\mu_a = \frac{m_a}{m_0} = \frac{6,42}{0,25} = 25,68$$

Teniendo la velocidad de las partes que caen al inicio del impacto, el coeficiente de restitución y la relación de masas  $\mu_a$  podemos hallar la velocidad inicial del yunke:

$$v_a = \frac{1+e}{1+\mu_a} v = \frac{1+0,5}{1+25,68} 4,48 = 0,25 \text{ m/s}$$

La amplitud de vibración de la fundación es:

$$Z_1 = -\frac{(f_{na}^2 - f_{n2}^2)(f_{na}^2 - f_{n1}^2)}{f_{na}^2 (f_{n1}^2 - f_{n2}^2) f_{n2}} v_a \cdot 1000$$

$$Z_1 = -\frac{(65225,86 - 15009,49) \cdot (65225,86 - 136392,02)}{65225,86(136392,02 - 15009,49) \cdot 122,51} \cdot 0,25 \cdot 1000 = 0,9211 \text{ mm}$$

Podemos ver que la amplitud de vibración de la fundación esta ligeramente por debajo del rango de valores permisibles de 1,0 a 1,2mm.

La amplitud de vibración del yunke:

$$Z_2 = -\frac{f_{na}^2 - f_{n1}^2}{(f_{n1}^2 - f_{n2}^2) f_{n2}} \cdot v_a \cdot 1000 = -\frac{65225,86 - 136392,02}{(136392,02 - 15009,49) 122,51} \cdot 0,25 \cdot 1000$$

$$Z_2 = 1,1964 \text{ mm}$$

El esfuerzo dinámico en la almohadilla bajo el yunke será:

$$\sigma = \frac{C_a \cdot (Z_2 - Z_1)}{A_2} = \frac{418750 \cdot (1,1964 - 0,9211)}{3,35} = 34,4125 \text{ Tons/m}^2$$

Como se puede observar el valor es mucho menor que el valor permisible, esto quiere decir que el valor ligeramente menor del peso de la fundación no influye tanto en el diseño de la fundación.

## **CAPITULO IV**

### **FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS**

#### ***4.1 FUERZAS DINAMICAS***

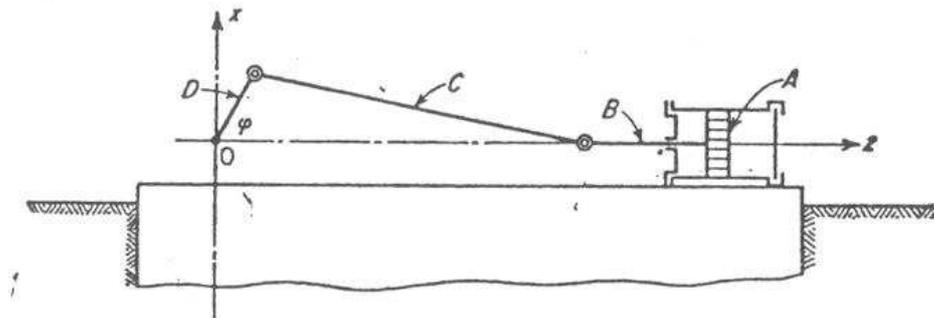
Las fuerzas dinámicas son las fuerzas que son producidas por la maquinaria durante su funcionamiento y son la fuente de vibraciones. La causa de estas cargas depende del tipo de máquina que las origina. Así, mientras que en las máquinas centrífugas su aparición se debe a excentricidades respecto al eje de giro, en las máquinas alternativas, o mejor conocidas como reciprocantes, estas cargas se deben al desplazamiento y rotación de las distintas partes en movimiento (pistones, bielas, manivelas, etc.). Por tanto se ha de conocer primero el origen de estas fuerzas para poder calcularlas en caso de que no sean facilitadas por el fabricante.

#### ***4.1.1 CALCULO DE CARGAS EN MAQUINAS RECIPROCANTES***

Las máquinas alternativas o reciprocantes son aquellas en las que el movimiento, debido generalmente a la expansión violenta de un gas, se logra mediante la combinación de émbolos, bielas y manivelas. El movimiento alternante, generalmente armónico simple, del émbolo, se transforma por la acción de la biela en un movimiento circular de la manivela. Generalmente son máquinas de baja velocidad. Entre los tipos de máquinas reciprocantes pueden mencionarse: máquinas de vapor, motores diesel y de gasolina, compresoras de émbolo, y bombas de émbolo.

Las vibraciones forzadas en máquinas de movimiento alternativo, son en su mayoría producidas por el desbalance de las fuerzas de inercia de las partes que constituyen el mecanismo.

En la figura 4.1 se ilustran las diversas partes de una máquina reciprocante.



**Figura 4.1. Partes principales de las máquinas reciprocantes. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

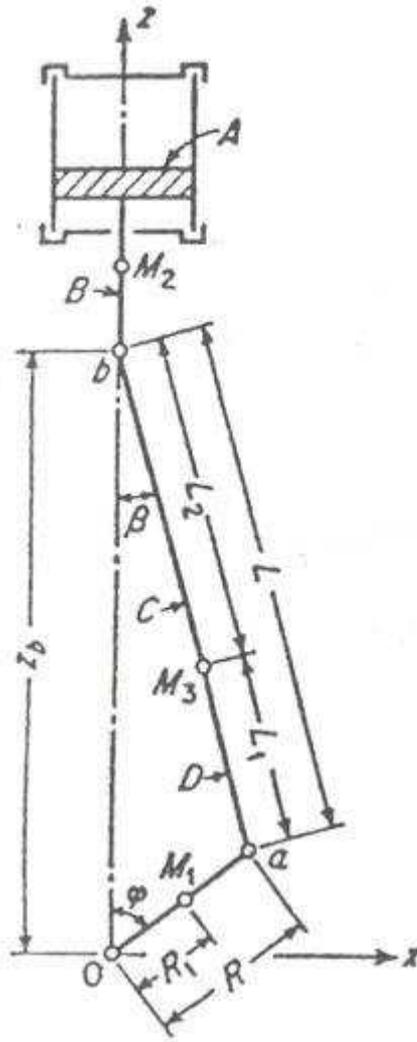
El pistón A y su barra acopladora B realizan un movimiento alternativo, la manivela D ejecuta un movimiento circular alrededor del eje que pasa por O, mientras que la biela C realiza un movimiento periódico bastante complicado, sus puntos describen elipses.

Cada una de las partes del mecanismo puede tener desbalance de sus fuerzas de inercia, produciendo en una forma independiente, vibraciones a la fundación.

De acuerdo a las leyes de la estática. Realizaremos una reducción de fuerzas al punto O, y ubicamos en este punto el origen del sistema de coordenadas X, Y, Z.

La fuerza inercial resultante del mecanismo será igual a la suma de las fuerzas inerciales de sus partes en movimiento: la manivela, la biela, el pistón y la barra conectora.

Para simplificar los cálculos concentraremos la masa del mecanismo no en tres puntos, sino en dos puntos. Esto simplifica las ecuaciones obtenidas para  $P_x, P_z$ .



**Figura 4.2. Máquina Recíproca. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Donde:

$R$  = Longitud de la manivela

$L$  = Longitud de la biela.

$M_1$  = Masa de la manivela

$M_2$  = Masa del pistón y la barra conectora

$M_3$  = Masa de la biela

$R_1$  = Longitud entre el centro de gravedad de la manivela y el eje de rotación 0.

$L_1$  = Longitud entre el centro de gravedad de la biela y la manivela

$L_2$  = Longitud entre el centro de gravedad de la biela y la barra conectora

En la Figura 4.2. Observamos las distancias y los puntos en donde estarán concentradas las masas del mecanismo. Al concentrar las masas en los puntos a y b, obtenemos:

$$M_a = M_{11} + M_{31} = \frac{R_1}{R} M_1 + \frac{L_2}{L} M_3 \quad (4.1)$$

$$M_b = M_2 + M_{32} = M_2 + \frac{L_1}{L} M_3 \quad (4.2)$$

Las proyecciones de las fuerzas de todo el mecanismo quedan de la siguiente manera, teniendo en cuenta que la velocidad de operación de la máquina es  $\omega$ :

$$P_x = R\omega^2 M_a \text{sen}\omega t \quad (4.3)$$

$$\alpha = \frac{R}{L} \quad (4.4)$$

$$P_z = R\omega^2 \left[ (M_a + M_b) \cos \omega t + \alpha M_B \left( 1 + \frac{\alpha^2}{4} \right) \cos 2\omega t - \frac{M_b \alpha^2}{4} \cos 4\omega t \right] \quad (4.5)$$

### 4.1.2 CALCULO DE CARGAS EN MAQUINAS RECIPROCANTES DE MULTIPLES CILINDROS

El método para determinar las cargas en máquinas que tengan cilindros múltiples, en principio es el mismo que para máquinas de un solo cilindro.

Cada mecanismo motor usualmente el número de cilindros no excede los diez. Las fuerzas inerciales son calculadas de manera similar para las máquinas horizontales y verticales.

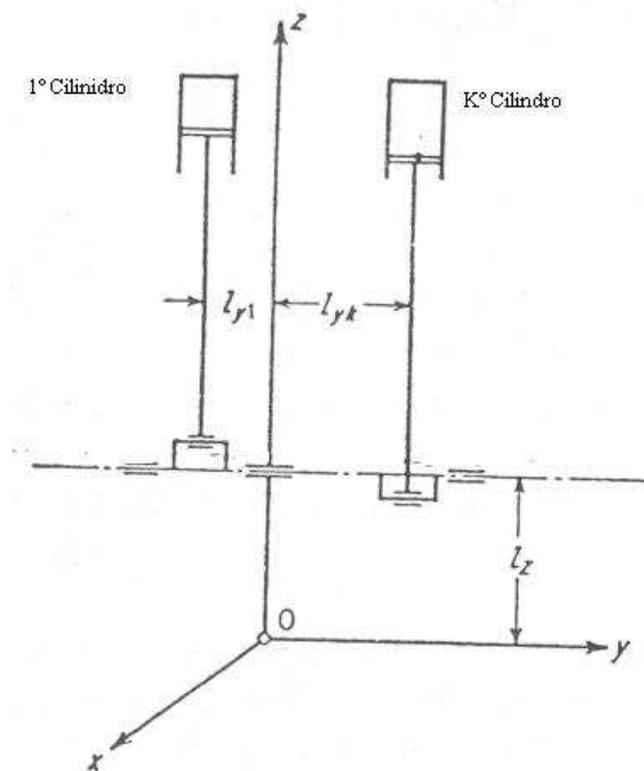


Figura 4.3. Máquina Multicilindro. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.

Donde:

$l_{y1}$  = Distancia desde el primer cilindro hasta el eje z

$l_{yk}$  = Distancia desde el cilindro “k” hasta el eje z

$l_z$  = Distancia entre el eje de rotación de la maquina y el eje y.

Colocamos el eje y en dirección al cigüeñal de la máquina, el eje x perpendicular a los cilindros y el eje z paralelo al recorrido de los pistones. Colocamos el origen en el centro de masas de la fundación y la máquina.

Denotamos con  $\beta_k$  el ángulo de la barra del cilindro  $k$  y la primera barra.

Las Cargas dinámicas para el cilindro  $k$  quedaran:

$$P_{xk} = R_k \omega^2 M_{ak} \text{sen}(\omega t + \beta_k) \quad (4.6)$$

$$P_{zk} = R_k \omega^2 [(M_{ak} + M_{bk}) \cos(\omega t + \beta_k) + M_{bk} \alpha_k \cos(\omega t + \beta_k)] \quad (4.7)$$

Los términos de las expresiones 4.8 y 4.9 son despreciados, para simplificar los cálculos, quedando:

$$M_{bk} \frac{\alpha_k^3}{4} \cos 2(\omega t + \beta_k) = 0 \quad (4.8)$$

$$M_{bk} \frac{\alpha_k^3}{4} \cos 4(\omega t + \beta_k) = 0 \quad (4.9)$$

Para obtener la carga resultante transmitida a la fundación por todos los cilindros, haremos la sumatoria de cargas de todos los cilindros:

$$P_x = \omega^2 \sum_{k=1}^n R_k M_{ak} \text{sen}(\omega t + \beta_k) \quad (4.10)$$

$$P_z = \omega^2 \sum_{k=1}^n R_k [(M_{ak} + M_{bk}) \cos(\omega t + \beta_k) + M_{bk} \alpha_k \cos 2(\omega t + \beta_k)] \quad (4.11)$$

Aparte de las fuerzas también tendremos momentos resultantes:

$$M_x = \sum_{k=1}^n P_{zk} l_{yk} \quad M_y = \sum_{k=1}^n P_{xk} l_{zk} \quad M_z = \sum_{k=1}^n P_{xk} l_{yk} \quad (4.12)$$

Si el mecanismo del cigüeñal y las barras es el mismo en todos los cilindros, las ecuaciones de las fuerzas se pueden simplificar.

$$P_x = \omega^2 M_a R \sum_{k=1}^n \text{sen}(\omega t + \beta_k) \quad (4.13)$$

$$P_z = \omega^2 R \left[ (M_a + M_b) \sum_{k=1}^n \cos(\omega t + \beta_k) + M_b \alpha \sum_{k=1}^n \cos 2(\omega t + \beta_k) \right] \quad (4.14)$$

Para los cálculos despreciaremos los armónicos y asumimos que los cilindros de la máquina son todos iguales, esto simplificara los cálculos en el modelo, para ello se igualan las siguientes expresiones a cero:

$$\sum_{k=1}^n \cos(\omega t + \beta_k) = 0$$

$$\sum_{k=1}^n l_{xk} \cos(\omega t + \beta_k) = 0$$

$$\sum_{k=1}^n \text{sen}(\omega t + \beta_k) = 0$$

$$\sum_{k=1}^n l_{zk} \text{sen}(\omega t + \beta_k) = 0$$

$$\sum_{k=1}^n \cos 2(\omega t + \beta_k) = 0$$

$$\sum_{k=1}^n l_{yk} \text{sen}(\omega t + \beta_k) = 0$$

Cuando la máquina tiene más de un cilindro pueden aparecer, según el caso, un momento de giro debido a la distinta orientación de las fuerzas en un instante

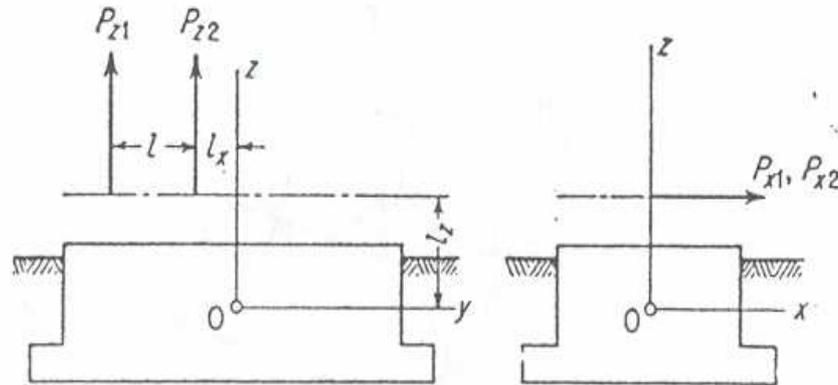
dato. Esta rotación se produce en torno a un eje que es perpendicular al desplazamiento del pistón y cigüeñal y su ubicación depende de la disposición de los cilindros. Como dicho momento es provocado por las fuerzas originadas por el desplazamiento del pistón, se tendrá un momento primario (provocado por las fuerzas primarias) y uno secundario (por las fuerzas secundarias). De la misma forma las fuerzas originadas por la rotación de la manivela también pueden generar un momento de giro cuyo eje tiene la misma dirección que el desplazamiento del pistón.

Estas fuerzas y momentos pueden ser equilibradas en parte o totalmente mediante un sistema de masas en movimiento tal que unido al sistema motor (mecanismo biela-manivela) origine fuerzas y momentos resultantes constantes en magnitud y sentido, o iguales a cero. Para equilibrar las fuerzas centrífugas de las masas en rotación basta con equilibrar el cigüeñal mediante contrapesos.

Evaluaremos las cargas y momentos generados por diferentes máquinas reciprocantes.

#### ***4.1.2.1 MAQUINAS DE DOS CILINDROS VERTICALES***

Suponemos que la máquina está montada asimétricamente en la fundación y ambos cilindros son idénticos. Con la disposición asimétrica de la máquina, debemos tener la distancia de separación de los cilindros con respecto al eje Z.



**Figura 4.4. Máquina recíproca de dos cilindros. Fuente: BARKAN, D.D. “Dynamics of bases and foundations”.**

Donde:

$l$  = Distancia entre los cilindros

$l_x$  = Distancia paralela al eje de giro, entre el primer cilindro y el eje vertical

$l_z$  = Distancia entre el eje de giro y el eje  $y$

$P_{x1}, P_{x2}$  = Componentes horizontales de la fuerza en dirección  $x$  de cada cilindro

$P_{z1}, P_{z2}$  = Componentes verticales de la fuerza en dirección  $z$  de cada cilindro

Según la disposición de los cilindros, tenemos varios tipos de máquinas. Evaluaremos el cálculo de cargas para cada una de ellas.

#### **4.1.2.1.1 CILINDROS EN LA MISMA DIRECCION**

Para este tipo de maquinas, el ángulo  $\beta$  de cada cilindro con respecto al primero cilindro será:

$$\beta_1 = 0 \quad \beta_2 = 0$$

Siguiendo los cálculos de las formulas estudiadas anteriormente, las componentes de las fuerzas y los momentos, que son generados por la maquina, quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 P_{x1} = P_{x2} &= R\omega^2 M_a \text{sen } \omega t & M_x &= P_{z1}(l + 2l_x) \\
 P_{z1} = P_{z2} &= R\omega^2 (M_a + M_b) \cos \omega t & M_y &= 2P_{x1}l_z \\
 P_x &= 2R\omega^2 M_a \text{sen } \omega t & M_z &= P_{x1}(l + 2l_x) \\
 P_z &= 2R\omega^2 (M_a + M_b) \cos \omega t
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

#### 4.1.2.1.2 CILINDROS CON ANGULO DE 90°

Estas maquinas tienen un ángulo de 90 grados entre sus cilindros, las fuerzas resultantes generadas por la maquina serán:

$$\begin{aligned}
 P_x &= R\omega^2 M_a (\text{sen } \omega t + \cos \omega t) = \sqrt{2}R\omega^2 M_a \text{sen} \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) \\
 P_z &= R\omega^2 (M_a + M_b) (\cos \omega t - \text{sen } \omega t) = \sqrt{2}R\omega^2 (M_a + M_b) \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Los momentos análogamente serán

$$M_x = P_{z1}(l + l_y) + P_{z2}l_y$$

$$M_y = (P_{x1} + P_{x2})l_z \quad (4.17)$$

$$M_z = P_{x1}(l + l_y) + P_{x2}l_y$$

$l_y$  = Distancia paralela al eje y, entre el primer cilindro y el eje vertical

#### **4.1.2.1.3 CILINDROS CON ANGULO DE 180°**

Los ángulos de los cilindros con respecto al primer cilindro son:

$$\beta_1 = 0 \quad \beta_2 = \pi$$

Debido a la posición de los pistones en estas maquinas, las fuerzas primarias se anulan. Dando como resultado que las componentes de las fuerzas serán igual a 0

$$P_x = 0 \quad P_z = 0$$

Y los momentos iguales a:

$$M_x = P_{z1}l \quad M_y = 0 \quad M_z = P_{x1}l \quad (4.18)$$

#### **4.1.2.2 MÁQUINA DE TRES CILINDROS VERTICALES**

Estas máquinas manejan los siguientes ángulos.

$$\beta_1 = 0^\circ \quad \beta_2 = 120^\circ \quad \beta_3 = 240^\circ$$

Y como

$$\cos 0 + \cos 120^\circ + \cos 240^\circ = 0$$

$$\text{sen} 0 + \text{sen} 120^\circ + \text{sen} 240^\circ = 0$$

Las componentes de las fuerzas quedan igualadas a 0

$$P_x = 0 \quad P_z = 0$$

Los momentos quedan:

$$M_x = P_{z1}(2l + l_y) + P_{z2}(l + l_y) + P_{z3}l_y$$

$$M_y = 0 \tag{4.19}$$

$$M_z = P_{x1}(2l + l_y) + P_{x2}(l + l_y) + P_{x3}l_y$$

### 4.1.2.3 MÁQUINA CUATRO CILINDROS

En estas máquinas los ángulos serán:

$$\beta_1 = 0^\circ \quad \beta_2 = 180^\circ \quad \beta_3 = 180^\circ \quad \beta_4 = 360^\circ$$

Con este arreglo, se tiene que las fuerzas de primer orden son nulas pues las fuerzas son idénticas y opuestas en todo momento por lo que se anulan. Lo mismo

ocurre con los momentos, por ser el cigüeñal totalmente simétrico respecto a su plano perpendicular medio.

#### 4.1.2.4 MÁQUINA SEIS CILINDROS

En estas máquinas el arreglo de los cilindros es el siguiente:

$$\beta_1 = 0 ; \beta_2 = \frac{2\pi}{3} ; \beta_3 = \frac{4\pi}{3} ; \beta_4 = \frac{4\pi}{3} ; \beta_5 = 2\pi ; \beta_6 = \frac{8\pi}{3}$$

Las fuerzas para este arreglo están balanceadas, y los momentos quedan expresados de la siguiente manera:

$$M_x = \sqrt{3}P_z l \quad M_y = 0 \quad M_z = \sqrt{3}P_x l \quad (4.20)$$

#### 4.1.3 CALCULO DE CARGAS EN MÁQUINAS ROTATIVAS

Las máquinas rotativas son aquellas en las que el desplazamiento de casi todas las partes móviles describe una trayectoria circular. El movimiento generalmente obedece a la ley de acción y reacción al desplazarse un fluido entre los álabes de una o más ruedas. En otros casos el movimiento se debe a la existencia de un conductor dentro de un campo magnético variable. Generalmente son máquinas de alta velocidad. Entre los tipos de máquinas rotativas pueden mencionarse las siguientes: turbogeneradores, bombas y compresores rotativos, y motores eléctricos.

Los compresores centrífugos y turbinas son máquinas que presentan, por muy perfecta que sea su fabricación y montaje, ciertas excentricidades respecto a su eje de giro. Estas excentricidades son las que al girar a una velocidad dada van

a provocar una fuerza centrífuga que será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad de giro y la excentricidad:

$$F = m_0 \cdot a = m_0 \cdot \omega^2 \cdot e \quad (4.21)$$

Donde:

$m_0$  = Masa del rotor [kg]

$\omega$  = Velocidad de angular del rotor [rad/s]

$e$  = Excentricidad dinámica [m]

Además, al girar la excentricidad con el rotor, la fuerza en una determinada dirección es de carácter armónico:

$$F = m_0 \cdot \omega^2 \cdot e \cdot \cos \omega t \quad (4.22)$$

La excentricidad dinámica a la velocidad de operación es la excentricidad que tiene el rotor durante su funcionamiento y difiere sensiblemente de la excentricidad estática (con la máquina parada). La primera depende de esta última en cuanto que es modificada. Esto es así ya que la fuerza centrífuga provoca sobre el eje del rotor una flexión que acentúa el valor de la excentricidad, aumentando así el valor de la fuerza generada. A velocidad constante se establece un equilibrio en el que la excentricidad y la fuerza centrífuga permanecen también constantes. Podemos establecer una relación entre las excentricidades a través de la formula, en donde  $e_0$  es la excentricidad estatica:

$$e = \frac{e_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \quad (4.23)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de operación de la máquina y  $\omega_c$  su frecuencia crítica.

El fabricante deberá suministrar como dato, bien la excentricidad estática (lo más normal) o la excentricidad dinámica. En caso de que se dé la primera, la segunda la podremos obtener mediante la ecuación anterior.

## **4.2 PARAMETROS DE DISEÑO**

### **4.2.1 INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA**

Las fundaciones cargadas dinámicamente inducen tensiones en el suelo, que en respuesta, obliga a la fundación a deformarse de forma acorde.

Por tanto se hace necesario adoptar un modelo que pueda predecir esta respuesta del suelo frente a las cargas dinámicas aplicadas, para permitir al diseñador incluir los efectos de la deformación del suelo en un análisis estructural global. Existen varios modelos que cumplen este objetivo, aunque sin duda el más utilizado es el “Modelo del Semiespacio Elástico”.

El modelo del semiespacio se basa en el comportamiento de una zapata rígida de base circular que descansa sobre la superficie de un semiespacio elástico de profundidad infinita, homogéneo e isotrópico y cuyas propiedades tensionales pueden ser definidas generalmente por dos constantes, el módulo de corte ( $G$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ). Según este modelo la disipación de la energía es debida fundamentalmente a la radiación y al amortiguamiento “geométrico”.

Las expresiones matemáticas obtenidas mediante este modelo indican que la rigidez del suelo y la cantidad de amortiguamiento producido no solo son función

de las características elásticas del semiespacio (suelo) sino que lo son también de la frecuencia de actuación de las cargas dinámicas. Dado que este inconveniente aparece en la mayoría de los algoritmos para el análisis estructural, se han desarrollado una serie de aproximaciones del modelo del semiespacio que permiten representar el suelo como una constante de rigidez lineal y una constante de amortiguamiento que simula el amortiguamiento viscoso, todo ello para cada modo de vibración. Estas dos constantes son independientes de la frecuencia de las cargas.

El modelo básico del semiespacio es válido únicamente para fundaciones aisladas, es decir, no es una teoría válida para obtener cálculos precisos de dos fundaciones que están situadas una al lado de la otra. Sin embargo, empíricamente se ha comprobado que la rigidez del suelo para zapatas individuales es generalmente disminuida por la presencia de otras fundaciones cercanas, y el amortiguamiento geométrico siempre disminuye.

#### ***4.2.2 CONSTANTE DE RESORTE***

La constante de resorte, también se le puede llamar constante de rigidez, es el parámetro más importante entre los utilizados en un sistema de un grado de libertad. Las expresiones para las constantes de resorte teóricas para los modos de vibración vertical, horizontal, rotaciones en los ejes horizontales y en eje vertical se dan en las expresiones (4.24) y (4.25). Aquí se presentan las fórmulas para el cálculo de la constante de resorte obtenidas mediante la teoría de elasticidad para fundaciones circulares y rectangulares apoyadas en la superficie de un semiespacio elástico. Estas formulas son desarrolladas por Suresh (1979) en el libro “Desing of Structures and Foundations for Vibrating Machines”

Para las Zapatas Rectangulares tenemos las siguientes formulas para cada modo de vibración:

$$\begin{aligned}
 \text{Vertical:} \quad K_z &= \frac{G \cdot \beta_z \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot N_z}{1 - \nu} \\
 \text{Horizontal:} \quad K_x &= 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \cdot \beta_x \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot N_x \\
 \text{Rotación Horizontal:} \quad K_\psi &= \frac{G \cdot \beta_\psi \cdot (B \cdot L)^2 \cdot N_\psi}{1 - \nu}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

En donde:

$B$  = Ancho del área de la fundación que esta en contacto con el suelo

$L$  = Longitud del área de la fundación que esta en contacto con el suelo

Para la rotación vertical no hay ecuaciones para zapatas rectangulares, usaremos la formula de radio equivalente para zapatas circulares.

Para las Zapatas circulares tenemos las siguientes formulas para cada modo de vibración:

$$\begin{aligned}
 \text{Vertical} \quad K_z &= \frac{4 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0 \cdot N_z}{1 - \nu} \\
 \text{Horizontal} \quad K_x &= \frac{32 \cdot (1 - \nu) \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0 \cdot N_h}{7 - 8 \cdot \nu} \\
 \text{Rotación Horizontal} \quad K_\psi &= \frac{8 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0^3 \cdot N_\psi}{3 \cdot (1 - \nu)}
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Rotación Vertical 
$$K_{\theta} = \frac{16 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0^3}{3}$$

Para zapatas rectangulares, los valores de  $\beta$  se obtendrá con la Figura 4.5

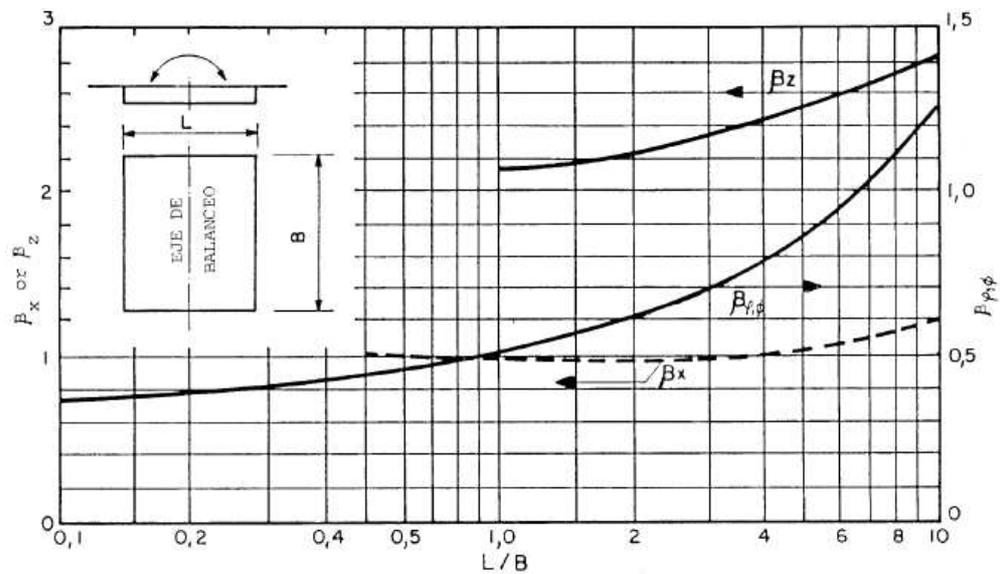


Figura 4.5. Grafica de los valores  $\beta$ . Fuente: SURESH. “Desing of Structures and Foundations for Vibrating Machines”

Estas fórmulas son aplicables en fundaciones colocadas a poca profundidad. La profundidad de enterramiento de la fundación incrementa la frecuencia natural, pero este cambio no es significativo hasta que la profundidad es similar al ancho de la base.

En cuanto al valor del radio equivalente  $r_0$  que relaciona una fundación circular de radio  $r_0$  con una fundación rectangular equivalente de dimensiones  $B$  por  $L$  y al coeficiente de enterramiento se dispone para su calculo de las formulas (4.26) y (4.27).

Los valores para radios equivalentes en los diferentes modos de vibración, serán calculados por las formulas:

$$\begin{aligned}
 \text{Vertical} \quad r_0 &= \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}} \\
 \text{Horizontal} \quad r_0 &= \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}} \\
 \text{Rotación horizontal} \quad r_0 &= \sqrt[4]{\frac{L \cdot B^3}{3 \cdot \pi}} \\
 \text{Rotación vertical} \quad r_0 &= \sqrt[4]{\frac{B \cdot L(B^2 + L^2)}{6 \cdot \pi}}
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

Los efectos de enterramiento pueden perderse parcialmente después de un tiempo, por lo que los diferentes autores, consideran el tomar un valor reducido a 2/3 de la profundidad de enterramiento real, para compensar esta pérdida. En la metodología tomaremos en cuenta ese factor de corrección. La dimensión  $L$  siempre debe ser perpendicular al eje de rotación.

Para calcular los coeficientes de enterramiento, para los diferentes modos de vibración:

$$\begin{aligned}
 \text{Vertical} \quad N_z &= \frac{1 + 0,61(1 - \nu) \cdot h}{r_0} \\
 \text{Horizontal} \quad N_h &= \frac{1 + 0,55(2 - \nu) \cdot h}{r_0}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad N_{\psi} = 1 + 1,2(1 - \nu) \cdot \frac{h}{r_0} + 0,2(2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)^3$$

$h$  = Profundidad de enterramiento

Para el modo de Rotación vertical, no existen formulas para determinar el factor de enterramiento

Generalmente la profundidad de enterramiento de la fundación incrementa la frecuencia natural, pero este cambio no es significativo hasta que la profundidad sea similar al ancho de la base.

Como en la mayoría de los cálculos se utiliza  $r_0$ , este parámetro puede utilizarse también para obtener los valores de la constante de resorte para zapatas rectangulares.

### **4.2.3 AMORTIGUAMIENTO**

El amortiguamiento en un sistema suelo-fundación consta de un componente geométrico (el que se obtiene mediante este modelo), el cual muestra la medida de la energía radiada fuera de la región de la fundación y uno material (el del suelo), que revela la medida de la energía perdida como resultado de los efectos de histéresis. Al primero se le conoce como “relación de amortiguamiento geométrico” y al segundo como relación de amortiguamiento interno (propio del suelo).

El amortiguador de un sistema de un grado de libertad representa la capacidad de amortiguamiento del suelo en el sistema suelo-fundación. Para el caso de suelos no cohesivos secos o relativamente secos, la pérdida de energía es

debida a la fricción entre las partículas minerales del suelo. En caso de suelos saturados o húmedos, la pérdida de energía es causada por el movimiento relativo entre la matriz del suelo y el fluido intersticial.

Las relaciones de amortiguamiento geométrico pueden ser calculadas a partir de las relaciones de masa o de inercia tal. A continuación se presentan las formulas para calcular las relaciones de masa, para cada uno de los modos de vibración:

$$\begin{aligned}
 \text{Vertical} \quad B_z &= \frac{(1-\nu)}{4} \cdot \frac{W_t}{\gamma \cdot r_0^3} \\
 \text{Horizontal} \quad B_h &= \frac{(7-8\nu)}{(32 \cdot (1-\nu))} \cdot \frac{W_t}{\gamma \cdot r_0^3} \\
 \text{Rotación horizontal} \quad B_\psi &= \frac{3 \cdot (1-\nu)}{8} \cdot \frac{I_\psi}{\rho \cdot r_0^5} \\
 \text{Rotación vertical} \quad B_\theta &= \frac{I_\theta}{\rho \cdot r_0^5}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

$W_t =$  Peso del sistema Fundación + Máquina

$I =$  Momento de Inercia

$\rho =$  Densidad del suelo

Las fórmulas para calcular las relaciones de amortiguamiento geométrico, para los diferentes modos de vibración son las siguientes:

$$\text{Vertical} \quad D_z = \frac{0,425 \cdot \alpha_z}{\sqrt{B_z}}$$

$$\text{Horizontal} \quad D_h = \frac{0,288 \cdot \alpha_h}{\sqrt{B_h}} \quad (4.29)$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad D_\psi = \frac{0,15 \cdot \alpha_\psi}{(1 + N_\psi \cdot B_\psi) \sqrt{N_\psi \cdot B_\psi}}$$

$$\text{Rotación vertical} \quad D_\theta = \frac{0,5}{1 + 2 \cdot B_\theta}$$

En estas ecuaciones el efecto del enterramiento queda reflejado en los factores  $\alpha$  y  $N$ . Los factores  $\alpha$  son coeficientes de la relación de amortiguamiento para considerar el incremento que experimenta el amortiguamiento geométrico debido al enterramiento efectivo.

Las formulas para calcular los coeficientes de la relación de amortiguamiento, para cada uno de sus modos de vibración son las siguientes:

$$\text{Vertical} \quad \alpha_z = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)\right)}{\sqrt{N_z}}$$

$$\text{Horizontal} \quad \alpha_h = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)\right)}{\sqrt{N_h}} \quad (4.30)$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad \alpha_\psi = \frac{\left(1 + 0,7 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right) + 0,6 \cdot (2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)^3\right)}{\sqrt{N_\psi}}$$

Para estas formulas también utilizaremos un valor conservador de la profundidad de enterramiento, siendo este  $2/3$  de la real

Según Richart (1970) se puede asumir un valor de 0,05 para la relación de amortiguamiento interno, el cual se sumará al valor de amortiguamiento geométrico. Además, indica que haciendo comparación entre los valores de amortiguamiento geométrico e interno, el primero es mucho mayor que el segundo, para vibraciones horizontales y verticales. Por lo tanto, para estos tipos de vibración podría no considerarse el amortiguamiento interno.

Para vibraciones torsionales y de balanceo, los valores de amortiguamiento geométrico son usualmente bajos, y similares a los de amortiguamiento interno. En estos casos, se sumará un valor de amortiguamiento interno de 0,05 ( $D_i = 0,05$ ) al de amortiguamiento geométrico.

De la siguiente tabla se pueden obtener en todo caso valores aproximados de la relación de amortiguamiento interno.

Tipo de suelo	$D_i$
Arena y grava secas	0,03 a 0,07
Arena seca y saturada	0,01 a 0,03
Arena seca	0,03
Arenas y gravas secas y saturadas	0,05 a 0,06
Arcillas	0,02 a 0,05
Arena sedimentada	0,03 a 0,1

**Tabla 4.1. Valores típicos de amortiguamiento interno. Fuente: RICHART, F.E “Vibrations of soils and foundations”.**

### ***4.3 METODOLOGIA PARA ANALIZAR FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y MAQUINAS ROTATIVAS***

Considerando la teoría previamente expuesta, y las técnicas actuales para diseñar y analizar fundaciones de máquinas reciprocantes, desarrollaremos una metodología, la cual tomará en cuenta los parámetros principales que actúan en la fundación así como los modelos matemáticos existentes, para poder predecir la amplitud, fuerzas transmitidas y posibles estados de resonancia de la fundación.

Con objeto de analizar una fundación sometida a vibraciones, se puede establecer la analogía más simple representada por un sistema de un grado de libertad que consta de un elemento de masa, un resorte y un amortiguador.

Conociendo la masa, la constante de resorte y la relación de amortiguamiento, la respuesta del sistema puede determinarse para cualquier tipo de sollicitación dinámica. Aunque este es un sistema relativamente simple de analizar, el problema principal radica en la determinación de valores confiables para estos parámetros: masa, constante de resorte y relación de amortiguamiento.

Como consecuencia del trabajo de un investigador alemán de nombre Reissner y otros investigadores, la evaluación de estos parámetros se ha hecho más confiable debido al uso de la “Teoría del Semi-espacio Elástico”. Esta teoría, desarrollada por Reissner, considera al sistema como un oscilador de disco rígido soportado por un cuerpo elástico, isotrópico, homogéneo y semi-infinito.

A partir del trabajo de Reissner, otros investigadores demostraron que esa teoría conducía a soluciones que permitían representar el sistema dinámico como un sistema masa-resorte-amortiguador de un solo grado de libertad. Los resultados de programas extensivos de ensayos de campo realizados en modelos

de fundaciones, han demostrado que existe bastante concordancia entre los resultados experimentales y teóricos de respuesta a vibraciones.

#### ***4.3.1 INFORMACION REQUERIDA PARA EL ANALISIS***

La información suministrada por el fabricante de la máquina es la básica que se necesita para el diseño de la fundación, esa información junto los datos del suelo de la fundación y las cargas externas. Obtendremos los siguientes datos:

##### ***CARACTERISTICAS DEL EQUIPO***

- La velocidad normal y la potencia de la máquina.
- Tipo, magnitud y punto de aplicación de las cargas dinámicas las cuales se generan en el proceso de operación de la máquina.
- La distribución de las cargas estáticas creadas por la máquina sobre la superficie de la fundación.
- El tamaño y la forma del soporte de la máquina.
- La localización de aberturas y alojamientos en la fundación, creadas por pernos, anclajes, tornillos, tuberías, etc.
- Peso de la máquina y su equipamiento.
- Las cargas dinámicas que se crean en el proceso de operación de la máquina.

##### ***CARACTERISTICAS DEL SUELO***

- Densidad
  
- Coeficiente de Poisson
- Módulo de corte
  
- Profundidad de la cimentación

#### *REQUERIMIENTOS AMBIENTALES*

- Emisión de vibración: Importante en hospitales, laboratorios de precisión, edificios históricos, etc. . .

- Recepción de vibración: Importante por: tráfico, obras, líneas de ferrocarril, o la cercanía a otro equipo.

#### **4.3.2 CALCULO DE CARGAS EN LA FUNDACION**

Para máquinas reciprocantes y máquinas rotativas, el fabricante en las especificaciones de la máquina, nos suministrara las cargas que genera la máquina, en caso de no tener esa información, podemos calcular la cargas a las cuales está sometida la fundación, con las formulas presentadas en la parte 4.1.

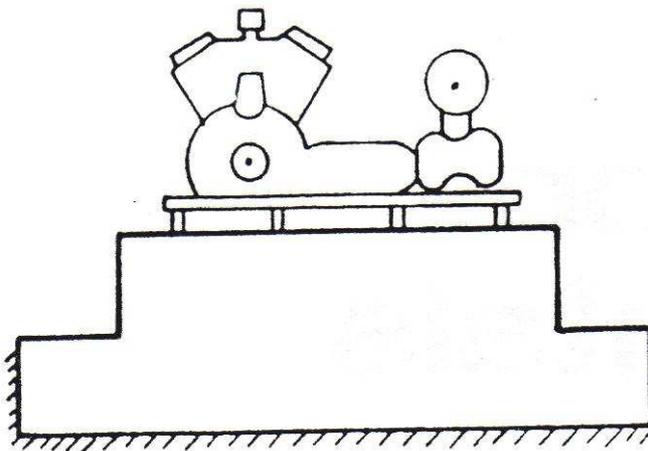
Luego de obtener las cargas generadas por la máquina, tenemos que trasladar las cargas al centro de gravedad del sistema, estas cargas y momentos resultantes serán los utilizados en la metodología para determinar las amplitudes de la fundación.

### 4.3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA FUNDACION

Las fundaciones para las máquinas reciprocantes y máquinas rotativas, son usualmente grandes bloques con ranuras y canales, la ubicación de estos, dependerá de los pernos de anclaje y detalles de la maquinaria.

La condición principal al momento de dimensionar una fundación es la siguiente: La mínima dimensión en la fundación tal que las amplitudes y las vibraciones no excedan los valores permisibles.

La fundación consiste de un pedestal de concreto y una zapata (Figura 4.6). Las dimensiones mínimas del pedestal, son dadas usualmente por el fabricante de la máquina; sin embargo, en caso de que esta información no esté disponible, el pedestal deberá sobresalir un mínimo de 38 *mm* con respecto a la base del compresor y deberá cumplir con la distancia requerida entre los pernos de anclaje y el borde del pedestal.



**Figura 4.6. Corte transversal de una fundación para máquinas reciprocantes y rotativas . Fuente: SURESH, C.A. “Desing of Structures and Foundations for Vibrating Machines”**

El ancho de la zapata o la dimensión perpendicular al eje del compresor, será como mínimo 1–1/2 veces la distancia medida desde el eje del compresor al

fondo de la fundación. La longitud de la zapata o dimensión paralela al eje, será aproximadamente de 610 *mm* mayor que la longitud del pedestal.

El espesor de la zapata será el adecuado para garantizar una fundación rígida. Para cumplir con este requisito, el espesor mínimo de la zapata será igual a dos tercios de la distancia entre el borde del pedestal y el borde de la zapata y nunca menor que 457 *mm*. En la mayoría de los casos, el compresor y el motor se colocan en un pedestal común. En caso de que se usen pedestales separados, puede ser necesario incrementar el espesor de la zapata para asegurar una rigidez adecuada entre ambos pedestales. Estas medidas son sugeridas por la normativa actual de PDVSA (Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima), numero 90615.1.002 para la construcción de fundaciones para maquinas.

Cuando se instalen dos o más maquinarias a poca separación entre ellas, como en el caso típico de un edificio para compresores, los pedestales de concreto en los compresores podrán apoyarse en una placa común. En este caso, se asumirá un ancho y largo efectivo de la zapata para cada compresor a fin de determinar el espesor adecuado de la placa de apoyo y así realizar el análisis dinámico.

La frecuencia natural de la fundación está afectada por el valor absoluto de la masa de la fundación y su distribución en el espacio. Procuraremos distribuir la masa, para obtener el menor momento de inercia posible. Para cumplir este requisito el peso escogido debe ser mínimo.

#### ***4.3.4 PROPIEDADES DEL SUELO***

De la revisión de las ecuaciones para la constante de resorte y relación de amortiguamiento, para cualquier modo particular de vibración, se observa que se requiere determinar dos propiedades del suelo, como son: Relación de Poisson

( $\nu$ ) y módulo de corte ( $G$ ). Estas propiedades deberán ser determinadas por un estudio geotécnico previo al análisis de la fundación.

Cuando no se disponga de un informe geotécnico completo del sitio considerado y para efectos del diseño preliminar, “ $\nu$ ” y “ $G$ ” pueden ser estimados con cierta precisión. Generalmente, se ha determinado que la relación de Poisson varía entre 0,25 a 0,35 para suelos no cohesivos y entre 0,35 a 0,45 para suelos cohesivos. Por lo tanto y para efectos de diseño, pueden asumirse sin mucho error, valores de 0,30 y 0,40 de la relación de Poisson para suelos no cohesivos y cohesivos, respectivamente.

Los valores de “ $G$ ” pueden obtenerse a partir de ensayos de laboratorio, considerando que este parámetro varía con la presión de confinamiento. De la Tabla 4.2 podremos seleccionar valores aproximados del modulo de corte para distintos suelos.

Tipo de Suelo	Modulo de Corte Kg/cm2
Granito	307.944,48 - 381.766,79
Piedra Caliza	172.955,12 - 318.490,53
Piedra Arenisca	113.194,21 - 240.449,80
Arena Compacta	760,72 - 1.318,26
Arena medio compactada	568,78 - 1.000,47
Arena sin compactar	381,77 - 745,96
Arcilla Dura	748,07 - 1.018,75
Arcilla Medio Dura	487,93 - 748,07
Arcilla Blanda	239,04 - 487,93

**Tabla 4.2. Distintos valores de el modulo de corte  $G$  para diferentes tipos de suelos.**

**Fuente: KRAMER, S.L. “Geotechnical Earthquake Engineering”.**

### ***4.3.5 MATERIALES DE LA FUNDACION***

La cuestión a la hora de seleccionar el material de la fundación viene dado por los costos y la disponibilidad del mismo en el sitio. El material más utilizado, sin duda, es el concreto armado, que es capaz de soportar y transmitir toda clase de esfuerzos satisfactoriamente y además, tiene la densidad suficiente para poder hacer que la cimentación tenga gran masa y así poder reducir las vibraciones que producen las máquinas.

Se emplean otros materiales en menor cuantía, aunque no menos importantes, como son cementos epóxicos, el corcho aglomerado, el caucho y otros materiales elásticos, que juegan siempre el papel de amortiguadores.

### ***4.3.6 CALCULO DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO***

Después de obtener toda la información requerida para el análisis, calcularemos los parámetros de diseño, vistos en la sección 4.2. De estos modelos obtendremos los parámetros: Radio equivalente, Constante de resorte, Relación de masas, Factor de embutimiento, Relación de amortiguamiento geométrico y Relación de amortiguamiento interno.

### ***4.3.7 ANALISIS DINAMICO DE LA FUNDACION***

Luego de calcular los parámetros de diseño, procedemos a realizar el análisis dinámico de la fundación. Los factores a calcular en este análisis dinámico son:

### 4.3.7.1 FRECUENCIA NATURAL

Para el cálculo de la frecuencia natural usaremos las formulas:

Para traslación en los ejes X, Y, Z:

$$f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4.31)$$

Para Rotación en los ejes X, Y, Z

$$f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (4.32)$$

Para la rotación se cambia la masa  $m$  por el momento de inercia  $I$  con respecto al eje.

### 4.3.7.2 FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICA

Se define como la relación de la amplitud dinámica de la masa a una frecuencia dada y la amplitud que se obtendría si la fuerza dinámica se supusiera estática y cuya expresión responde a la ecuación

$$M = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{f_n} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot D \cdot \left( \frac{\omega}{f_n} \right) \right]^2} \right]^{1/2} \quad (4.33)$$

$M$  = Factor de amplificación dinámica

$\omega$  = Frecuencia de operación de la máquina

$D$  = Amortiguamiento total

### 4.3.7.3 FACTOR DE TRANSMISIBILIDAD

Para finalizar, se debe calcular la fuerza y momento transmitidos al terreno con el fin de determinar los asentamientos sobre éste. Las fuerzas y momentos que se transmiten no son las correspondientes a las máquinas directamente, sino las modificadas por el Factor de Transmisibilidad  $T_r$ , que se define como la relación de la fuerza o momento realmente transmitido y la fuerza o momento generado por la máquina, se calculan mediante la ecuación:

$$T_r = M \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot D \cdot \left( \frac{\omega}{f_n} \right) \right]^2} \quad (4.34)$$

$M$  = Factor de amplificación dinámica

El factor de transmisibilidad se calcula para las fuerzas en dirección X, Y, Z y los momentos en dirección X, Y, Z.

### 4.3.7.4 FRECUENCIA DE RESONANCIA

La frecuencia de resonancia es aquella a la cual se produce la máxima amplitud, se calcula mediante la ecuación:

$$f_r = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2 \cdot D^2}} \quad (4.33)$$

### 4.3.8 AMPLITUDES DE LA FUNDACION

El cálculo de las amplitudes de la fundación se realiza con las siguientes ecuaciones:

Para Traslación:

$$A = \frac{M \cdot F}{K} \quad (4.34)$$

$F$  = Carga sobre el centro de gravedad del sistema

Para Rotación:

$$A = \frac{M \cdot M_0}{K} \quad (4.35)$$

$M_0$  = Momento actuante en la fundación

Mientras mayor sea el valor de la amplitud de las vibraciones en la fundación, existirá mas peligro para las estructuras cercanas. Además si la amplitud de la vibración permanece en el tiempo, la fundación puede perder su estabilidad y someterse a un cimiento no uniforme, poniendo en peligro el trabajo normal de la máquina. Finalmente las amplitudes que se mantienen en el tiempo pueden llevar a la destrucción de la fundación y dañar la máquina.

En general, no es posible establecer un máximo absoluto para las amplitudes de vibración. En primer lugar, los niveles tolerables de amplitudes disminuyen cuando la velocidad de la máquina aumenta; en segundo lugar, la tolerancia a las amplitudes disminuye cuando la máquina vibratoria está en una edificación para compresores o cercano a personas, que cuando la máquina está ubicada en una zona aislada. La Figura 4.7 muestra los niveles de tolerancia humana y de la maquinaria a vibraciones, los cuales ayudan a determinar la amplitud permisible para varios modos de vibración.

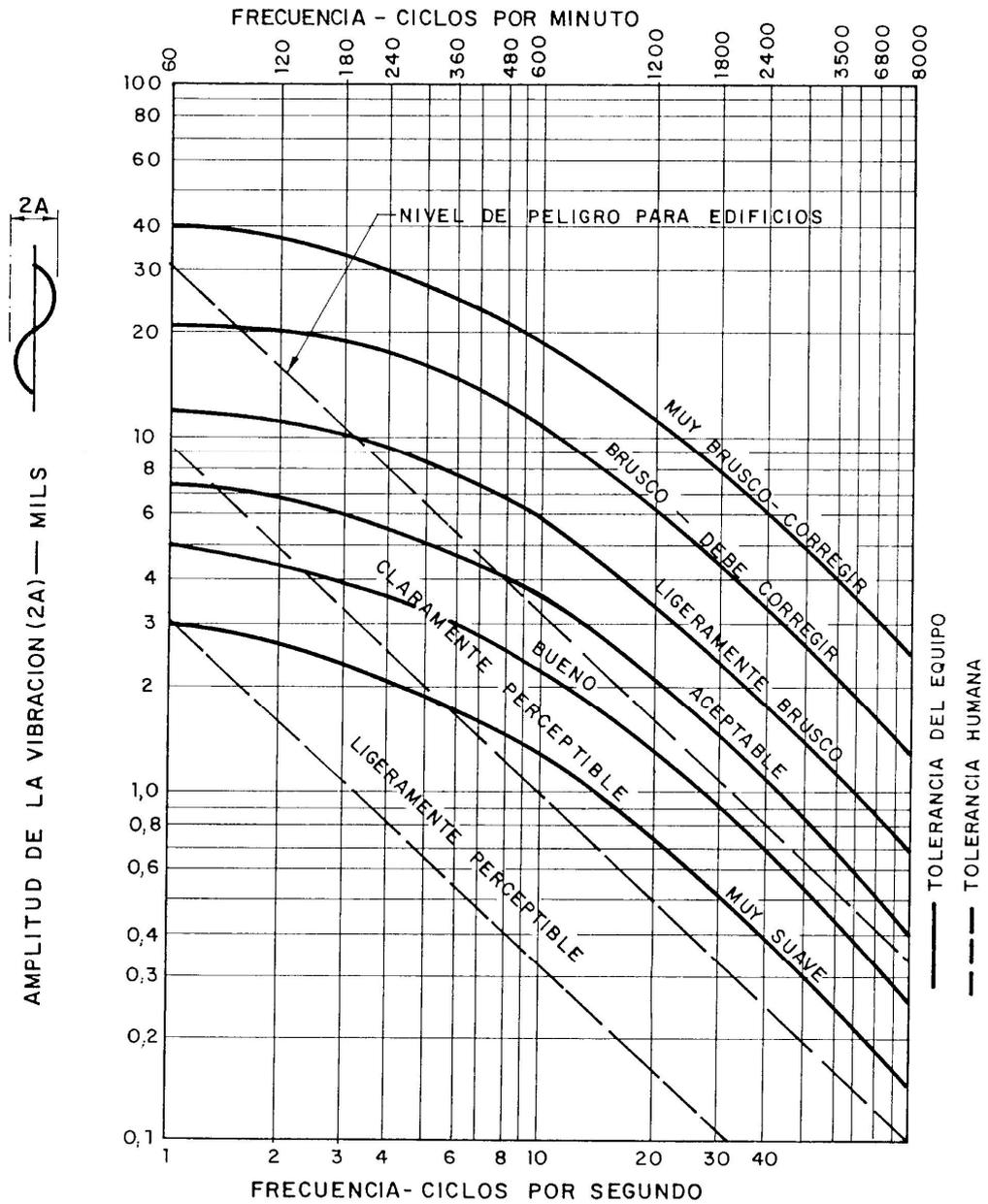


Figura 4.7. Grafica de demandas medio ambientales. Fuente: PDVSA. Manual de Ingeniería de Diseño - “Fundaciones para Compresores Reciprocantes”.

Es muy importante indicar, que todas las ecuaciones presentadas anteriormente, para el cálculo de las amplitudes de vibración dan como resultado valores sencillos de amplitudes. Sin embargo, la mayoría de los instrumentos de

medición de campo son usados para medir valores reales de amplitudes, dobles o “pico a pico”. Por esta razón, la Figura 4.7 da valores de amplitudes “pico a pico”; en consecuencia antes de usar dicho gráfico, se deberá duplicar el valor calculado de la amplitud.

### 4.3.9 ESTUDIO DE RESONANCIA

Para un sistema no amortiguado, si la frecuencia natural coincide con la frecuencia de operación, la amplitud teórica es infinita. Cuando existe amortiguamiento, la amplitud de vibración es finita, pero puede ser excesiva y por tanto inaceptable. Como se muestra en la Figura 4.8

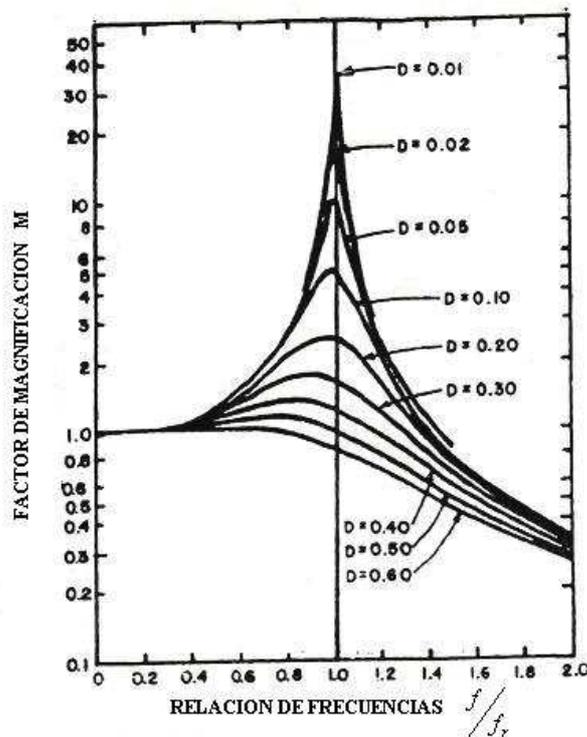


Figura 4.8. Gráfica relación de frecuencia vs Factor de magnificación. Fuente: SURESH C. “Foundation design for reciprocating compressors”

De manera de evitar esta zona de altas amplitudes (resonancia), la relación de frecuencias  $f/f_r$  (frecuencia de operación contra frecuencia de resonancia) deberá estar preferiblemente fuera del rango de valores de amortiguamiento entre 0,7 y 1,4, a fin de evitar que esta consideración sea crítica.

Los modos traslacionales de vibración (movimiento perpendicular a los ejes x,y,z), usualmente presentan valores altos de amortiguamiento, por lo que en este caso esta consideración no es crítica; sin embargo, para los modos rotacionales de vibración (rotación en los ejes x,y,z), los cuales se caracterizan por valores más bajos de amortiguamiento, es muy importante mantener la relación de frecuencias fuera del rango de resonancia.

#### ***4.4 ALGORITMIA DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS***

**PASO N° 1:** Obtener los datos requeridos de la maquina, fundacion y suelo para el analisis

**PASO N°2:** Determinar el centro de gravedad del sistema Fundacion y maquina.

**PASO N°3:** Determinar cargas actuantes en la fundacion.

**PASO N°4:** Caclcula radios equivalentes para los modos de vibracion:

$$\text{Vertical} \quad r_0 = \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}}$$

$$\text{Horizontal} \quad r_0 = \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}}$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad r_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot B^3}{3 \cdot \pi}}$$

$$\text{Rotación vertical} \quad r_0 = \sqrt[4]{\frac{B \cdot L(B^2 + L^2)}{6 \cdot \pi}}$$

**PASO N°5:** Calcular coeficientes de enterramiento:

$$\text{Vertical} \quad N_z = \frac{1 + 0,61(1 - \nu) \cdot h}{r_0}$$

$$\text{Horizontal} \quad N_h = \frac{1 + 0,55(2 - \nu) \cdot h}{r_0}$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad N_\psi = 1 + 1,2(1 - \nu) \cdot \frac{h}{r_0} + 0,2(2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)^3$$

**PASO N°6:** Calcular Constante de resorte:

Para las Zapatas Rectangulares:

$$\text{Vertical:} \quad K_z = \frac{G \cdot \beta_z \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot N_z}{1 - \nu}$$

$$\text{Horizontal:} \quad K_x = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \cdot \beta_x \cdot \sqrt{B \cdot L} \cdot N_x$$

$$\text{Rotación Horizontal:} \quad K_\psi = \frac{G \cdot \beta_\psi \cdot (B \cdot L)^2 \cdot N_\psi}{1 - \nu}$$

Para las Zapatas circulares:

$$\text{Vertical} \quad K_z = \frac{4 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0 \cdot N_z}{1 - \nu}$$

$$\text{Horizontal} \quad K_x = \frac{32 \cdot (1 - \nu) \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0 \cdot N_h}{7 - 8 \cdot \nu}$$

$$\text{Rotación Horizontal} \quad K_\psi = \frac{8 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0^3 \cdot N_\psi}{3 \cdot (1 - \nu)}$$

$$\text{Rotación Vertical} \quad K_\theta = \frac{16 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_0^3}{3}$$

**PASO N°7:** Calcular las relaciones de Masa:

$$\text{Vertical} \quad B_z = \frac{(1 - \nu)}{4} \cdot \frac{W_t}{\gamma \cdot r_0^3}$$

$$\text{Horizontal} \quad B_h = \frac{(7 - 8\nu)}{(32 \cdot (1 - \nu))} \cdot \frac{W_t}{\gamma \cdot r_0^3}$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad B_\psi = \frac{3 \cdot (1 - \nu)}{8} \cdot \frac{I_\psi}{\rho \cdot r_0^5}$$

$$\text{Rotación vertical} \quad B_\theta = \frac{I_\theta}{\rho \cdot r_0^5}$$

**PASO N°8:** Calcular coeficientes de relacion de amortiguamiento:

$$\text{Vertical} \quad \alpha_z = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)\right)}{\sqrt{N_z}}$$

$$\text{Horizontal} \quad \alpha_h = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)\right)}{\sqrt{N_h}}$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad \alpha_\psi = \frac{\left(1 + 0,7 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right) + 0,6 \cdot (2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)^3\right)}{\sqrt{N_\psi}}$$

**PASO N°9:** Calcular relacion de amortiguamiento geometrico:

$$\text{Vertical} \quad D_z = \frac{0,425 \cdot \alpha_z}{\sqrt{B_z}}$$

$$\text{Horizontal} \quad D_h = \frac{0,288 \cdot \alpha_h}{\sqrt{B_h}}$$

$$\text{Rotación horizontal} \quad D_\psi = \frac{0,15 \cdot \alpha_\psi}{\left(1 + N_\psi \cdot B_\psi\right) \sqrt{N_\psi \cdot B_\psi}}$$

$$\text{Rotación vertical} \quad D_\theta = \frac{0,5}{1 + 2 \cdot B_\theta}$$

**PASO N°10:** Determinar el valor para la relacion de amortiguamiento interno.

**PASO N°11:** Calcular frecuencias naturales del sistema:

Para traslación en los ejes X, Y, Z:

$$f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Para Rotación en los ejes X, Y, Z

$$f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}}$$

**PASO N°12:** Calcular el factor de amplificación dinámica:

$$M = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{f_n} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot D \cdot \left( \frac{\omega}{f_n} \right) \right]^2} \right]^{1/2}$$

**PASO N°13:** Calcular el factor de transmisibilidad:

$$T_r = M \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot D \cdot \left( \frac{\omega}{f_n} \right) \right]^2}$$

**PASO N°14:** Calcular frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2 \cdot D^2}}$$

**PASO N°15:** Calcular amplitudes de la fundacion:

Para Traslación:

$$A = \frac{M \cdot F}{K}$$

Para Rotación:

$$A = \frac{M \cdot M_0}{K}$$

#### ***4.5 EJEMPLO NUMERICO DE LA METODOLOGIA PARA ANALIZAR FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTE Y ROTATIVAS***

Para tener una mejor comprensión de la metodología y de la algoritmia, y poder apreciar las formulas de la metodología y como se relacionan entre ellas, Aplicaremos en un ejemplo práctico, con datos reales, la metodología desarrollada en este capítulo.

Una fundación de tipo zapata compuesta de dos elementos, el elemento 1 es una zapata, y el elemento 2 es un bloque. Sobre ella esta un compresor de dos cilindros (maquina 1) que tiene una frecuencia de operación de 480 RPM, y los detalles del mismo son suministrado por el fabricante, y un electromotor de especificaciones conocidas.

Todos los datos de la fundación, maquinas y suelo son presentados a continuación

Maquinas.

**Maquina 1**

$W_{m1} = 12000$	Peso de la maquina. 1 [kg]
$X_{m1} = 1,5$	Coordenada X de la ubicación de la maquina 1 [m]
$Y_{m1} = 2,2$	Coordenada Y de la ubicación de la maquina 1 [m]
$Z_{m1} = 2,3$	Coordenada Z de la ubicación de la maquina 1 [m]
$\omega = 480$	Velocidad de operación de la maquina. [RPM]

**Maquina 2**

$W_{m2} = 4000$	Peso de la maquina. 2 [kg]
$X_{m2} = 1,5$	Coordenada X de la ubicación de la maquina 2 [m]
$Y_{m2} = 4,5$	Coordenada Y de la ubicación de la maquina 2 [m]
$Z_{m2} = 2,3$	Coordenada Z de la ubicación de la maquina 2 [m]

**Elementos de la Fundación.****Elemento 1**

$X_1 = 1,5$	Coordenada X del centro de gravedad de elemento 1. [m]
$Y_1 = 3$	Coordenada Y del centro de gravedad de elemento 1. [m]
$Z_1 = 0,25$	Coordenada Z del centro de gravedad de elemento 1. [m]
$a_{x1} = 3$	Longitud X de elemento 1. [m]
$a_{y1} = 6$	Longitud Y de elemento 1. [m]
$a_{z1} = 0,5$	Longitud Z de elemento 1. [m]

**Elemento 2**

$X_2 = 1,5$	Coordenada X del centro de gravedad de elemento 2. [m]
$Y_2 = 3$	Coordenada Y del centro de gravedad de elemento 2. [m]
$Z_2 = 1$	Coordenada Z del centro de gravedad de elemento 2. [m]

$a_{x2} = 3$  Longitud X de elemento 2. [m]

$a_{y2} = 4,8$  Longitud Y de elemento 2. [m]

$a_{z2} = 1$  Longitud Z de elemento 2. [m]

$B =$  Longitud X área que esta en contacto con el suelo [m]

$B = 3$

$L =$  Longitud Y área que esta en contacto con el suelo [m]

$L = 6$

Fuerzas en la fundación.

$F_y = 1600$  Magnitud de la fuerza en dirección el eje Y [kgF]

$F_z = 4200$  Magnitud de la fuerza en dirección el eje Z [kgF]

$M_x = 4600$  Momento en el eje X [kgF · m]

Factores de diseño.

$\gamma_f = 2402,7$  Peso unitario material de la fundación  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$G = 703$  Modulo de corte del suelo  $\left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$

$\nu = 0,4$  Relación de Poisson

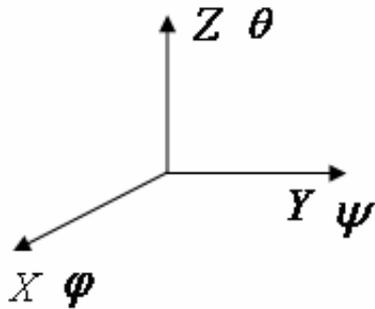
$h_0 = 1,5$  Profundidad de embutimiento [m]

$\gamma = 1600$  Peso unitario del suelo  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$D_i = 0,05$  Amortiguamiento del suelo

$\sigma_{adm} = 1$  Carga admisible del suelo  $\left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$

Orientacion de los ejes.



**CALCULO DE MASAS Y PESOS.**

$$V_1 = a_{x1} \cdot a_{y1} \cdot a_{z1} = 3 \cdot 6 \cdot 0,5 = 9 \quad [m^3] \quad \text{Volumen elemento 1 de la fundación}$$

$$V_2 = a_{x2} \cdot a_{y2} \cdot a_{z2} = 3 \cdot 4,8 \cdot 1 = 14,4 \quad [m^3] \quad \text{Volumen elemento 2 de la fundación}$$

$$W_{fi} = V_i \cdot \gamma_f$$

$$W_{f1} = 9 \cdot 2402,7 = 21624,3 \quad [kg] \quad \text{Peso elemento 1 de la fundación}$$

$$W_{f2} = 14,4 \cdot 2402,7 = 34598,8 \quad [kg] \quad \text{Peso elemento 2 de la fundación}$$

$$m_{fi} = \frac{W_{fi}}{9,81}$$

$$m_{f1} = \frac{21624,3}{9,81} = 2204,3 \quad \left[ \frac{kg \cdot s^2}{m} \right] \quad \text{Masa del elemento 1 de la fundación}$$

$$m_{f2} = \frac{34598,8}{9,81} = 3526,8 \quad \left[ \frac{kg \cdot s^2}{m} \right] \quad \text{Masa del elemento 1 de la fundación}$$

$$m_{mi} = \frac{W_{mi}}{9,81}$$

$$m_{m1} = \frac{12000}{9,81} = 1223,2 \quad \left[ \frac{kg \cdot s^2}{m} \right] \quad \text{Masa maquina 1}$$

$$m_{m2} = \frac{4000}{9,81} = 407,7 \quad \left[ \frac{kg \cdot s^2}{m} \right] \quad \text{Masa maquina 2}$$

$$m = m_{f1} + m_{f2} + m_{m1} + m_{m2}$$

$$m = 2204,3 + 3526,8 + 1223,2 + 407,7 = 7362 \left[ \frac{kg \cdot s^2}{m} \right] \quad \text{Masa total del sistema}$$

$$W_t = W_{f1} + W_{f2} + W_{m1} + W_{m2}$$

$$W_t = 21624,3 + 34598,8 + 12000 + 4000 = 72223,1 [kg] \quad \text{Peso total del sistema}$$

### ***CALCULO CENTRO DE GRAVEDAD DEL SISTEMA***

$$X_0 = \frac{2204,3 \cdot 1,5 + 3526,8 \cdot 1,5 + 1223,2 \cdot 1,5 + 407,7 \cdot 1,5}{7362}$$

$$X_0 = 1,5 \quad [m] \quad \text{Coordenada X del centro de gravedad del sistema}$$

$$Y_0 = \frac{2204,3 \cdot 3 + 3526,8 \cdot 3 + 1223,2 \cdot 2,2 + 407,7 \cdot 4,5}{7362}$$

$$Y_0 = 2,95 \quad [m] \quad \text{Coordenada Y del centro de gravedad del sistema}$$

$$Z_0 = \frac{2204,3 \cdot 0,25 + 3526,8 \cdot 1 + 1223,2 \cdot 2,3 + 407,7 \cdot 2,3}{7362}$$

$$Z_0 = 1,06 \quad [m] \quad \text{Coordenada Z del centro de gravedad del sistema}$$

### ***CALCULO MOMENTOS DE INERCIA DE LOS ELEMENTOS***

Calculo del momento de inercia de las maquinas con respecto al eje X que pasa por el CG del sistema.

$$I_{mx1} = m_{m1} [(Y_{m1} - Y_0)^2 + (Z_{m1} - Z_0)^2] = 1223,2 [(2,2 - 2,95)^2 + (2,3 - 1,06)^2]$$

$$I_{mx1} = 2568,8 \quad [kg \cdot s^2 \cdot m] \quad \text{Inercia maquina 1 con respecto al eje X que pasa por el CG}$$

$$I_{mx2} = m_{m2} [(Y_{m2} - Y_0)^2 + (Z_{m2} - Z_0)^2] = 407,7 [(4,5 - 2,95)^2 + (2,3 - 1,06)^2]$$

$$I_{mx2} = 4606,3 \quad [kg \cdot s^2 \cdot m] \quad \text{Inercia maquina 2 con respecto al eje X que pasa por el CG}$$

Calculo del momento de inercia de los elementos de la fundación con respecto al eje X que pasa por el CG del sistema.

$$I_{fx1} = \frac{m_{f1}}{12} (a_{y1}^2 + a_{z1}^2) + m_{f1} [(Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2]$$

$$I_{fx1} = \frac{2204,3}{12} (6^2 + 0,5^2) + 2204,3 [(3 - 2,95)^2 + (0,25 - 1,06)^2]$$

$$I_{fx1} = 8110,5 \quad [kg \cdot s^2 \cdot m] \quad \text{Inercia del elemento 1 de la fundación con respecto al eje X que pasa por el CG del sistema}$$

$$I_{fx2} = \frac{m_{f2}}{12} (a_{y2}^2 + a_{z2}^2) + m_{f2} [(Y_2 - Y_0)^2 + (Z_2 - Z_0)^2]$$

$$I_{fx2} = \frac{3526,8}{12} (4,8^2 + 1^2) + 3526,8 [(3 - 2,95)^2 + (1 - 1,06)^2]$$

$$I_{fx2} = 7086,8 \quad [kg \cdot s^2 \cdot m] \quad \text{Inercia del elemento 2 de la fundación con respecto al eje X que pasa por el CG del sistema}$$

Calculo de la inercia Total del sistema

$$I_x = I_{mx1} + I_{mx2} + I_{fx1} + I_{fx2} = 2568,8 + 1606,3 + 8110,5 + 7086,8$$

$$I_x = 19372,4 \quad [kg \cdot s^2 \cdot m] \quad \text{Inercia del sistema con respecto al eje X que pasa por el CG}$$

Calculo densidad del suelo

$$\rho = \frac{\gamma}{9,81} = \frac{1600}{9,81} = 163,09 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \right]$$

Calculo profundidad de embutimiento efectiva.

$$h = \frac{2 \cdot h_0}{3} = \frac{2 \cdot 1,5}{3} = 1 \text{ [m]}$$

### **CALCULO RADIOS EQUIVALENTES**

$$r_{0v} = \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 6}{3,14}} = 2,39 \text{ [m]}$$

$$r_{0\phi} = \sqrt[4]{\frac{B \cdot L^3}{3 \cdot \pi}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 6^3}{3 \cdot 3,14}} = 2,87 \text{ [m]}$$

### **CALCULO DE LOS FACTORES DE EMBUTIMIENTO**

$$N_z = \frac{1 + 0,61(1 - \nu) \cdot h}{r_{0v}} = \frac{1 + 0,61(1 - 0,4) \cdot 1}{2,39} = 0,57$$

$$N_h = \frac{1 + 0,55(2 - \nu) \cdot h}{r_{0v}} = \frac{1 + 0,55(2 - 0,4) \cdot 1}{2,39} = 0,78$$

$$N_\phi = 1 + 1,2(1 - \nu) \cdot \frac{h}{r_{0\phi}} + 0,2(2 - \nu) \cdot \left( \frac{h}{r_{0\phi}} \right)^3 = 1 + 1,2(1 - 0,4) \cdot \frac{1}{2,87} + 0,2(2 - 0,4) \cdot \left( \frac{1}{2,87} \right)^3$$

$$N_\phi = 1,26$$

### **CALCULO DE LAS CONSTANTE DE RESORTE**

$$K_z = \frac{4 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_{0v} \cdot N_z}{1 - \nu} = \frac{4 \cdot (703 \cdot 1000) \cdot 2,39 \cdot 0,57}{1 - 0,4} = 63846460 \left[ \frac{kg}{m} \right]$$

$$K_x = \frac{32 \cdot (1 - \nu) \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_{0v} \cdot N_h}{7 - 8 \cdot \nu} = \frac{32 \cdot (1 - 0,4) \cdot (703 \cdot 1000) \cdot 2,39 \cdot 0,78}{7 - 8 \cdot 0,4}$$

$$K_x = 66216384 \left[ \frac{kg}{m} \right]$$

$$K_\varphi = \frac{8 \cdot (G \cdot 1000) \cdot r_{0\varphi}^3 \cdot N_\varphi}{3 \cdot (1 - \nu)} = \frac{8 \cdot (703 \cdot 1000) \cdot 2,87^3 \cdot 1,26}{3 \cdot (1 - 0,4)} = 930655701,3 \left[ kg \cdot m \right]$$

### **CALCULO DE LAS FRECUENCIAS NATURALES**

$$f_{nz} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{63846460}{7362}} = 889,7 \left[ RPM \right]$$

$$f_{nh} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x}{m}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{66216384}{7362}} = 906,1 \left[ RPM \right]$$

$$f_{n\varphi} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{K_\varphi}{I_x}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{930655701,3}{19372,4}} = 2094 \left[ RPM \right]$$

### **CALCULO DE LA RELACION DE MASAS**

$$B_z = \frac{(1 - \nu)}{4} \cdot \frac{W_t}{\gamma \cdot r_{0v}^3} = \frac{(1 - 0,4)}{4} \cdot \frac{72223,1}{1600 \cdot 2,39^3} = 0,49$$

$$B_h = \frac{(7 - 8\nu)}{(32 \cdot (1 - \nu))} \cdot \frac{W_t}{\gamma \cdot r_{0v}^3} = \frac{(7 - 8 \cdot 0,4)}{(32 \cdot (1 - 0,4))} \cdot \frac{72223,1}{1600 \cdot 2,39^3} = 0,65$$

$$B_\varphi = \frac{3 \cdot (1 - \nu)}{8} \cdot \frac{I_x}{\rho \cdot r_{0\varphi}^5} = \frac{3 \cdot (1 - 0,4)}{8} \cdot \frac{19372,4}{163,09 \cdot 2,87^5} = 0,13$$

### **CALCULO DE AMORTIGUAMIENTO POR EMBUTIMIENTO**

$$\alpha_z = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_{0v}}\right)\right)}{\sqrt{N_z}} = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (1 - 0,4) \cdot \left(\frac{1}{2,39}\right)\right)}{\sqrt{0,57}} = 1,95$$

$$\alpha_h = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_{0v}}\right)\right)}{\sqrt{N_h}} = \frac{\left(1 + 1,9 \cdot (2 - 0,4) \cdot \left(\frac{1}{2,39}\right)\right)}{\sqrt{0,78}} = 2,57$$

$$\alpha_\varphi = \frac{\left(1 + 0,7 \cdot (1 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_{0\varphi}}\right) + 0,6 \cdot (2 - \nu) \cdot \left(\frac{h}{r_{0\varphi}}\right)^3\right)}{\sqrt{N_\varphi}}$$

$$\alpha_\varphi = \frac{\left(1 + 0,7 \cdot (1 - 0,4) \cdot \left(\frac{1}{2,87}\right) + 0,6 \cdot (2 - 0,4) \cdot \left(\frac{1}{2,87}\right)^3\right)}{\sqrt{1,26}} = 1,05$$

### **CALCULO RELACION DE AMORTIGUACION GEOMETRICA**

$$D_{0z} = \frac{0,425 \cdot \alpha_z}{\sqrt{B_z}} = \frac{0,425 \cdot 1,95}{\sqrt{0,49}} = 1,18$$

$$D_{0h} = \frac{0,288 \cdot \alpha_h}{\sqrt{B_h}} = \frac{0,288 \cdot 2,57}{\sqrt{0,65}} = 0,91$$

$$D_{0\varphi} = \frac{0,15 \cdot \alpha_\varphi}{(1 + N_\varphi \cdot B_\varphi)\sqrt{N_\varphi \cdot B_\varphi}} = \frac{0,15 \cdot 1,05}{(1 + 1,26 \cdot 0,13)\sqrt{1,26 \cdot 0,13}} = 0,33$$

### **CALCULO RELACION TOTAL DE AMORTIGUAMIENTO**

$$D_z = D_{0z} + D_i = 1,18 + 0,05 = 1,23$$

$$D_h = D_{0h} + D_i = 0,91 + 0,05 = 0,96$$

$$D_\varphi = D_{0\varphi} + D_i = 0,33 + 0,05 = 0,38$$

**CALCULO FRECUENCIA DE RESONANCIA**

Como  $D_z \geq 0,7$

$f_{rz}$  = Sobre amortiguado

Como  $D_h \geq 0,7$

$f_{rh}$  = Sobre amortiguado

Aquí la relación total de amortiguamiento es mayor que 0,7, el sistema esta sobreamortiguado. En estos modos de vibración

$$f_{r\varphi} = \frac{f_{n\varphi}}{\sqrt{1 - 2 \cdot D_\varphi^2}} = \frac{2094}{\sqrt{1 - 2 \cdot 0,38^2}} = 2483,02 \text{ [RPM]}$$

**CALCULO FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICA**

$$M_z = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{f_{nz}} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot D_z \cdot \left( \frac{\omega}{f_{nz}} \right) \right]^2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{480}{889,7} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot 1,23 \cdot \left( \frac{480}{889,7} \right) \right]^2} \right]^{1/2}$$

$$M_z = 0,66$$

$$M_h = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{f_{nh}} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot D_h \cdot \left( \frac{\omega}{f_{nh}} \right) \right]^2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{480}{906,1} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot 0,96 \cdot \left( \frac{480}{906,1} \right) \right]^2} \right]^{1/2}$$

$$M_h = 0,8$$

$$M_\varphi = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{f_{n\varphi}} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot D_\varphi \cdot \left( \frac{\omega}{f_{n\varphi}} \right) \right]^2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{480}{2094} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \cdot 0,38 \cdot \left( \frac{480}{2094} \right) \right]^2} \right]^{1/2}$$

$$M_\varphi = 1,03$$

### **CALCULO FACTOR DE TRANSMISIBILIDAD**

$$T_{rz} = M_z \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot D_z \cdot \left( \frac{\omega}{f_{nz}} \right) \right]^2} = 0,66 \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot 1,23 \cdot \left( \frac{480}{889,7} \right) \right]^2} = 1,09$$

$$T_{rh} = M_h \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot D_h \cdot \left( \frac{\omega}{f_{nh}} \right) \right]^2} = 0,8 \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot 0,96 \cdot \left( \frac{480}{906,1} \right) \right]^2} = 1,14$$

$$T_{r\varphi} = M_\varphi \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot D_\varphi \cdot \left( \frac{\omega}{f_{n\varphi}} \right) \right]^2} = 1,03 \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot 0,38 \cdot \left( \frac{480}{2094} \right) \right]^2} = 1,04$$

**CALCULO FUERZAS TRANSMITIDAS**

$$F_{tz} = T_{rz} \cdot F_z = 1,09 \cdot 4200 = 4578$$

$$F_{ty} = T_{rh} \cdot F_y = 1,14 \cdot 1500 = 1710$$

$$M_{tx} = T_{r\varphi} \cdot M_x = 1,04 \cdot 4600 = 4784$$

**CALCULO AMPLITUDES**

$$A_z = \frac{M_z \cdot F_z}{K_z} \cdot 1000 = \frac{0,66 \cdot 4200}{63846460} \cdot 1000 = 0,04 \text{ [mm]}$$

$$A_y = \frac{M_h \cdot F_y}{K_x} \cdot 1000 = \frac{0,8 \cdot 1500}{66216384} \cdot 1000 = 0,018 \text{ [mm]}$$

$$A_\varphi = \frac{M_\varphi \cdot M_x}{K_\varphi} = \frac{1,03 \cdot 4600}{363308635,6} = 0,000013 \text{ [rad]}$$

Al cruzar esta información con la velocidad de operación de la maquina, en la Figura 4.7, tenemos que estas amplitudes están en un rango permisible y no representan ningún peligro para la fundación, las maquinas o demás elementos adjuntos

**ESTUDIO DE RESONANCIA**

Como la relación total de amortiguamiento para los modos vertical y horizontal es mayor que 0,7, esto quiere decir que el sistema esta sobreamortiguado, esto significa que no puede haber resonancia en estos modos de vibración

$$R_\varphi = \frac{\omega}{f_{r\varphi}} = \frac{480}{2483,02} = 0,19$$

$$0,7 \leq R_\varphi \leq 1,4$$

Para el modo de rotación horizontal en el eje X, el sistema no se encuentra en estado de resonancia.

### ***CALCULO DE EXCENTRICIDAD***

$$e_y = \frac{\left| Y_0 - \frac{L}{2} \right|}{L} \cdot 100 = \frac{\left| 2,95 - \frac{6}{2} \right|}{6} \cdot 100 = 0,8$$

$$e_x = \frac{\left| X_0 - \frac{B}{2} \right|}{B} \cdot 100 = \frac{\left| 1,5 - \frac{3}{2} \right|}{3} \cdot 100 = 0$$

La distribución de masas en el sistema es correcta, ya que esta no excede el 5%.

### ***CALCULO PRESION DEL SUELO***

$$p_s = \frac{W_t}{B \cdot L \cdot 10000} = \frac{72223,1}{3 \cdot 6 \cdot 10000} = 0,40 \quad \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$0,40 \leq 1$$

El sistema no excede la presión permisible del suelo.

Después de este análisis, podemos concluir que el dimensionamiento seleccionado para la fundación es correcto, y las cargas a las cuales está sometida la fundación no representan ningún peligro para el sistema.

## CAPITULO V

### **PROGRAMA PARA EL ANALISIS DINAMICO PARA FUNDACIONES DE MAQUINAS DE IMPACTO, RECIPROCANTES Y ROTATIVAS. “FUNDEX”**

#### *5.1 PROGRAMA PARA ANALISIS DINAMICOS EN FUNDACIONES*

Luego de haber desarrollado la metodología del análisis dinámico para fundaciones de maquinas de impacto, reciprocantes y rotativas, observamos la gran cantidad de cálculos que hay que realizar para el estudio de una fundación.

Hoy en día el tiempo es un factor importante en todos los proyectos de ingeniería, una forma de disminuir esos tiempos es simplificando las tareas con ayuda de la tecnología actual disponible.

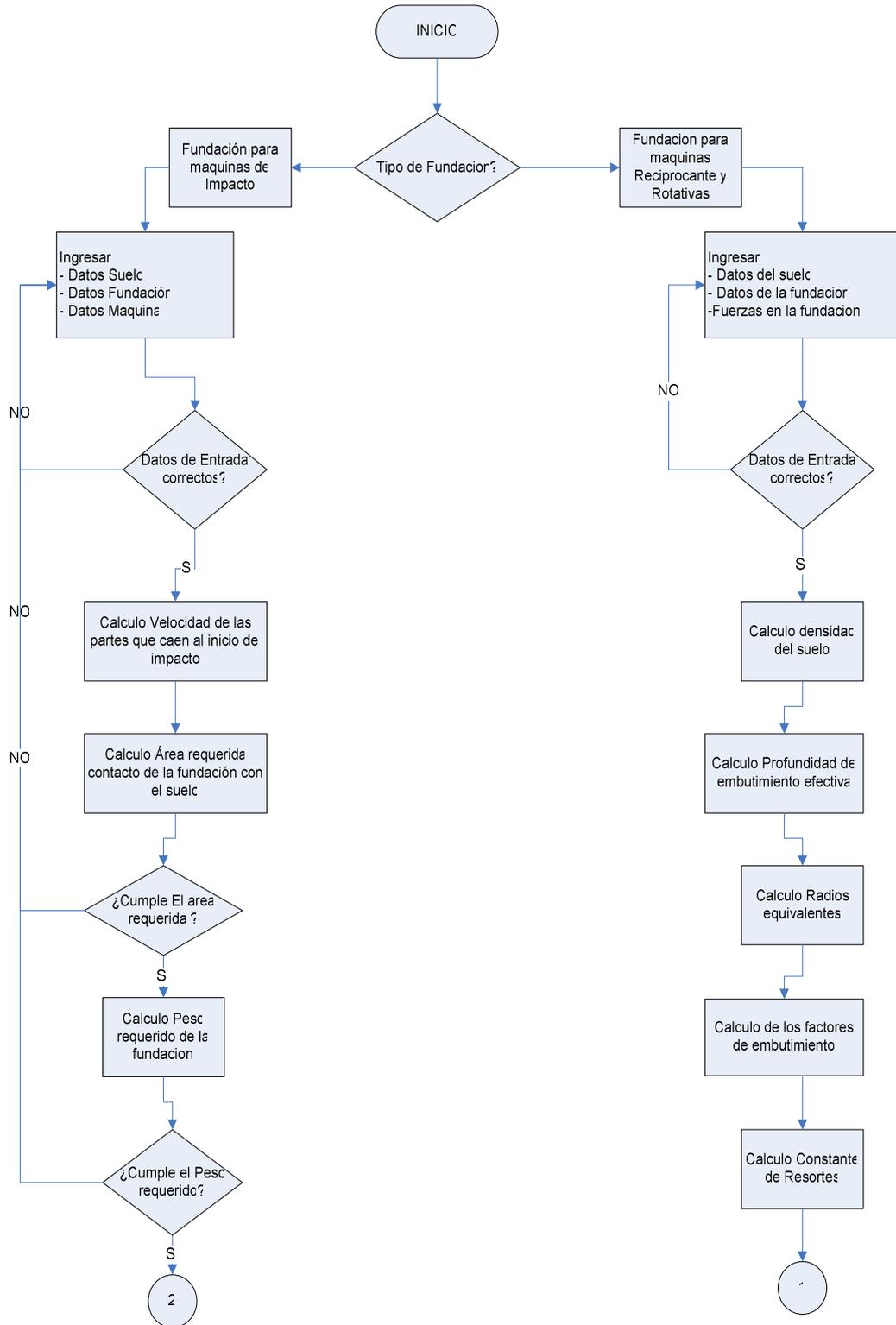
Es por esta razón que uno de los objetivos de este proyecto, es el poder compilar todos los datos y cálculos requeridos en la metodología, en un programa de fácil uso e interfaz amigable. Esto trae una disminución en los tiempos de estudio, una mejor precisión en los cálculos y ayudar en la toma de decisiones tecno-economicas.

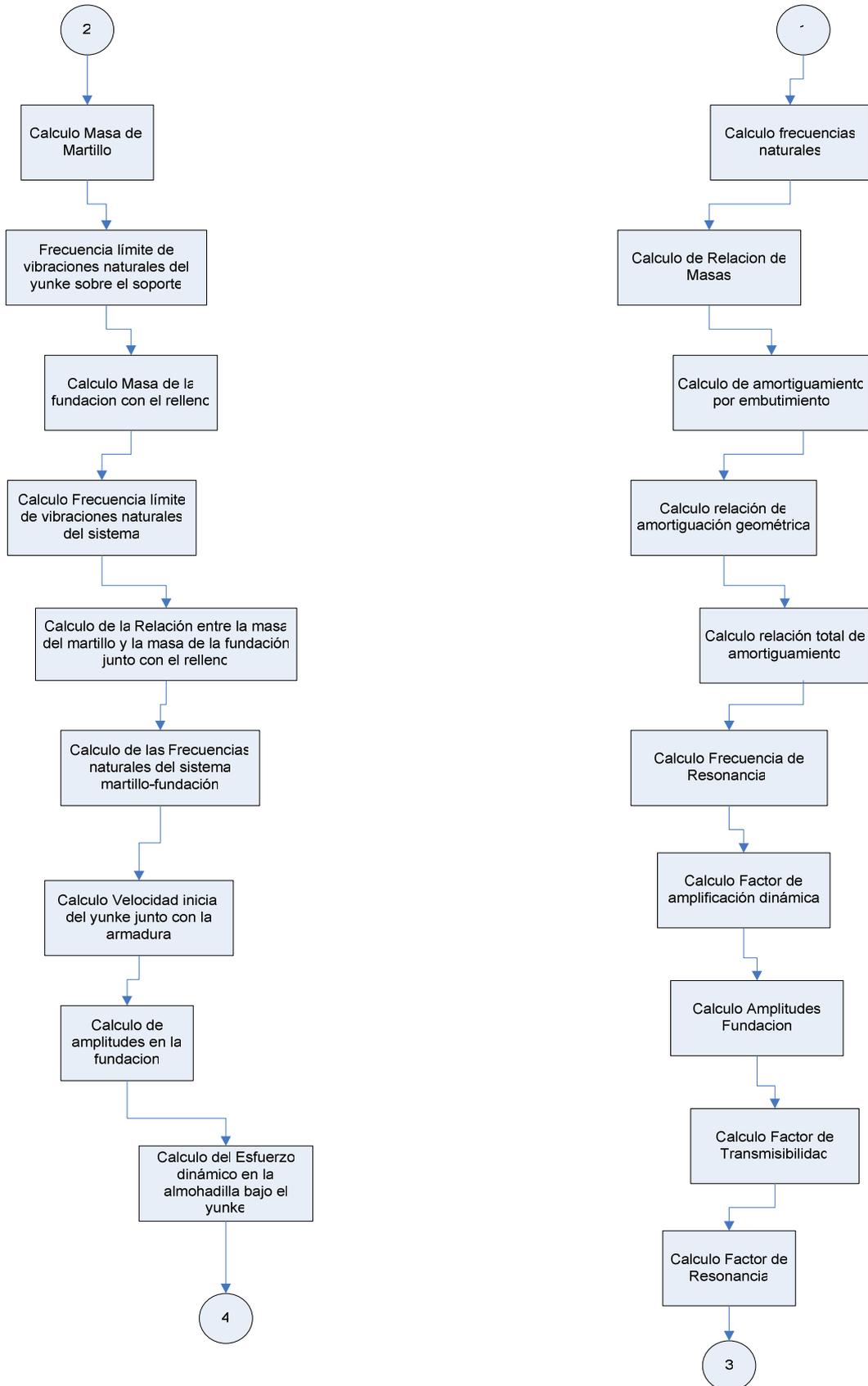
Para ello desarrollamos el programa “FUNDEX”, este programa permitirá analizar una fundación tomando en cuenta los parámetros más importantes como datos de entrada. El programa realizará todos los cálculos para los factores de diseño y nos presentará los resultados de una forma rápida y practica.

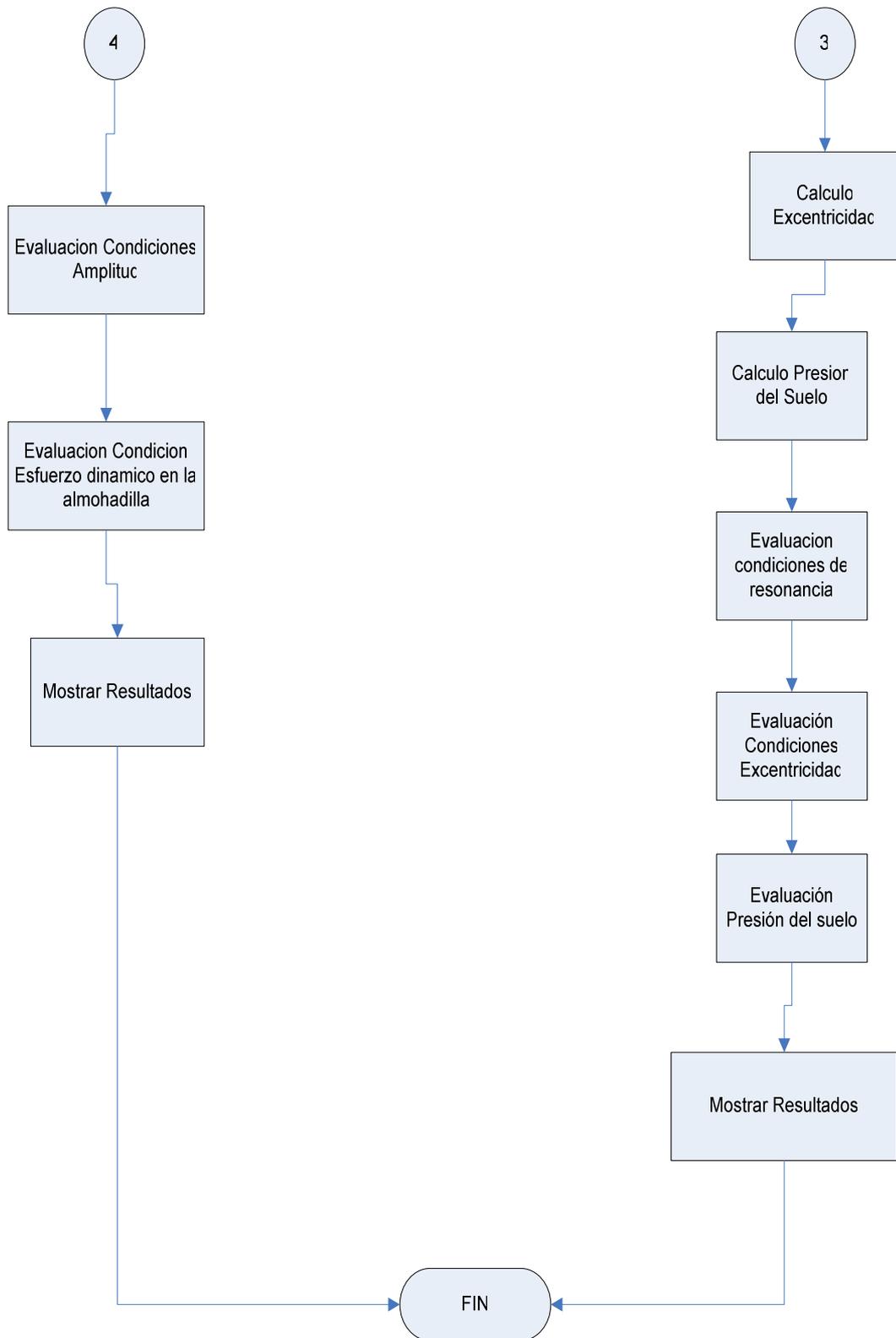
## ***5.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANALISIS DINAMICO PARA FUNDACIONES***

Un diagrama de flujo es la forma más tradicional de especificar los detalles algorítmicos de un proceso y constituye la representación gráfica de un proceso multifactorial. En esencia, los diagramas de flujo constan de una ó varias entradas, un conjunto de operaciones intermedias y una ó varias salidas. Este instrumento facilita el estudio y optimiza tanto los algoritmos como los programas o paquetes de computación y es ampliamente usado, para el estudio de diversos procesos como líneas de producción y sistemas de control de calidad.

El desarrollo del diagrama de flujo para FUNDEX sigue un orden estrictamente secuencial y maneja una serie de decisiones que le permiten al usuario establecer parámetros particulares para el análisis dinámico de fundaciones.







### **5.3 ALGORITMO DEL ANALISIS DINAMICO PARA FUNDACIONES**

Paso 1: Inicio Algoritmo

Análisis dinámico Fundaciones Reciprocantes y Rotativas

Paso 2: Ingreso Datos de Entrada.

Paso 3: Verificación Datos de Entrada.

Paso 4: Calculo Densidad del suelo.

Paso 5: Calculo Profundidad de embutimiento efectiva

Paso 6: Calculo Radios equivalentes

Paso 7: Calculo de los factores de embutimiento

Paso 8: Calculo Constante de Resortes

Paso 9: Calculo frecuencias naturales

Paso 10: Calculo de Relación de Masas

Paso 11: Calculo de amortiguamiento por embutimiento

Paso 12: Calculo relación de amortiguación geométrica

Paso 13: Calculo relación total de amortiguamiento

Paso 14: Calculo Frecuencia de Resonancia.

Paso 15: Calculo Factor de amplificación dinámica

Paso 16: Calculo Amplitudes Fundación

Paso 17: Calculo Factor de Transmisibilidad

Paso 18: Calculo Factor de Resonancia

Paso 19: Calculo Excentricidad

Paso 20: Calculo Presión del Suelo

Paso 21: Evaluación condiciones de resonancia

Paso 22: Evaluación Condiciones Excentricidad

Paso 23: Evaluación Presión del suelo

Paso 24: Mostrar Resultados

### Análisis Dinámico Fundaciones para maquinas de impacto

Paso 1: Ingreso Datos de entrada.

Paso 2: Verificación dato de entrada.

Paso 3: Calculo Velocidad de las partes que caen al inicio del impacto

Paso 4: Calculo Área requerida contacto de la fundación con el suelo

Paso 5: Verificación del área de contacto.

Paso 6: Calculo Peso requerido de la fundación

Paso 7: Verificación del peso requerido por la fundación.

Paso 8: Calculo Masa del Martillo

Paso 9: Frecuencia límite de vibraciones naturales del yunke sobre el soporte

Paso 10: Calculo Masa de la fundación con el relleno

Paso 11: Calculo Frecuencia límite de vibraciones naturales del sistema

Paso 12: Calculo de la Relación entre la masa del martillo y la masa de la fundación junto con el relleno

Paso 13: Calculo de las Frecuencias naturales del sistema martillo-fundación

Paso 14: Calculo Velocidad inicial del yunke junto con la armadura

Paso 15: Calculo de amplitudes en la fundación

Paso 16: Calculo del Esfuerzo dinámico en la almohadilla bajo el yunke

Paso 17: Evaluación Condiciones Amplitud

Paso 18: Evaluación Condición Esfuerzo dinámico en la almohadilla

### ***5.4 LENGUAJE DE PROGRAMACION USADO***

El lenguaje de programación escogido para la realización de este Trabajo Especial de Grado fue el Microsoft Visual Basic 6.0, el cual se encuentra dentro del grupo de lenguajes orientados a objetos y manejados por eventos, lo que significa que su código está dividido en bloques o módulos.

Actualmente, los programas creados en Visual Basic sólo funcionan en Windows. La aplicación Visual Basic, permite crear ventanas, botones, menús, etc. de forma sencilla con solo arrastrar y soltar los elementos. Luego se pueden definir las apariencias, posiciones y comportamientos tanto de forma visual como utilizando códigos de programación.

Este lenguaje toma elementos de diferentes paradigmas como el orientado a objetos y el orientado a eventos.

Visual Basic suele considerarse un sistema RAD (Rapid Application Development), porque permite crear aplicaciones de forma rápida, especialmente para prototipos.

### ***5.5 EJECUCION DEL PROGRAMA***

Para poder determinar la fiabilidad del software desarrollado y los métodos utilizados se han utilizado varios ejemplos ya resueltos por otros investigadores, luego compararemos los resultados obtenidos, y las diferencia en la ejecución de los mismos.

Al ejecutar el archivo FUNDEX.EXE. Se despliega la ventana de presentación del programa. La cual presentamos a continuación.



Figura 5.1. Formulario de entrada del programa. Fuente: Los Autores.

Como el programa realiza dos series de cálculo diferentes, el mismo en su formulario de presentación presenta tres opciones. La primera permite analizar fundaciones para maquinas reciprocantes y rotativas. La segunda opción es para analizar fundaciones para maquinas de impacto. La última opción es para salir del programa.

### 5.5.1 EJECUCION PROGRAMA MAQUINAS DE IMPACTO

Para probar la funcionalidad del programa para el análisis de fundaciones de maquinas de impacto, escogimos el siguiente problema, del libro de Barkan, D.D. “*Dynamics of bases and foundations*”

Quedando los valores de entrada para el programa:

$W_n = 3$	Peso nominal de las partes que caen [Tons]
$W_0 = 3,5$	Peso real de las partes que caen [Tons]
$h = 1$	Altura de caída del mazo [m]

$A =$	0,15	Área del pistón $[m^2]$
$p =$	80	Presión de vapor $[Tons/m^2]$
$W_a =$	90	Peso de yunke y la armadura $[Tons]$
$A_2 =$	4,75	Área de la base del yunke $[m^2]$
$b =$	0,6	Espesor del soporte bajo el yunke $[m]$
$p_0 =$	20	Presión permisible del suelo $[Tons/m^2]$
$\eta =$	0,65	Coefficiente de contrapresión y fuerzas friccionales
$e =$	0,5	Coefficiente de restricción
$W_f =$	161,4	Peso de la fundación junto con el relleno $[Tons]$
$A_f =$	35,7	Área de contacto de la fundación con el suelo $[m^2]$
$E =$	50000	Módulo de elasticidad del soporte bajo el yunke $[Tons/m^2]$
$C_u =$	4000	Coefficiente de compresión elástica uniforme $[Tons/m^3]$
$K =$	3	Coefficiente de corrección

El primer formulario que nos muestra el programa es para ingresar los datos de entrada del sistema.

**DATOS DE LA MÁQUINA**

**Datos de la fundación:**

- Espesor del soporte bajo del yunque: 0,6 m
- Coefficiente de contrapresión y fuerzas friccionales: 0,65
- Coefficiente de restitución: 0,5
- Peso de la fundación con relleno: 161,4 tons
- Área de contacto de la fundación con el suelo: 35,7 m<sup>2</sup>

**Datos del suelo:**

- Presión permisible del suelo: 20 tons /m<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad del soporte bajo el yunque: 50000 tons /m<sup>2</sup>
- Coefficiente de compresión elástica uniforme: 4000 tons /m<sup>3</sup>
- Coefficiente de corrección: 3

**Datos de la máquina:**

- Nombre: Prensa
- Peso nominal de las partes que caen: 3 tons
- Peso real de las partes que caen: 3,5 tons
- Altura caída del mazo: 1 m
- Área del pistón: 0,15 m<sup>2</sup>
- Presión de vapor: 80 tons /m<sup>2</sup>
- Peso del yunque y la armadura: 90 tons
- Área de la base del yunque: 4,75 m<sup>2</sup>

Ayuda Menú Principal Borrar Calcular

**Figura 5.2. Formulario de entrada de datos, para las fundaciones de impacto. Fuente: Los Autores.**

Aquí ingresamos todos los datos necesarios para el análisis, los cuales son: Espesor del soporte bajo del yunque, Coeficiente de contrapresión y fuerza friccional, Coeficiente de restitución, Peso de la fundaron con el relleno, Área de contacto de la fundación con el suelo, Presión permisible del suelo, Modulo de elasticidad del soporte bajo del yunque, Coeficiente de compresión elástica uniforme, Coeficiente de corrección, Peso nominal de las partes que caen, Peso real de las partes que caen, Altura caída del mazo, Área del pistón, Presión de vapor, Peso del yunque y la armadura, Área de la ase del yunque. Todos estos valores han sido explicados en detalle en el capítulo III.

En caso de que el usuario no esté claro en alguno de estos conceptos, puede desplegar el **menú de ayuda**, el cual explica algunos aspectos de los datos de entrada.

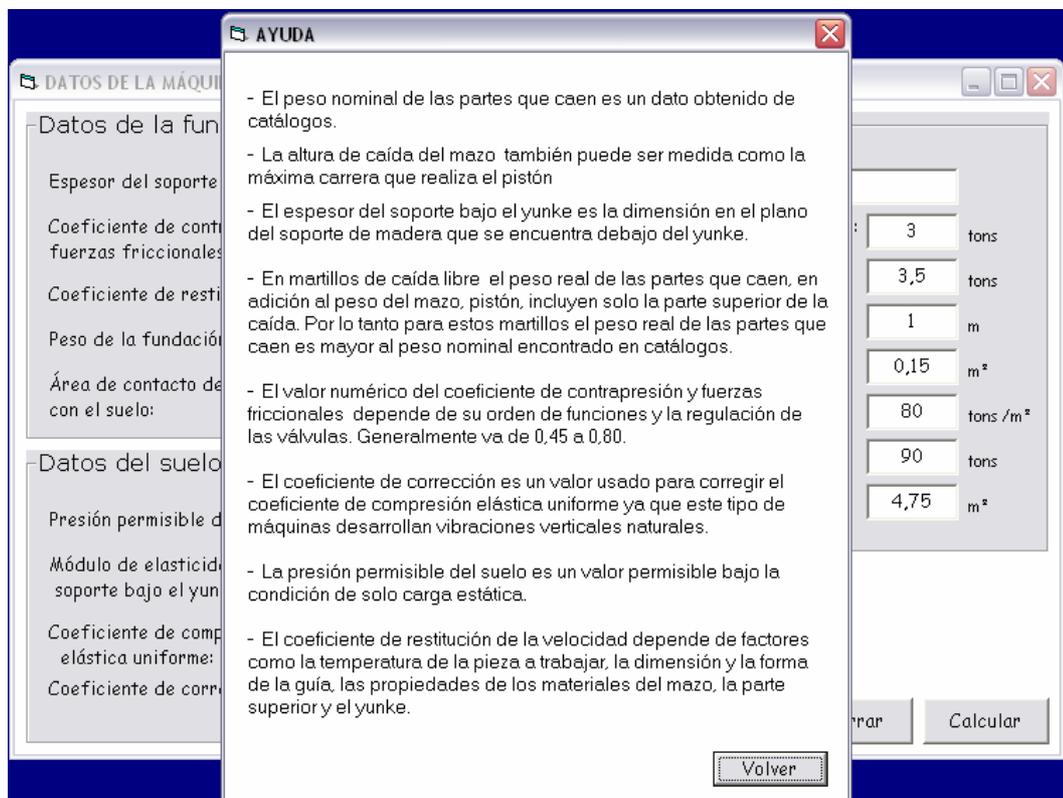
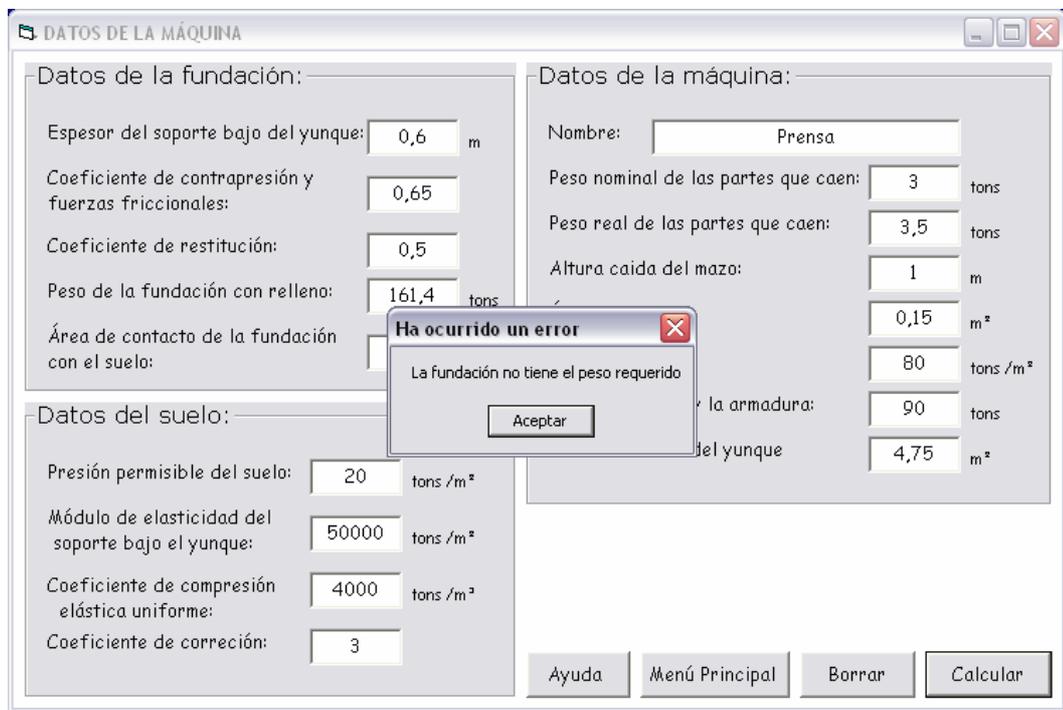


Figura 5.3. Formulario de ayuda del programa. Fuente: Los Autores.

Al darle clic al botón calcular, el programa ejecutará todos los datos necesarios para el análisis de la fundación. El programa evaluará dos condiciones que son: el área mínima requerida y el peso mínimo requerido. Si los datos de entrada no cumplen con esta condición el programa, nos enviará un mensaje de error, especificando cual de estas condiciones no se cumple. Luego de visualizar el mensaje de error, podremos observar en el formulario siguiente, cuales son los valores limites, para poder volver al formulario de entrada de datos y modificar el valor al mínimo requerido.



**Figura 5.4. Mensaje de error del programa. Fuente: Los Autores.**

El ejemplo no cumple con el peso requerido. En el formulario siguiente podemos ver los valores necesarios para cumplir esta condición.

**ANÁLISIS DINÁMICO**

**Análisis dinámico**

Velocidad de partes que caen: 6,059 m/s

Coeficiente de rigidez del soporte: 0 tons/m

Masa del martillo: 0 tons \* s<sup>2</sup> / m

Frecuencia límite de vibraciones naturales del yunque sobre el soporte: 0 s<sup>-2</sup>

Frecuencia límite de vibraciones naturales del sistema: 0 s<sup>-2</sup>

Frecuencias naturales (1) del sistema: 0 s<sup>-2</sup>

Frecuencias naturales (2) del sistema: 0 s<sup>-2</sup>

Velocidad inicial del yunque junto con la armadura: 0 m/s

**Restricción peso**

Peso de la fundación junto con el relleno: 161,4 tons

Peso requerido de la fundación: 164,474 tons

**La fundación no tiene el peso requerido**

**Restricción área**

Área de contacto de la fundación con el suelo: 35,7 m<sup>2</sup>

Área de contacto requerida de la fundación con el suelo: 31,809 m<sup>2</sup>

**La fundación tiene el Área requerida**

Volver      Siguiente

Menú Principal

**Figura 5.5. Formulario de salida del programa. Fuente: Los Autores.**

Al regresar al formulario de datos de entrada, modificaremos el valor de peso de la fundación, como el peso requerido de la fundación es de 164,47 Tons, cambiaremos el valor en los datos de entrada por 165 Tons. Una vez corregido el error, observaremos en el formulario de salida los resultados generados por el programa.

The screenshot shows a software window titled 'ANÁLISIS DINÁMICO' with three main sections:

- Análisis dinámico:**
  - Velocidad de partes que caen: 6,059 m/s
  - Coefficiente de rigidez del soporte: 395833,333 tons/m
  - Masa del martillo: 9,174 tons \* s<sup>2</sup> / m
  - Frecuencia límite de vibraciones naturales del yunque sobre el soporte: 43145,833 s<sup>-2</sup>
  - Frecuencia límite de vibraciones naturales del sistema: 16480,8 s<sup>-2</sup>
  - Frecuencias naturales (1) del sistema: 78074,793 s<sup>-2</sup>
  - Frecuencias naturales (2) del sistema: 14075,458 s<sup>-2</sup>
  - Velocidad inicial del yunque junto con la armadura: 0,34 m/s
- Restricción peso:**
  - Peso de la fundación junto con el relleno: 165 tons
  - Peso requerido de la fundación: 164,474 tons
  - Message: **La fundación tiene el peso requerido**
- Restricción área:**
  - Área de contacto de la fundación con el suelo: 35,7 m<sup>2</sup>
  - Área de contacto requerida de la fundación con el suelo: 31,809 m<sup>2</sup>
  - Message: **La fundación tiene el Área requerida**

Navigation buttons at the bottom: 'Volver', 'Siguiete', and 'Menú Principal'.

**Figura 5.6. Formulario de respuesta del programa. Fuente: Los Autores.**

En este formulario se muestra los resultados finales de los cálculos. Podemos ver que el programa calcula datos de interés como: Velocidad de las partes que caen, Las diferentes frecuencias del sistema. Y el programa evalúa las condiciones de peso y área requeridos.

El programa en todos los formularios de salida, nos ofrece la opción de volver a formularios anteriores, y volver al formulario de entrada en caso de querer modificar algún dato, esto también facilita el desplazamiento entre formularios.

En el último formulario de salida observamos los últimos datos realizados por el programa.

The screenshot shows a window titled 'AMPLITUDES' with two main sections. The left section, 'Amplitudes de la fundación', contains two input fields: 'Amplitud de vibración de la fundación 1' with the value '1,054 mm' and 'Amplitud de vibración de la fundación 2' with the value '1,565 mm'. Below these is a green message: 'La amplitud esta en el rango establecido.' The right section, 'Esfuerzo en la almohadilla', contains an input field for 'Esfuerzo dinámico en la almohadilla bajo el yunque' with the value '42,546 m²'. Below this is a green message: 'No excede el esfuerzo permitido'. At the bottom of the window are three buttons: 'Menú Principal', 'Entrada de datos', and 'Volver'.

**Figura 5.7. Formulario de amplitudes y esfuerzo del programa. Fuente: Los Autores.**

El último formulario de salida, muestra los resultados de las amplitudes de las vibraciones y el esfuerzo dinámico en la almohadilla bajo el yunque. De igual forma que para el peso y el área requeridos, el programa evalúa el valor de las amplitudes y del esfuerzo, con los límites determinados en el capítulo III.

Al comparar los resultados obtenidos por el programa, con los resultados logrados por Barkan, observamos una diferencia debido al cambio en el peso de la fundación. En el problema del libro *“Dynamics of bases and foundations”*, no varían este valor, y en el programa el usuario está obligado a respetar esta condición. Esto se hace para evitar problemas de cálculo y valores perjudiciales de vibración en la fundación.

Los valores obtenidos están en un rango aceptable para la fundación y la máquina. Esto nos garantiza que la fundación escogida con el peso corregido, esta vibrando en los valores permitidos de diseño.

**5.5.2 EJECUCION PROGRAMA FUNDACION MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS**

De igual forma que para la parte de máquinas de impacto, accederemos a los formularios para el análisis de fundaciones para maquinas reciprocantes y rotativas, al darle clic al botón designado en el formulario de presentación.

Para la ejecución de la parte de fundación para maquinas reciprocantes y rotativas, escogimos un problema resuelto de un artículo de “Hydrocarbon Processing” de Marzo de 1980. Corresponde a un compresor alternativo, y una fundación con las siguientes dimensiones:

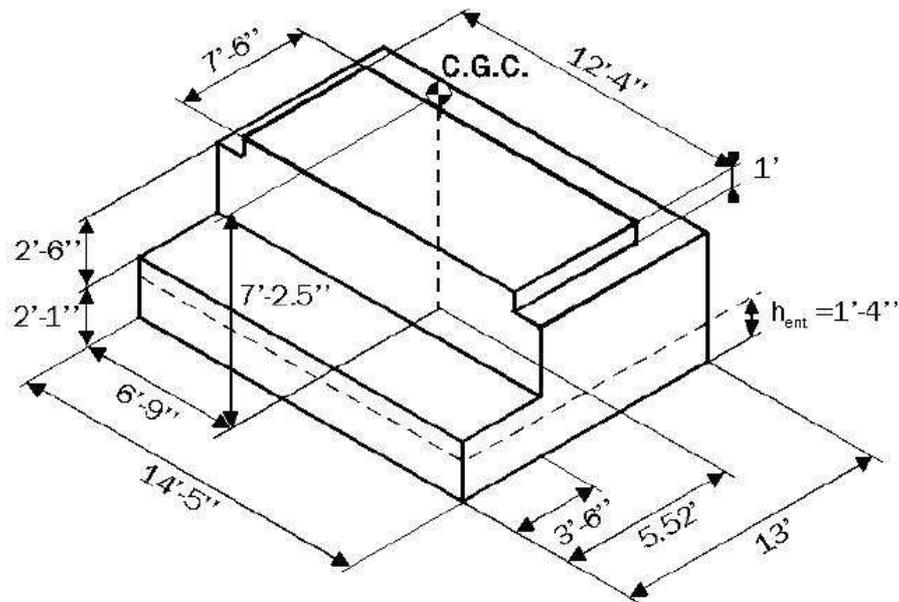


Figura 5.8. Dimensiones fundación del enunciado. Fuente: “Hydrocarbon Processing”.

Los datos del suelo, maquina y fundación. Para ingresarlos en el programa se muestran a continuación:

$$W_t = 77312,47 \text{ Peso total del sistema } [kg]$$

$m = 7880,9$	Masa total del sistema $\left[ \frac{kg \cdot s^2}{m} \right]$
$X_0 = 2,07$	Coordenada X del centro de gravedad del sistema $[m]$
$Y_0 = 2,18$	Coordenada Y del centro de gravedad del sistema $[m]$
$Z_0 = 1,1$	Coordenada Z del centro de gravedad del sistema $[m]$
$B = 3,95$	Longitud X área que esta en contacto con el suelo $[m]$
$L = 4,37$	Longitud Y área que esta en contacto con el suelo $[m]$
$I_x = 22252,7$	Inercia del sistema con respecto al eje X que pasa por el CG $[kg \cdot s^2 \cdot m]$
$I_y = 19785,35$	Inercia del sistema con respecto al eje Y que pasa por el CG $[kg \cdot s^2 \cdot m]$
$I_z = 14986,7$	Inercia del sistema con respecto al eje Z que pasa por el CG $[kg \cdot s^2 \cdot m]$
$\omega = 700$	Velocidad de operación de la maquina. $[RPM]$
$F_x = 4000$	Magnitud de la fuerza en dirección el eje X $[kgF]$
$M_y = 8100$	Momento en el eje Y $[kgF \cdot m]$
$G = 400$	Modulo de corte del suelo $\left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$
$\nu = 0,45$	Relación de Poisson
$h_0 = 1,4$	Profundidad de embutimiento $[m]$
$\gamma = 1800$	Peso unitario del suelo $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$D_i = 0,05$	Amortiguamiento del suelo
$\sigma_{adm} = 0,7$	Carga admisible del suelo $\left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$

El Primer formulario de entrada de datos, será el de las propiedades del suelo. En el ingresaremos los datos de, Modulo de corte, Relación de Poisson, Profundidad de embutimiento, Peso unitario del suelo, Amortiguamiento interno del suelo, y la carga admisible del suelo. De igual forma que los demás formularios del programa tendremos varias opciones para desplazarnos por los formularios con más comodidad.

Datos del suelo		
Módulo del corte	400	kg/cm <sup>2</sup>
Relación de Poisson	0.45	
Profundidad de embutimiento	1.4	m
Peso unitario	1800	kg/m <sup>3</sup>
Amortiguamiento interno	0.05	
Carga admisible	0.7	kg/cm <sup>2</sup>

Menú Principal    Borrar    Siguiete

Figura 5.9. Formulario de entrada de datos del programa. Fuente: Los Autores.

El siguientes formulario de entrada de datos, ingresaremos los datos restante para el análisis de el sistema.

FUNDACIONES PARA MÁQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS			
<b>Datos del sistema</b> Nombre: Compressor Peso total: 77312.47 kg Masa total: 7880.9 kg * s <sup>2</sup> /m Longitud X (área que está en contacto con el suelo): 3.95 m Longitud Y (área que está en contacto con el suelo): 4.37 m		<b>Datos geométricos del sistema</b> Coordenada X del centro de gravedad: 2.07 m    Inercia del sistema con respecto al eje X que pasa por el CG: 22252.7 kg * s <sup>2</sup> /m Coordenada Y del centro de gravedad: 2.18 m    Inercia del sistema con respecto al eje Y que pasa por el CG: 19785.35 kg * s <sup>2</sup> /m Coordenada Z del centro de gravedad: 1.1 m    Inercia del sistema con respecto al eje Z que pasa por el CG: 14986.7 kg * s <sup>2</sup> /m	
<b>Cargas dinámicas de diseño</b> Magnitud de la fuerza en el eje X: 4000 kg    Momento en el eje X: 0 kg*m Magnitud de la fuerza en el eje Y: 0 kg    Momento en el eje Y: 8100 kg*m Magnitud de la fuerza en el eje Z: 0 Kg    Momento en el eje Z: 0 kg*m Velocidad de operación de la máquina: 700 RPM			
Sentido de los ejes 			
Volver    Borrar    Calcular			

Figura 5.10. Formulario de entrada de datos del programa. Fuente: Los Autores.

Luego de introducir todos los datos requeridos por el programa para el análisis, el procede a realizar los cálculos necesarios.

El primer formulario de respuesta del programa, presenta una rejilla con todos los valores calculados para el diseño, y para los diferentes modos de vibración. Esto muestra al usuario las condiciones del sistema para todos los modos de vibración.

Modos de vibración	Vertical (Z)	Horizontal (X)	Horizontal (Y)	Rotacion (Y)	Rotacion (X)	Rotacion (Z)
Momento de inercia [kg <sup>2</sup> s <sup>2</sup> m]	14986,7	22252,7	19785,35	19785,35	22252,7	14986,7
Radio equivalente [m]	2,345	2,345	2,345	2,312	2,432	2,375
Factor de embutimiento	0,56	0,766	0,766	1,287	1,271	2,375
Constante de resorte [kg/m]/[kg <sup>2</sup> m]	38200242,424	37180862,745	37180862,745	308567746,294	364594349,337	286626447,837
Frecuencia natural [PPM]	665,176	656,241	656,241	1193,131	1206,052	1318,979
Relación de masas	0,458	0,644	0,644	0,336	0,294	1,082
Amortiguamiento por embutimiento	1,892	2,482	2,482	1,072	1,065	1,058
Relación de amortiguación geométrica	1,188	0,891	0,891	0,171	0,19	0,158
Amortiguamiento del suelo	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Relación de amortiguamiento	1,238	0,941	0,941	0,221	0,24	0,208
Frecuencia de resonancia [PPM]	Sobreamortiguado	Sobreamortiguado	Sobreamortiguado	1255,832	1282,359	1380,057
Factor de amplificación dinámica	0,383	0,497	0,497	1,418	1,39	1,331
Amplitud máxima [mm]/[rad]	0,07707278	0,0944206	0	0,00003723	0	0
Factor de transmisibilidad	1,07	1,115	1,115	1,465	1,443	1,363
Fuerzas y momentos transmitidos [kg]/[kg <sup>2</sup> m]	0	4458,303	0	11867,379	0	0

Figura 5.11. Tabla de resultados formulario del programa. Fuente: Los Autores.

La presentación en forma de tabla de este formulario, resulta práctica para el usuario, ya que no debemos desplazarnos a través de varios formularios para comparar resultados entre diversos modos de vibración

El segundo formulario de salida, nos muestra las amplitudes de la fundación. En el se muestra la grafica que se seleccionó en el capítulo IV, para evaluar el riesgo que tiene la amplitud de la fundación para las maquinas y las personas alrededor de la fundación.

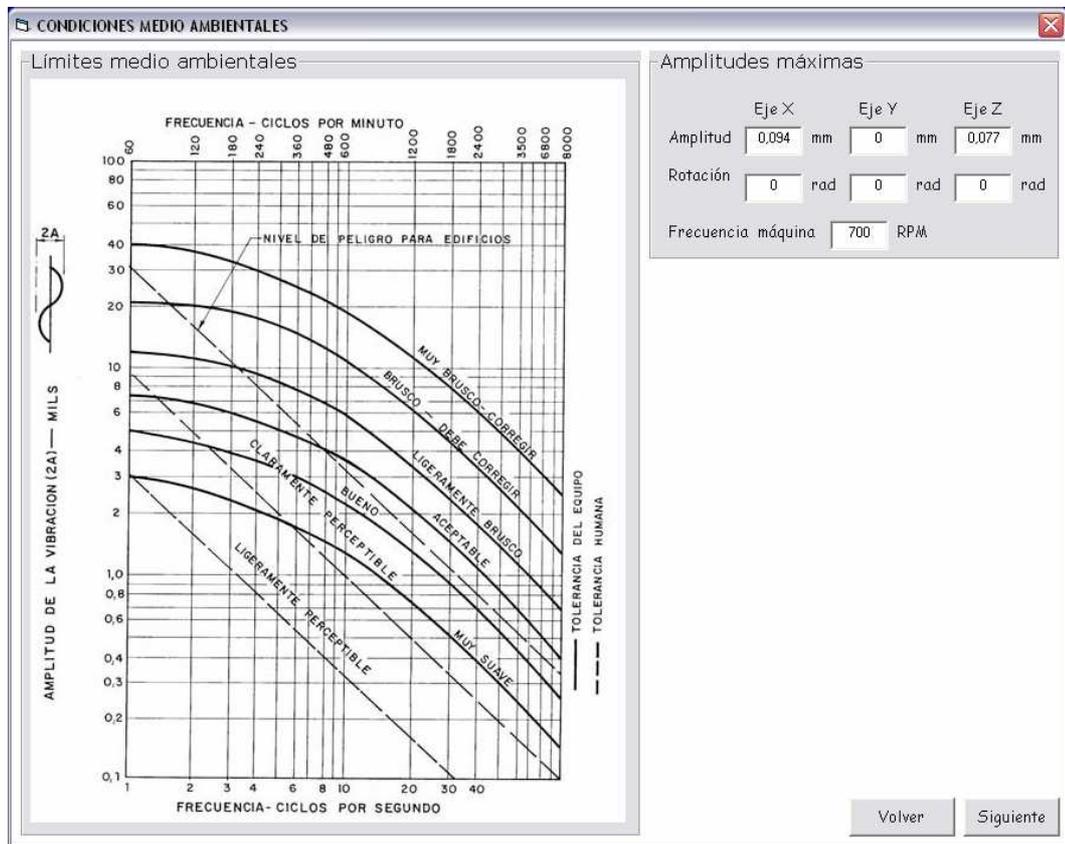


Figura 5.12. Formulario de amplitudes del programa. Fuente: Los Autores.

Para el último formulario de salida, el programa evalúa los posibles estados de resonancia que pueda tener la fundación en cualquiera de sus modos de vibración. De igual forma se evalúan dos parámetros importantes para la estabilidad de la fundación, como lo es la distribución de masas y la presión ejercida en el suelo.

The screenshot shows a software window titled "EXCENTRICIDAD Y RESONANCIA". It is divided into two main sections: "Resonancia" and "Excentricidad y presión ejercida".

**Resonancia Section:**

- Factor de resonancia en X:** Input field contains "Sobre amortiguado".
- Factor de resonancia en eje de rotación X:** Input field contains "0,546".
- Factor de resonancia en Y:** Input field contains "Sobre amortiguado".
- Factor de resonancia en eje de rotación Y:** Input field contains "0,557".
- Factor de resonancia en Z:** Input field contains "Sobre amortiguado".
- Factor de resonancia en eje de rotación Z:** Input field contains "0,507".

Below each pair of input fields, the text "No hay riesgo de resonancia" is displayed in green.

**Excentricidad y presión ejercida Section:**

- Excentricidad en el eje X:** Input field contains "2,405 %".
- Excentricidad en el eje Y:** Input field contains "0,114 %".
- Presión ejercida en el suelo:** Input field contains "0,448 Kg/cm<sup>2</sup>".

To the right of each input field, the text "Correcta distribución de masas" (for X and Y) and "Correcta la presión ejercida en el suelo" (for pressure) is displayed in green.

At the bottom of the window, there are three buttons: "Menú principal", "Entrada de datos", and "Volver".

Figura 5.13. Formulario de resultados de resonancia del programa. Fuente: Los Autores.

**5.6 VALIDACION DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA**

**5.6.1 ANALISIS DE FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO**

Manteniendo los datos de los ejercicios anteriores, evaluaremos la proximidad de los datos obtenidos mediante el programa y los resultados que se obtienen de los ejemplos.

Para el caso del análisis de fundaciones de maquinas de impacto, se tuvo que modificar el peso de la fundación, ya que en el ejemplo resuelto no se modifica el peso de la fundación para que esta se encuentre en el rango del peso permisible.

Los valores obtenidos con FUNDEX y los obtenidos del ejemplo, se muestran en la tabla a continuación.

Elemento calculado	FUNDEX	BARKAN
Velocidad de las partes que caen	6,059	6,100
Coefficiente de rigidez del soporte	395833,330	395833,330
Masa del martillo	9,174	9,17
Frecuencia Limite de vibraciones naturales del yunque sobre el soporte	43145,833	43166,110
Frecuencia limite de vibraciones naturales del sistema	16480,800	16754,000
Frecuencia natural 1 del sistema	78074,793	78617,620
Frecuencia natural 2 del sistema	14075,458	14258,470
Velocidad del yunke junto con la armadura	0,340	0,336
Peso requerido de la fundacion	164,474	166,250
Area requerida de la fundacion	31,809	32,020
Amplitud de vibracion 1 de la fundacion	1,054	1,030
Amplitud de vibracion 2 de la fundacion	1,565	1,550
Esfuerzo dinamico en la almohadilla bajo el yunque	42,546	43,300

**Tabla 5.1. Resultados Programa vs Ejemplo. Fuente: Los Autores.**

El porcentaje de diferencia entre los valores obtenidos es el siguiente.

Elemento calculado	Diferencia
Velocidad de las partes que caen	0,672%
Coeficiente de rigidez del soporte	0,000%
Masa del martillo	0,044%
Frecuencia Limite de vibraciones naturales del yunque sobre el soporte	0,047%
Frecuencia limite e vibraciones naturales del sistema	1,631%
Frecuencia natural 1 del sistema	0,690%
Frecuencia natural 2 del sistema	1,284%
Velocidad del yunke junto con la armadura	1,190%
Peso requerido de la fundación	1,068%
Área requerida de la fundación	0,659%
Amplitud de vibración 1 de la fundación	2,330%
Amplitud de vibración 2 de la fundación	0,968%
Esfuerzo dinámico en la almohadilla bajo el yunque	1,741%

**Tabla 5.2. Resultados Porcentaje diferencia entre resultados. Fuente: Los Autores.**

La diferencia de valores se debe a que FUNDEX es mas preciso a la hora de calcular los valores, el programa no descarta decimales durante el cálculo. El otro factor para la diferencia de los resultados, se debe a la modificación del peso de la fundación. Sin embargo vemos que el programa arroja valores cercanos y satisfactorios, confirmando la validez de los cálculos con el programa.

El programa fue probado con diferentes ejemplos encontrado en libros, arrojando siempre un margen de de diferencia menor de 2%. En el ejemplo desarrollado en este capítulo la diferencia promedio fue de 0,94%.

### **5.6.2 FUNDACIONES DE MAQUINAS PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS**

Los fundamentos teóricos en el cual se basa FUNDEX es parecido al del ejemplo del artículo de “Hydrocarbon Processing”. La mayor diferencia entre ellos es que el ejemplo no toma en cuenta el factor del amortiguamiento por embutimiento. Esto trae una diferencia significativa en los cálculos.

En el ejemplo desarrollado en el artículo de “Hydrocarbon Processing” no calculan los factores para todos los modos de vibración. Compararemos los modos que calculan en el ejemplo del artículo. La tabla 5.3 nos muestra los modos comparados.

Cálculos de diseño	Modos de vibración							
	Vertical		Horizontal		Rotación			
	FUNDEX	Ejemplo	FUNDEX	Ejemplo	FUNDEX	Ejemplo		
Radio equivalente	2,35	2,32	2,35	2,32	2,31	2,28		
Constante de resorte	38.200.242,42	41.930.000,00	37.180.862,75	34.926.000,00	308.557.746,29	292.470.000,00		
Frecuencia natural	665,18	696,89	656,24	726,70	1.193,13	1.136,10		
Relación de masas	0,46	0,47	0,64	0,66	0,34	0,35		
Frecuencia de resonancia	Sobreamortiguado	1.779,10	Sobreamortiguado	840,80	1.255,83	1.155,30		
Factor de amplificación dinámica	0,38	0,43	0,50	0,55	1,42	1,54		
Amplitud máxima	0,08	0,07	0,09	0,10	0,00	0,00		
Factor de transmisibilidad	1,07	1,16	1,12	1,26	1,47	1,67		
Fuerzas y momentos transmitidos	0,00	0,00	4.458,30	5.009,34	11.867,38	13.301,06		

Tabla 5.3. Resultados Programa vs Ejemplo. Fuente: Los Autores.

La diferencia entre los resultados obtenidos por FUNDEX con los del ejemplo se muestra en la tabla 5.4.

Calculos de diseño	Diferencia		
	Vertical	Horizontal	Rotacion
Radio equivalente	1,25%	1,25%	1,27%
Constante de resorte	8,90%	6,46%	5,50%
Frecuencia natural	4,55%	9,70%	5,11%
Relacion de masas	1,93%	1,83%	2,89%
Frecuencia de resonancia	-	-	8,70%
Factor de amplificacion dinamica	10,72%	9,91%	8,10%
Amplitud maxima	11,38%	9,77%	12,41%
Factor de transmisibilidad	7,76%	11,49%	12,43%
Fuerzas y momentos transmitidos	-	11,00%	10,78%
<b>Porcentaje Promedio</b>	<b>7,30%</b>		

**Tabla 5.4. Diferencia en porcentaje de los resultados. Fuente: Los Autores.**

Como se comento anteriormente, en el artículo de “Hydrocarbon Processing”. no toman en cuenta el efecto amortiguador del embutimiento. Al despreciar el factor de embutimiento, existen frecuencias de resonancia para los modos de vibraciones verticales y horizontales, mientras que en FUNDEX, no hay frecuencia de resonancia, encontrándose el sistema en un estado Sobreamortiguado. La diferencia promedio entre lo valores es de 7,3%.

Diferentes ejercicios encontrados, fueron probados con FUNDEX. El basamento teórico entre todos es similar a la metodología desarrollada en este estudio. La única diferencia encontrada es que algunos de ellos toman en cuenta el embutimiento como un factor de amortiguación, de manera tal como lo toma FUNDEX, y otros no toman en cuenta ese factor de amortiguación referente al embutimiento. Se encontró diferencias desde 4% hasta 9% en los diferentes ejercicios probados por FUNDEX.

En la mayoría de los ejemplos encontrados, desprecian el efecto amortiguador del embutimiento, esto se hace para simplificar los calculos. Esto trae como consecuencia un sobre dimensionamiento de la fundacion. El programa FUNDEX no desprecia el efecto amortiguador del embutimiento, por lo tanto, se realiza un analisis mas preciso de la fundacion, evitando sobredimensionamientos, esto nos evita gasto excesivo en material y mano de obra, al momento de construir una fundacion..

## CONCLUSIONES

- Luego de un estudio teórico, de los modelos matemáticos actuales, se determino una metodología para el análisis dinámico de fundaciones. Esta metodología estudia los parámetros de diseño más importantes en las fundaciones. Dicha metodología es presentada de manera secuencial, para el fácil entendimiento del lector.
- La metodología obtenida en este proyecto fue compilada en un programa con una interfaz amigable y de fácil uso para el usuario. Con este programa, se reducen los tiempos para el cálculo de los parámetros y se obtienen resultados más exactos.
- Los resultados arrojados por el programa para el análisis de fundaciones para maquinas de impacto, arrojan una diferencia de 0,5 – 2%, comparados con problemas actuales realizados por diferentes autores. Dicha diferencia confirma que los resultados arrojados por el programa para el análisis dinámico para fundaciones de maquinas de impacto están en un rango aceptable.
- Tomando en cuenta los diferentes criterios de diseños usados por la metodología y los diversos autores, los resultados arrojados por el programa para el análisis de fundaciones para maquinas reciprocantes y rotativas, arrojan una diferencia menor al 9%, comparados con problemas actuales realizados por diferentes autores. Dicha diferencia confirma que los resultados arrojados por el programa para el análisis dinámico para fundaciones de maquinas reciprocantes y rotativas están en un rango aceptable.

- Diversos autores no toman en cuenta los factores de embutimiento, una de las razones es para simplificar los cálculos. En la metodología presentada se toma en consideración los diversos factores de embutimiento. De esta manera se elabora un análisis más preciso de la fundación.
- Para las propiedades del suelo Relación de Poisson ( $\nu$ ) y módulo de corte ( $G$ ), se determinan valores aproximados válidos para su uso en la metodología. De esta manera no se necesita un estudio del suelo, para poder obtener valores aproximados de diseño válidos para el análisis dinámico.
- En el caso de diseño de máquinas de impacto si no se tiene un estudio geotécnico podemos tomar como valores preliminares de diseño el valor del coeficiente de contrapresión igual a 0,65 ( $\eta = 0,65$ ) y coeficiente de restitución igual a 0,5 ( $e = 0,5$ ).
- Es preciso conocer los datos de diseño de las máquinas para poder usar el programa FUNDEX, por lo tanto, si estos datos no son proporcionados por el fabricante, es necesario determinar las fuerzas producidas por el desbalanceo de las máquinas, así como su centro de gravedad, mediante ensayos.
- Durante el estudio de fundaciones para máquinas de impacto es muy importante considerar el peso de la fundación y su área de contacto con el suelo ya que un dimensionamiento menor al requerido puede inducir a esfuerzos y amplitudes no deseados, generando vibraciones muy altas. Para efectos del programa FUNDEX si se consideran estos dos valores menores a los requeridos el programa proporcionará una advertencia al usuario que obligará a introducir datos correctos y verificar el dimensionamiento de la fundación.

## RECOMENDACIONES

- Recomendar el uso del programa a institutos como el INPSASEL (Instituto Nacional de Prevención, Salud y Seguridad Laborales) y empresas del ramo de la seguridad industrial, para que evalúen condiciones de vibraciones perjudiciales generadas por fundaciones, en fábricas y empresas.
- Buscar la cooperación de otras facultades de la UCV, para la ayuda técnica en proyectos de este tipo. Al poder programar en otros lenguajes, es posible mejorar programas como FUNDEX, con más opciones de diseño, interfaces más amigables o simplificación en los códigos de programación
- Proponer como tema de tesis en alianza con empresas del ramo el estudio de metodologías para el análisis dinámico de fundaciones, tomando en cuenta otros aspectos de diseño, como absorbedores de vibraciones o materiales experimentales de fundación.
- Proponer otros proyectos de grado referente al tema de las fundaciones, ya que los ingenieros mecánicos, tenemos fuerte formación para realizar análisis dinámicos y de vibraciones
- Realizar un estudio en el cual se trate la metodología para analizar y/o diseñar otros tipos de fundaciones, como las fundaciones por pilotes, ya que para efectos de este Trabajo Especial de Grado solo se tomaron en cuenta fundaciones superficiales de tipo bloque y zapatas.

---

**BIBLIOGRAFIA****BIBLIOGRAFICAS**

1. TM D 3999. *“Determination of Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus”*.
2. ASTM D 4015. 1978. *“Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method”*. Philadelphia (U.S.A.).
3. ASTM D 4428/ D 4428M. 1978. *“Cross-Hole Seismic Testing”*. Philadelphia (U.S.A.).
4. ASTM D 4945. 1978. *“High-Strain Dynamic Testing of Piles”*. Philadelphia (U.S.A.).
5. BACHMAN, H., *“Vibration Problems in Structures”*, 1995. Ed. by H. Bachmann, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston. Berlin.
6. BARILLAS, Jorge, 2006. *“Apuntes de clases de Dinámica de Máquinas”*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica.
7. BARKAN, D.D., 1962. *“Dynamics of bases and foundations”*. McGraw Hill, New York, 434 p.
8. BEER, F.P., and JOHNSTON, E.R. Jr., 1997. *“Mechanics for Engineers Statics”*, McGraw-Hill, New York. 8th Edition.

9. BEREDUGO, Y. O. and NOVAK, M., 1972. "*Coupled Horizontal and Rocking Vibrations of Embedded Footings*". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 4.
10. BOWLES, J.E., 1997 "*Foundation Analysis and Design*". McGraw-Hill, New York, 5th Ed.
11. CIRERA, E. A. 1999. "*Aislamiento activo de vibraciones mediante técnicas de control*". XVIII Congreso Argentino de Control Automático. Buenos Aires Argentina.
12. DAS, B.M. 1983. "*Fundamentals of Soil Dynamics*". PWS Publishing Co, 3<sup>ra</sup> Ed.
13. DEN, Hartog, 1995. "*Mechanical Vibrations*". McGraw-Hill. New York.
14. DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK, 1997. "*Soil Dynamics and Special Design Aspects*". MIL-HDBK-1007/3.
15. DIMARONOGAS, A., 1996. "*Vibration for Engineers*", Second Edition, Prentice Hall, New Jersey.
16. FRATELLI, Mariela Graciela, 1993. "*Suelos, fundaciones y muros*". Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Civil.
17. GAZETAS, G. 1991. "*Foundation Vibrations*" Foundation Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition, Van Nostrand.

18. HUDSON, Ralph, 1975, "*Manual del Ingeniero*", Editorial Limusa, México.
19. KELLY S.G. 2000. "*Fundamentals of Mechanical Vibrations*", McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> edition. Boston.
20. KRAMER, S.L., 1996. "*Geotechnical Earthquake Engineering*", Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
21. KREYS, Edwin, 1976, "*Matemáticas Avanzadas para Ingeniería*", Editorial Limusa, México.
22. LACY, H.S. and GOULD, J.P., 1985. "*Settlement from pile driving in sands*". American Society of Civil Engineers, Proceedings of ASCE.
23. LARSON, Erick N. 1999. "*Foundations for Static Equipment*". Reported by ACI Committee 351. ACI 351.2R-94.
24. MEIROVICH, L. 1975. "*Elements of Vibration Analysis*". McGraw Hill, New York.
25. MOTT, Robert, 1.995. "*Diseño de Elementos de Máquinas*", Editorial Prentice Hall, 2<sup>a</sup> edición, México.
26. PDVSA. 1991. Manual de Ingeniería de Diseño. "*Fundaciones para Bombas*". Volumen 18-I. Guía de Ingeniería PDVSA n° 0602.1.414.

27. PDVSA. 1991. Manual de Ingeniería de Diseño. "***Fundaciones para Compresores Reciprocantes***". Volumen 18-I. Guía de Ingeniería PDVSA n° 90615.1.002.
28. PDVSA. 1991. Manual de Ingeniería de Diseño. "***Fundaciones para Bombas Reciprocantes***". Volumen 18-I. Guía de Ingeniería PDVSA n° 90615.1.006.
29. PDVSA. 1991. Manual de Ingeniería de Diseño. "***Fundaciones de Compresores Reciprocantes***". Volumen 18-I. Guía de Ingeniería PDVSA n° L-STC-003.
30. PRAKASH, S., 1981. "***Soil Dynamics***", McGraw-Hill Book Co., New York.
31. PRAKASH, S., and PURI, V., 1988. "***Foundations for Machines: Analysis and Design***", John Wiley & Sons. New York.
32. RAO, S. S., 1994. "***Mechanical Vibrations***", 3rd Edition, Addison Wesley, New York.
33. RICHART, F.E., HALL, J.R. and WOODS, R.D., 1970. "***Vibrations of soils and foundations***". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 414 p.
34. RICHART, F. E., Jr., "***Foundation Vibrations***", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 86, No. SM4, 1960.
35. ROCA VILA, R. y LEÓN, J. 1981. "***Vibraciones Mecánicas***". Editorial Limusa. México, 400 p.

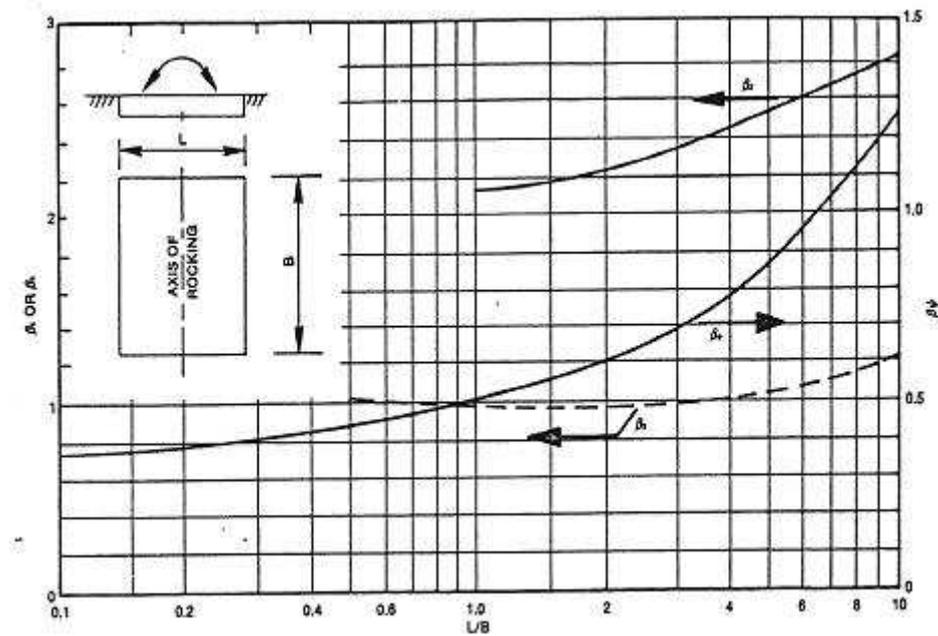
36. SALAZAR D. Luis A., BORJASs C. Leonardo E., 2007. ***“Estudio de un modelo de generación de ruido del tráfico vehicular en vías de alta densidad”***. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica.
37. SHIGLEY, Joseph, 1.999. ***“Diseño en Ingeniería Mecánica”***, Editorial Mc Graw Hill, 4ª edición, México.
38. STEIDEL, Robert F. 1.999. ***“Introducción al estudio de las vibraciones mecánicas”*** Compañía Editorial Continental S.A.México.
39. SURESH C. Arya, ROLAND, P., DREWYER. ***“Foundation design for reciprocating compressors”*** The CE-Lummus. Houston and George Pincus, University of Houston, Houston.
40. SURESH C. Arya, 1979. ***“Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines”***. Gulf Publishing Company, Houston.
41. THOMSON, W. 1993. ***“Theory of Vibration with Applications”***, Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey.
42. TIMOSHENKO, S, 1.976, ***“Resistencia de Materiales”***. Editorial Espasa – Calpe, Madrid.
43. YÉVENES, U. Fernando. 2006. ***“Fundaciones de equipos reciprocantes”***.
44. ZILL, Dennis, 1.997, ***“Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado”***, International Thomson Editores, 6ª edición, México.

## **ELECTRONICAS**

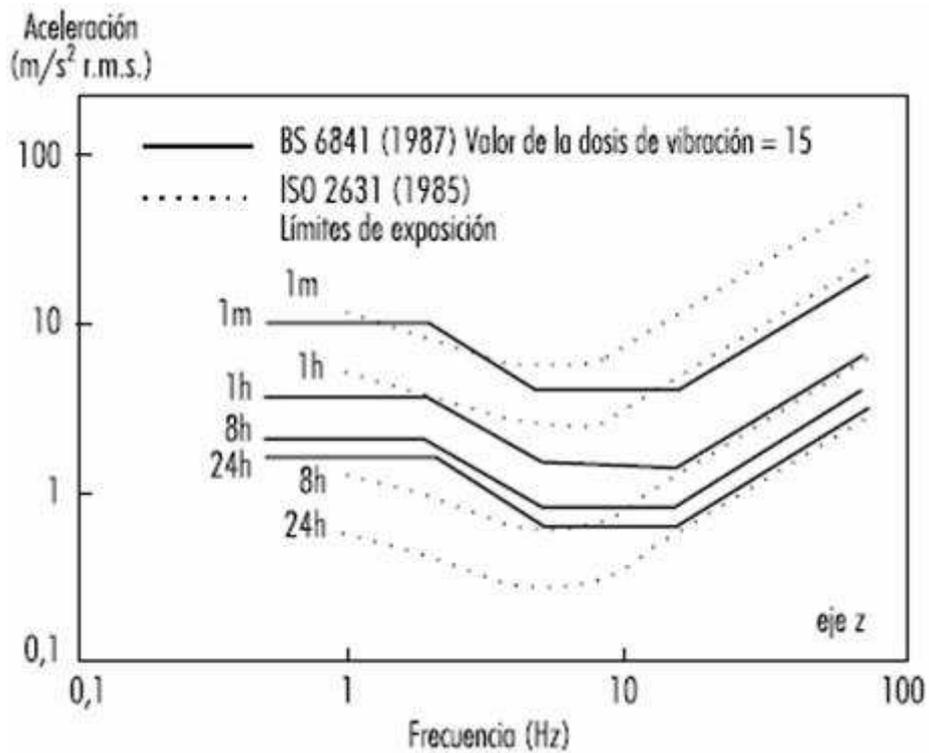
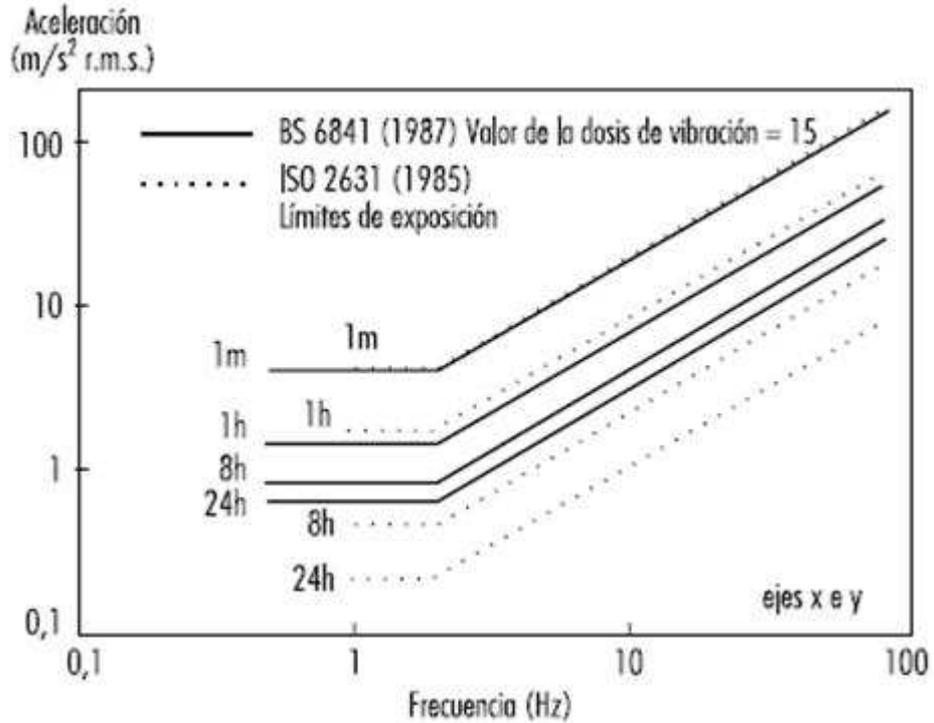
1. ARQHYS, “*Tipos de cimentaciones*”. Disponible en:  
<http://www.arqhys.com/articulos/cimientos-tipos.html> Consultado [2008, Junio, 3]
2. CIMIENTOS BYA, “*Fundaciones Profundas*”. Disponible en:  
<http://www.cimientosbya.com/es/typ.htm> Consultado [2008, Junio, 5]
3. ARQUITECTUBA, “*Excavación para cimientos*”. Disponible en:  
<http://www.arquitectuba.com.ar/monografias-de-arquitectura/excavacion-para-cimientos/> Consultado [2008, Agosto, 11]
4. CONSTRUMATICA, “*Cimentaciones*”. Disponible en:  
<http://www.construmatica.com/construpedia/Cimentaciones>  
Consultado [2008, Agosto, 12]
5. WIKIPEDIA, “*Cimentación*”. Disponible en:  
<http://es.wikipedia.org/wiki/Cimentaci%C3%B3n> Consultado [2008, Julio, 7]
6. CAPOTE, Abreu. “*La Mecánica de Suelos y las Cimentaciones*”.  
Disponible en: <http://documentos.arq.com.mx/Detalles/17.html>  
Consultado [2007, Octubre, 16]

7. SVINKIN, M.R, “*Vibration Prediction*”. Disponible en:  
<http://www.vulcanhammer.net/svinkin/prediction.php> Consultado [2007, Diciembre, 12]
8. BOUNDS, William L. “*Foundations for Dynamic Equipment*”. Disponible en:  
[http://www.concrete.org/GENERAL/ACI%20351.3R\(04\)-Foundations-for-Dynamic-Equipment.pdf](http://www.concrete.org/GENERAL/ACI%20351.3R(04)-Foundations-for-Dynamic-Equipment.pdf) [2007, Noviembre, 6]
9. PRAKASH, S., “*Soil Dynamics*”, Disponible en:  
<http://books.google.co.ve/books?hl=es&lr=&id=3ePSnCRi5kUC&oi=fnd&pg=PR15&dq=PRAKASH,+S.,+%E2%80%9CSoil+Dynamics%E2%80%9D,+McGraw-Hill,+Inc.&ots=k3-PYphlXU&sig=4lWi5Dsvbmjmn6FbtsNdE-9r15o#PPT1,M1>  
Consultado [2007, Noviembre, 8]
10. RICHART, F.E. Jr. “*Journal of Soil and foundations*”. Disponible en:  
[http://books.google.co.ve/books?hl=es&lr=&id=nKPbtkrmMNsC&oi=fnd&pg=PA66&dq=RICHART,+F.+E.,+Jr.,+%E2%80%9CFoundation+Vibrations%E2%80%9D,+Journal+of+Soil+Mechanics+and+Foundations+Division,+Vol.+86,+No.+SM4,+1960.&ots=izZm61VED8&sig=ldl4B7D4\\_XgeEH0Ia17mm9FF7pE#PPA67,M1](http://books.google.co.ve/books?hl=es&lr=&id=nKPbtkrmMNsC&oi=fnd&pg=PA66&dq=RICHART,+F.+E.,+Jr.,+%E2%80%9CFoundation+Vibrations%E2%80%9D,+Journal+of+Soil+Mechanics+and+Foundations+Division,+Vol.+86,+No.+SM4,+1960.&ots=izZm61VED8&sig=ldl4B7D4_XgeEH0Ia17mm9FF7pE#PPA67,M1)  
Consultado [2008, Enero, 26]

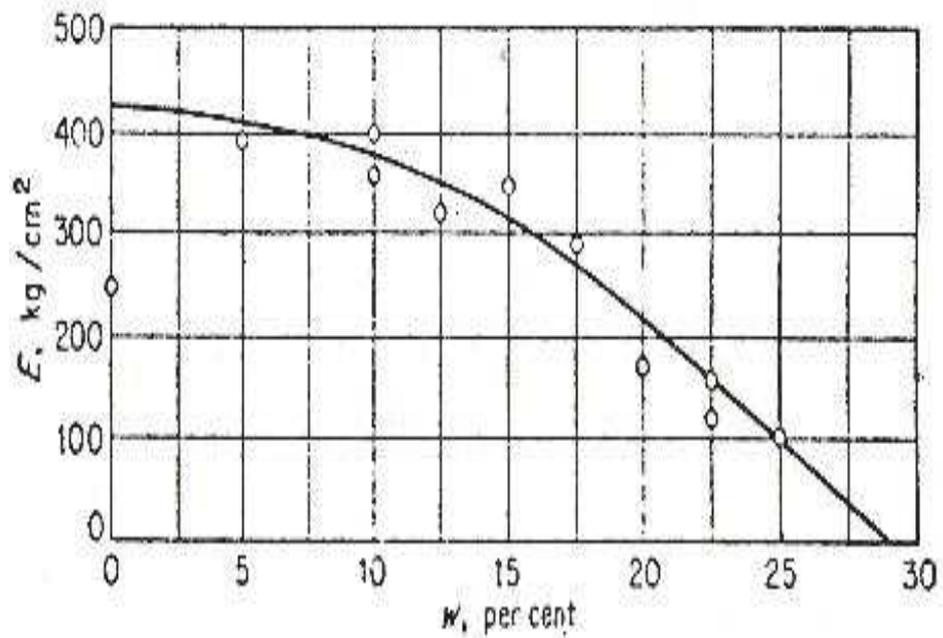
## ANEXOS

A.1 COEFICIENTES  $\beta_z$ ,  $\beta_x$ , y  $\beta_\psi$  PARA BASES RECTANGULARES.

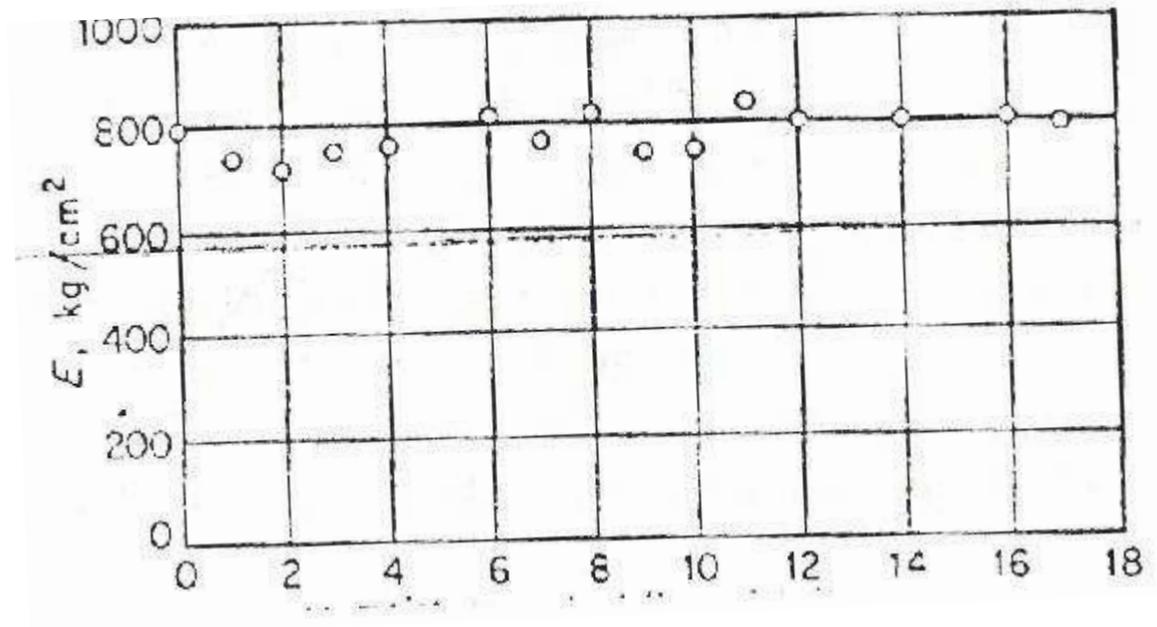
**A.2 DEPENDENCIAS DE LA FRECUENCIA EN CIANTO A LA RESPUESTA HUMANA A LA VIBRACIÓN DE CUERPO COMPLETO.**



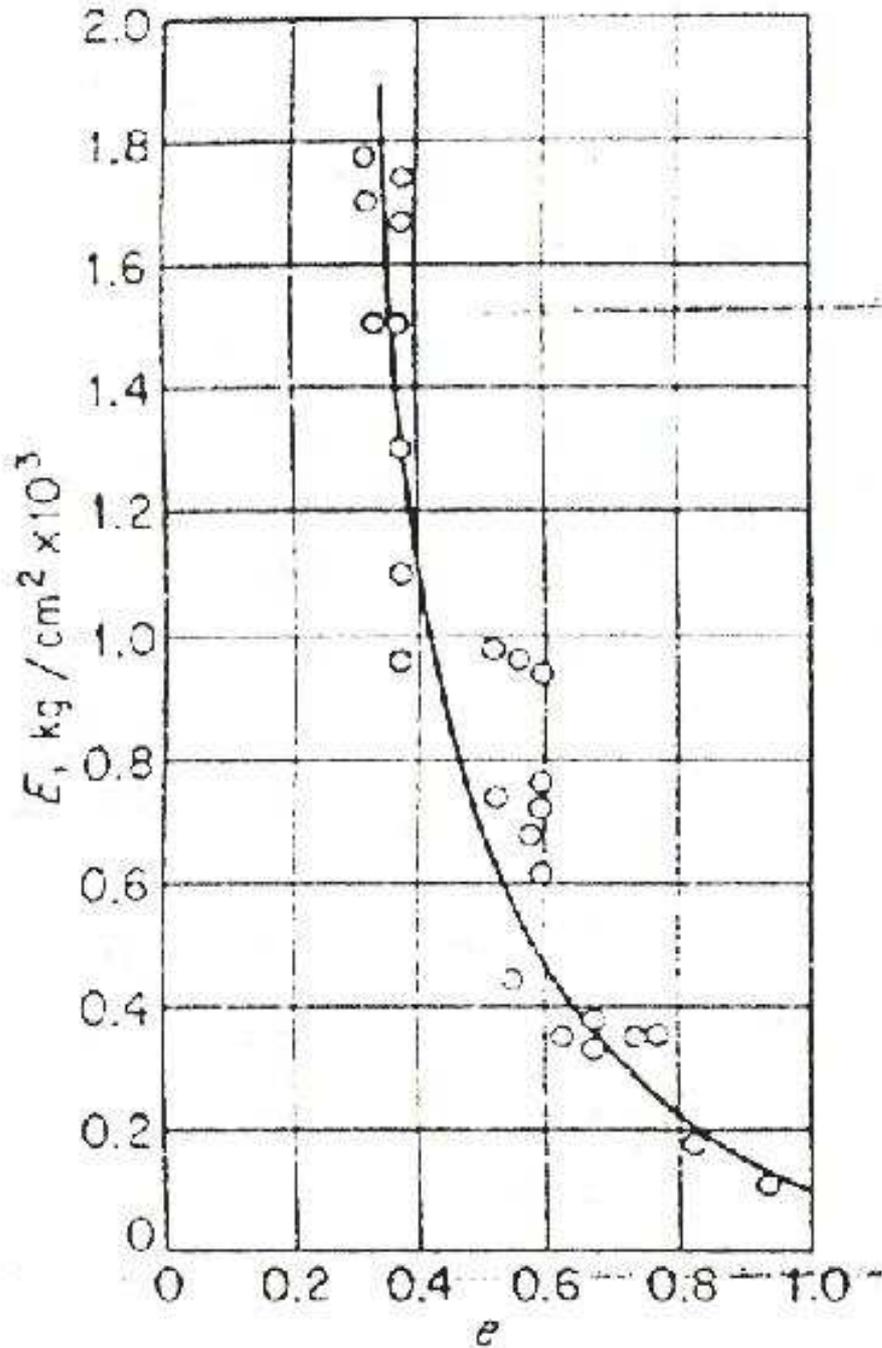
**A.3 MODULO DE YOUNG'S PARA SUELOS DE ARCILLA CON  
VARIACIÓN EN EL CONTENIDO DE AGUA.**



**A.4 MODULO DE YOUNG'S PARA SUELOS DE ARENA CON  
VARIACIÓN EN EL CONTENIDO DE AGUA.**



**A.5 MODULO DE YOUNG'S PARA SUELOS DE ARCILLA CON VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE VACIO  $e$ .**



**A.6 VALORES DEL MODULO DE YOUNG'S PARA DIFERENTES  
TIPOS DE SUELOS.**

Plastic silty clay with sand and organic silt.....	310
Brown saturated silty clay with sand	440
Dense silty clay with some sand...	2,950
Medium moist sand.....	540
Gray sand with gravel.....	540
Fine saturated sand.....	850
Medium sand.....	830
Loess.....	1,000–1,300
Loessial soil.....	1,200

**A.7 VALORES DE COEFICIENTES DE COMPRESION ELASTICA  
UIFORME  $c_u$  DE ARENA MEDIA PARA DIFERENTES AREAS  
CARGADAS.**

$A, \text{ cm}^2$	$c_u, \text{ kg/cm}^3$	
	Experimental	Computed
200	30.0	30.0
500	18.0	18.8
1,000	11.4	13.4
3,000	8.9	7.7
7,500	6.6	4.9

**A.8 VALORES DE COEFICIENTES DE COMPRESION ELASTICA  
UIFORME  $c_u$  DE ARCILLA SATURADA PARA DIFERENTES AREAS  
CARGADAS.**

$A, m^2$	$c_u, kg/cm^3$	
	Experimental	Computed
8	2.05	2.2
4	2.5	3.12
2	4.4	4.4

**A.9 VALORES DE COEFICIENTES DE COMPRESION ELASTICA  
UIFORME  $c_u$  DE LOESS PARA DIFERENTES AREAS CARGADAS.**

$A, m^2$	$c_u, kg/cm^3$	
	Experimental	Computed
0.81	14.2	14.2
1.4	10.8	10.6
2.0	10.2	9.0
4.0	8.0	6.4

El Loess (del Alemán de Suiza *lösch*) es un material geológico sedimentario eólico. Lo forman depósitos de limo originados por la deposición de partículas muy finas con tamaños que van desde los 10 a los 50 micrómetros y que son transportadas por las tormentas de polvo a lo largo de miles de años. Es de color amarillento, deleznable y carece de estratificación. Está formado principalmente por silicio, carbonato de calcio (piedra caliza), finísimos detritos orgánicos y arcillas. Constituyen un suelo de labor muy fértil y profundo.

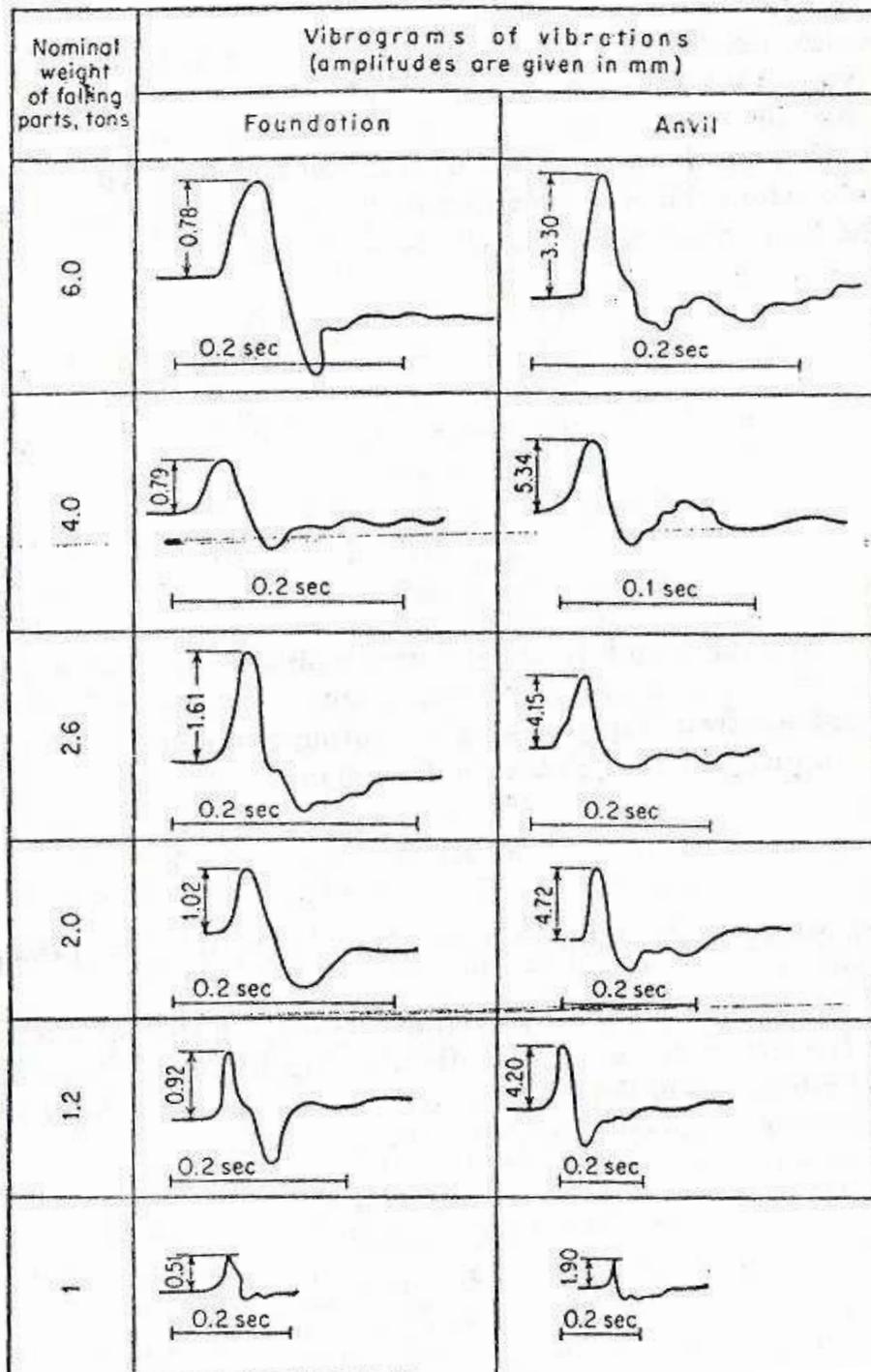
**A.10 PROMEDIO DE VALORES DEL COEFICIENTES DE  
COMPRESION ELASTICA UIFORME  $c_u$  DE DIFERENTES SUELOS**

Description of soil	Tentative value of permissible load on soil, kg/cm <sup>2</sup>	Coefficient of elastic uniform compression $c_u$ , kg/cm <sup>2</sup>	Contact areas of foundation bases, m <sup>2</sup> ; types of tests - (D = dynamic; S = static)
Gray plastic silty clay with sand and organic silt.....	1.0	1.4	1.5, 1.0, 0.5 (S; D)
Brown saturated silty clay with sand.....	1.5	2.0	8.0, 4.0, 2.0 (S; D)
Dense silty clay with some sand (above ground-water level).....	Up to 5	10.7	8.9 (D)
Medium moist sand.....	2	2.0	1.5 (D)
Dry sand with gravel.....	2	2.0	0.25 (D)
Fine saturated sand.....	2.5	3.0-3.5	11.6 (D)
Medium sand.....	2.5	3.1	8.75 (D)
Gray fine dense saturated sand.....	2.5	3.4	up to 15 (S; D)
Loess with natural moisture content.....	3	4.5	0.81, 1.4, 2.0, 4.0 (S; D)
Moist loessial soil.....	3	4.7	90 (a foundation for compressor) (D)

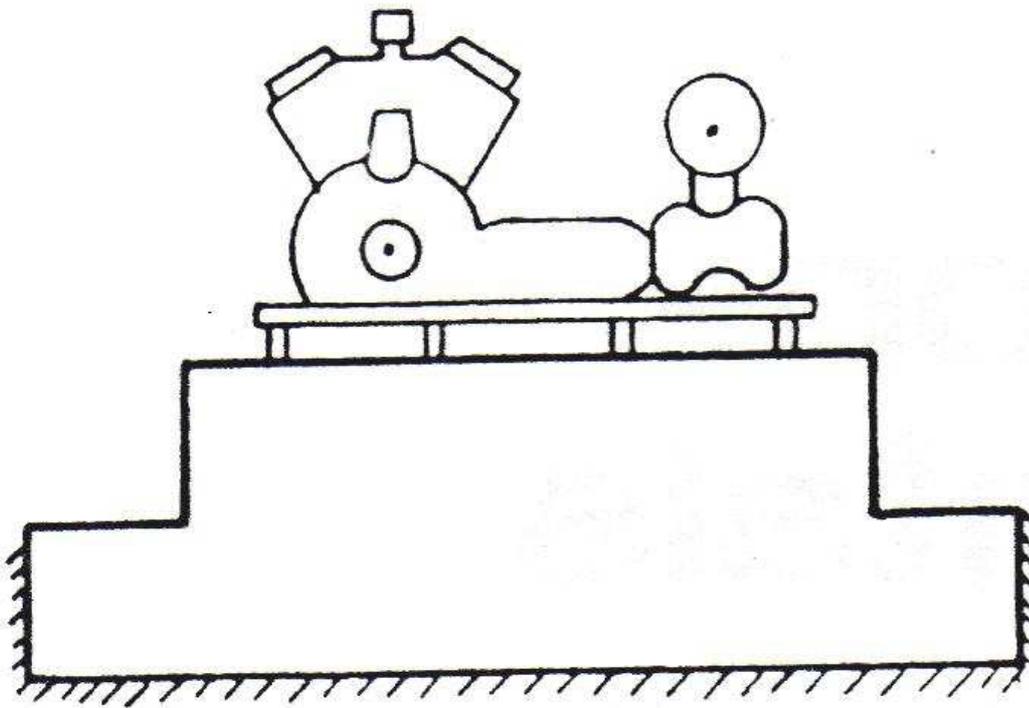
**A.11 VALORES DE DISEÑO RECOMENDADOS DEL COEFICIENTE DE  
ELASTICIDAD UNIFORME  $c_u$**

Soil group category	Soil group	Permissible load on soil under action of static load only, kg/cm <sup>2</sup>	Coefficient of elastic uniform compression $c_u$ , kg/cm <sup>2</sup>
I	Weak soils (clays and silty clays with sand, in a plastic state; clayey and silty sands; also soils of categories II and III with laminae of organic silt and of peat).....	Up to 1.5	Up to 3
II	Soils of medium strength (clays and silty clays with sand, close to the plastic limit; sand).....	1.5-3.5	3-5
III	Strong soils (clays and silty clays with sand, of hard consistency; gravels and gravelly sands; loess and loessial soils).....	3.5-5	5-10
IV	Rocks.....	greater than 5	greater than 10

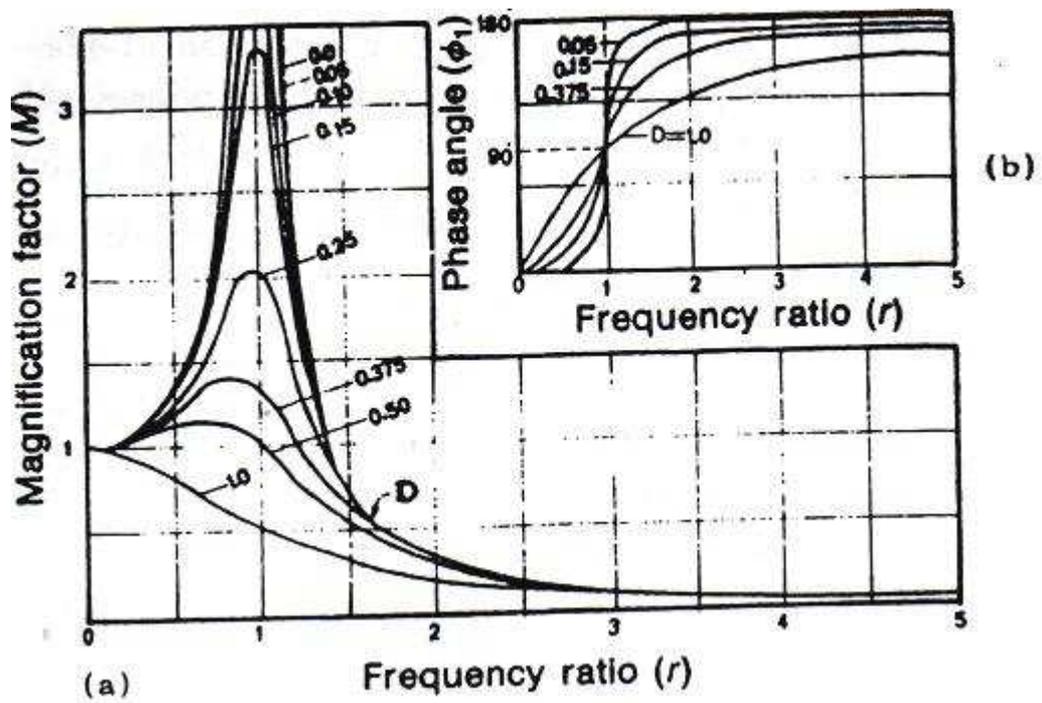
### A.12 VIBROGRAMAS DE OPERACIÓN DE FUNDACIONES PARA MARTILLOS



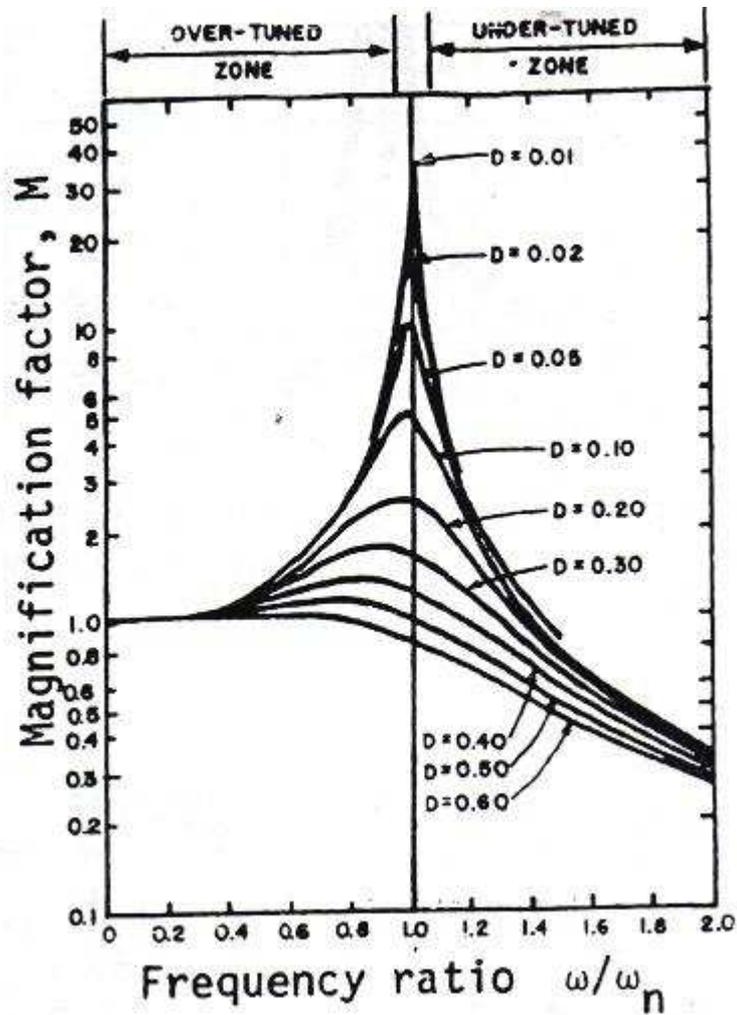
***A.13 FUNDACION TIPO BLOQUE SOPORTANDO UN COMPRESOR RECIPROCANTE***



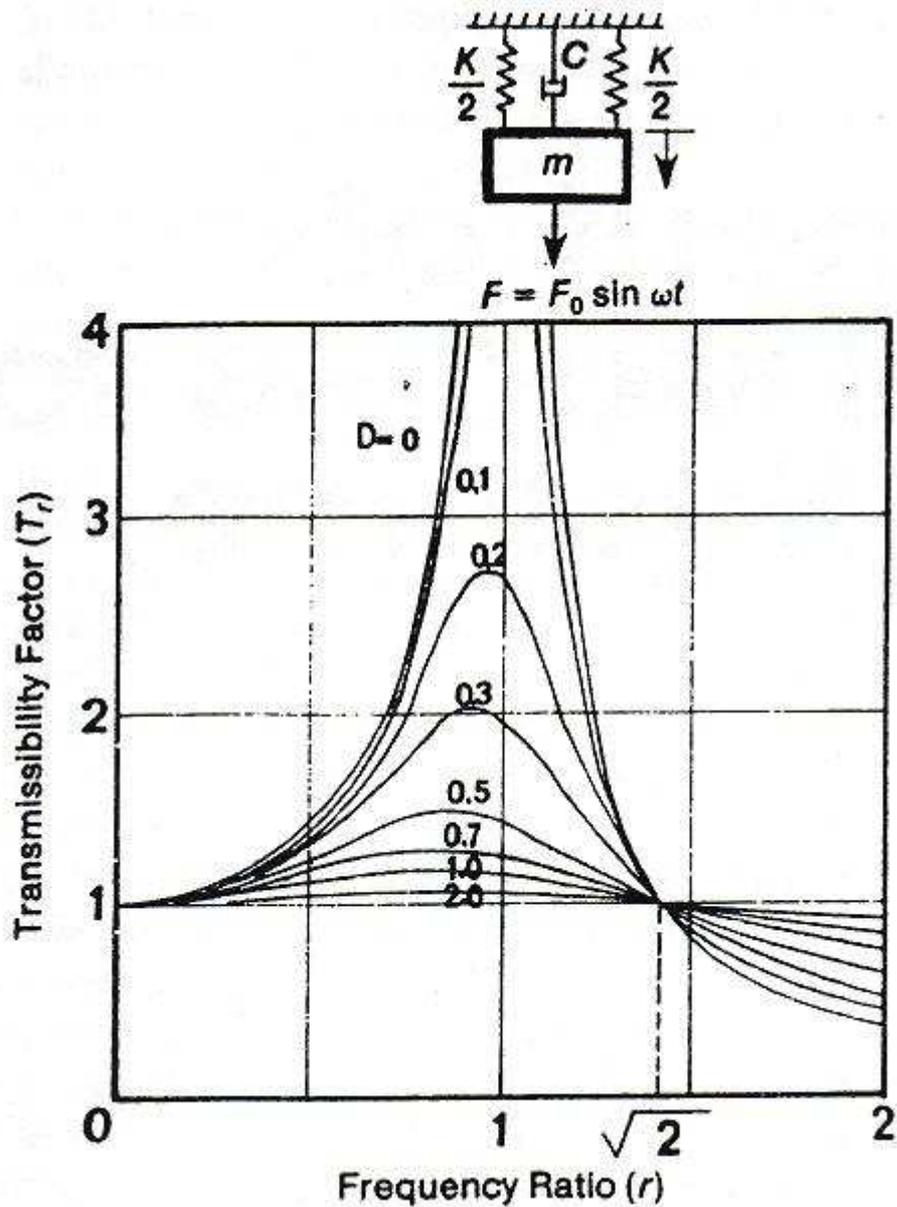
**A.14 (a) FACTOR DE MAGNIFICACION CONTRA LA RELACION DE FRECUENCIAS. (b) ANGULO DE FASE CONTRA LA RELACION DE FRECUENCIA.**



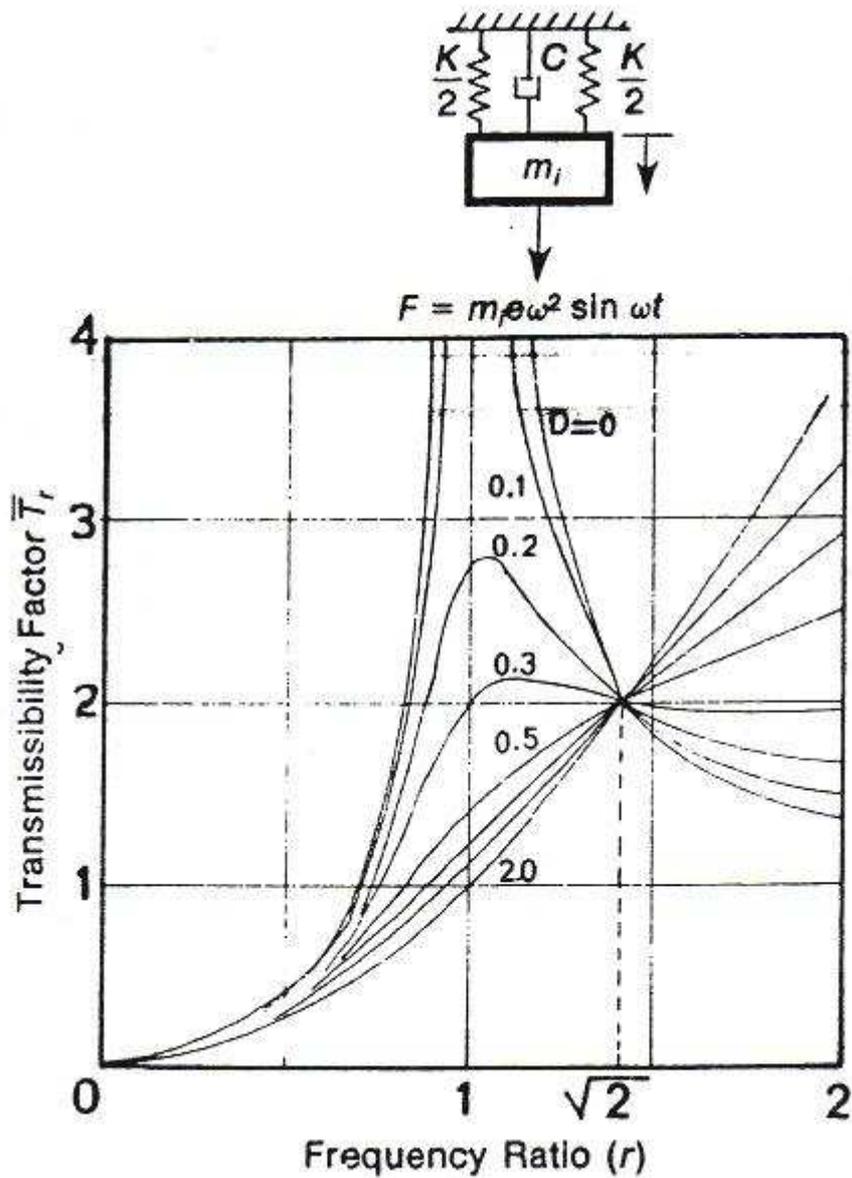
**A.15 FACTOR DE MAGNIFICACION CONTRA LA RELACION DE FRECUENCIA DE VARIAS RELACIONES DE AMORTIGUAMIENTO.**



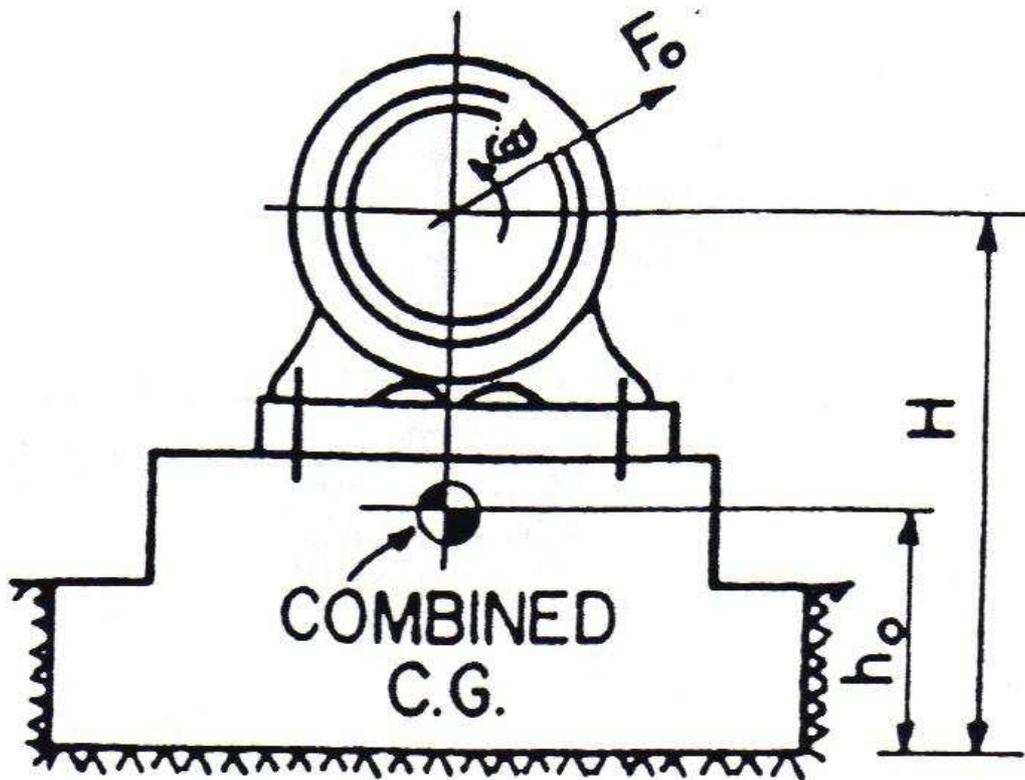
**A.16 FACTOR DE TRANSMISIBILIDAD CONTRA LA RELACION DE FRECUENCIA DE VARIAS RELACIONES DE AMORTIGUAMIENTO.**



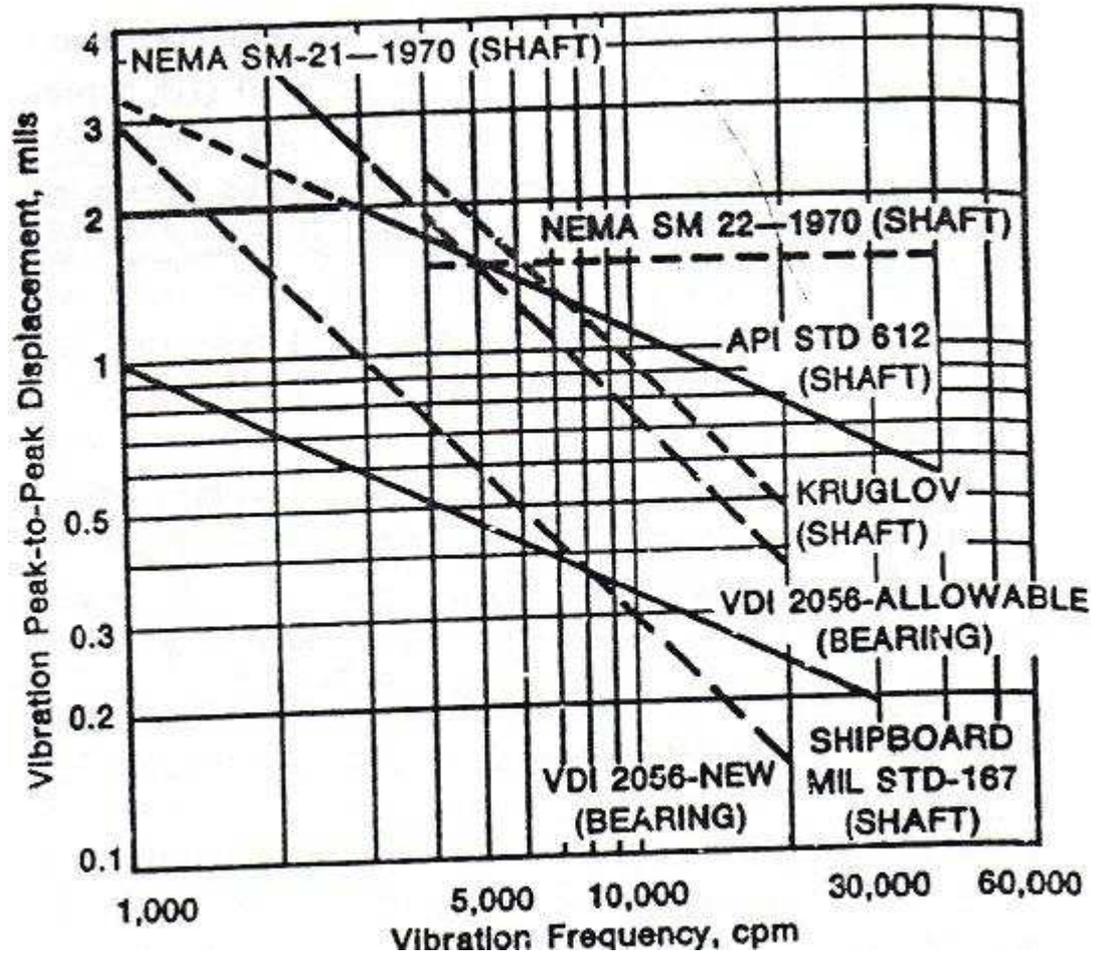
**A.17 FACTOR DE TRANSMISIBILIDAD CONTRA LA RELACION DE FRECUENCIA DE VARIAS RELACIONES DE AMORTIGUAMIENTO.**



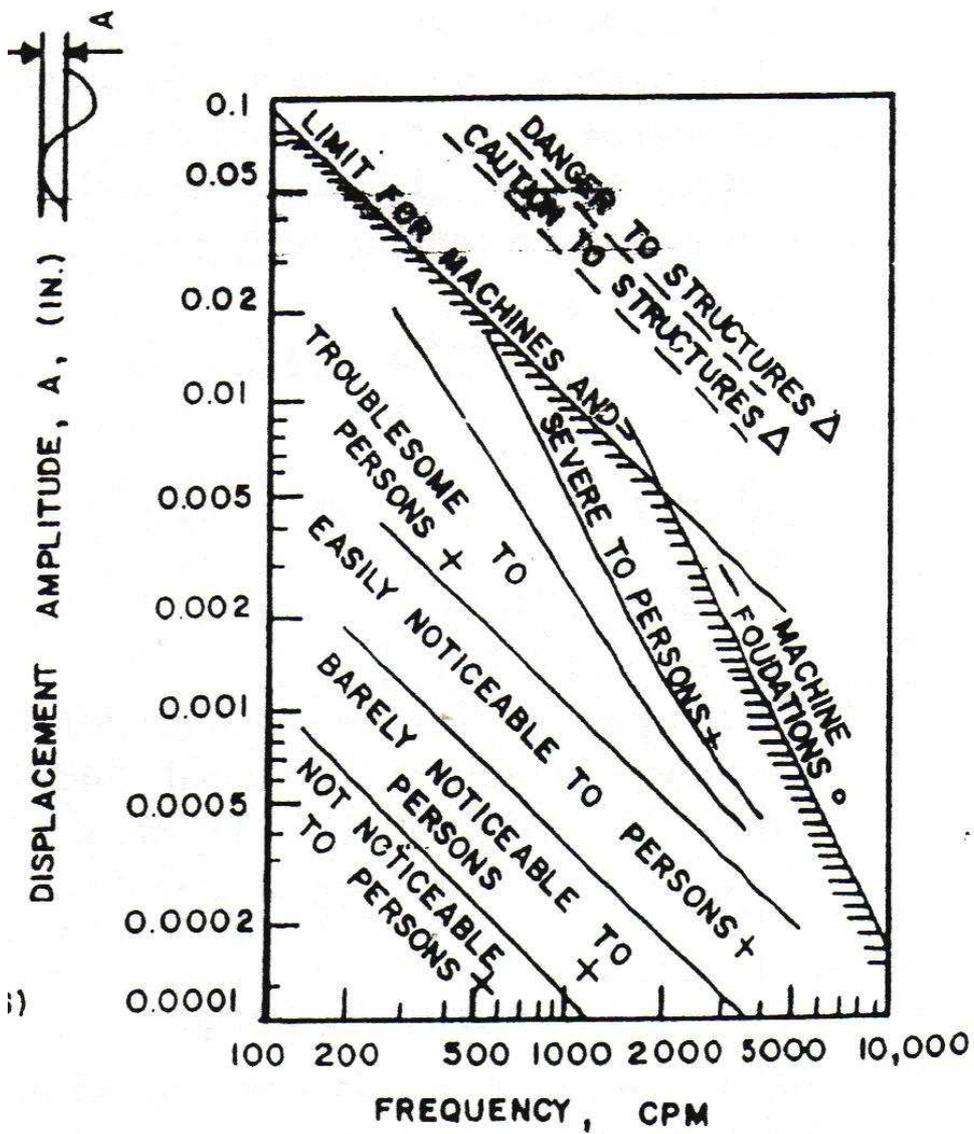
**A.18 MAQUINA VIBRANDO SOPORTADA POR UNA FUNDACION TIPO BLOQUE.**

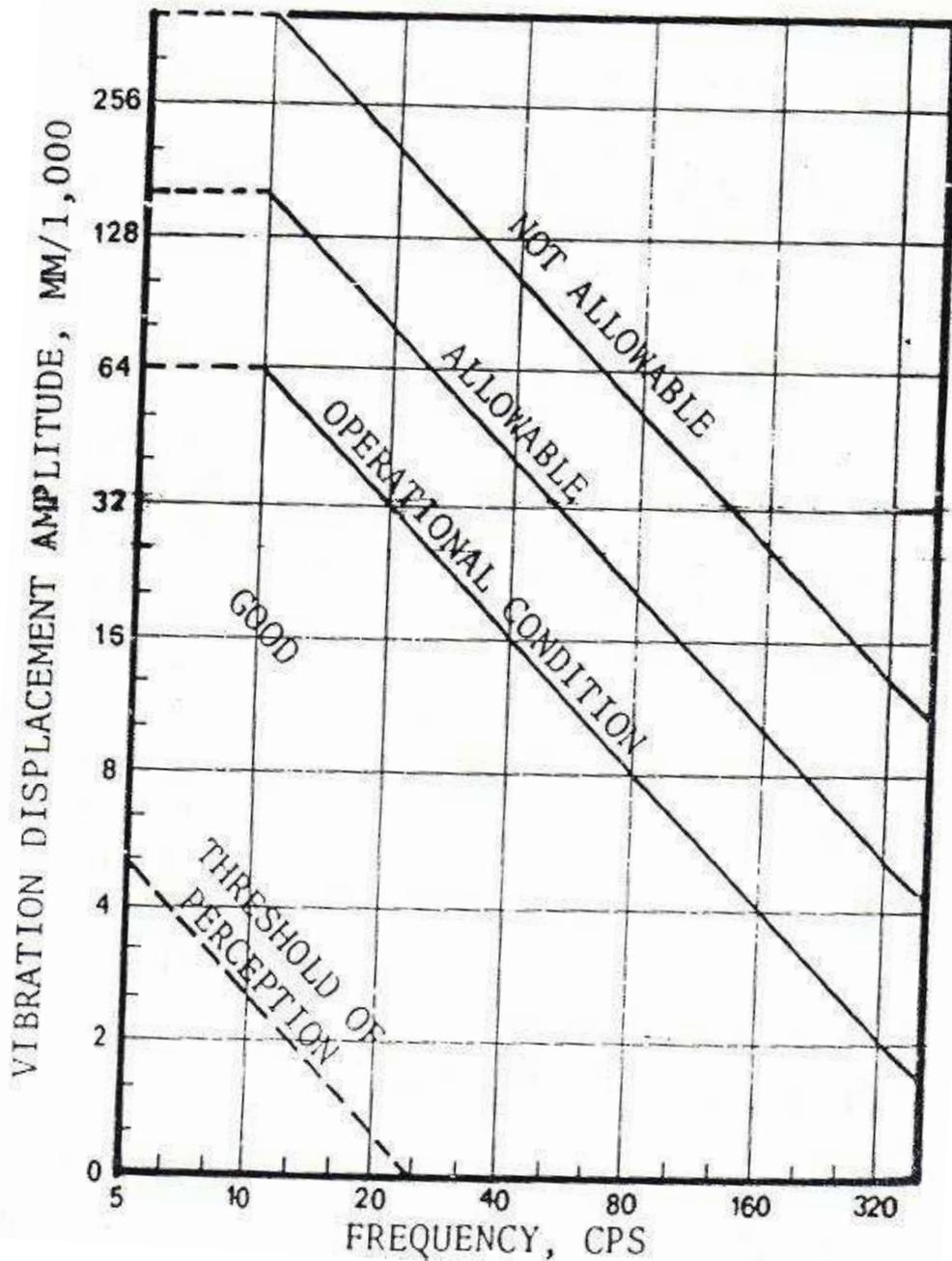


**A.19 CLASIFICACION DE SEVERIDAD DE VIBRACION DE MAQUINARIA**

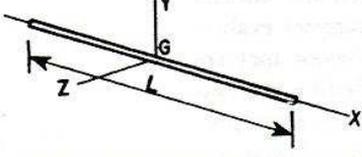
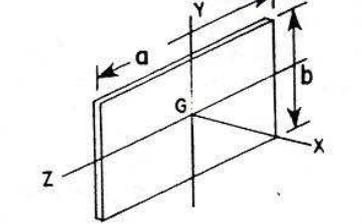
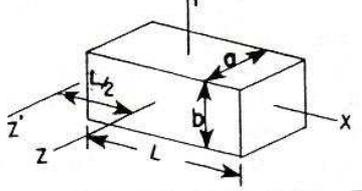
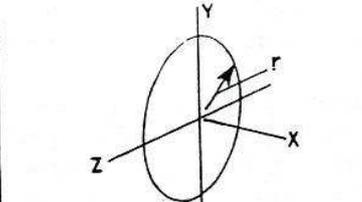
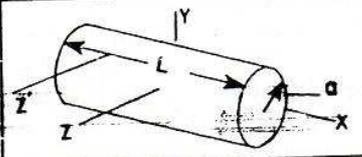
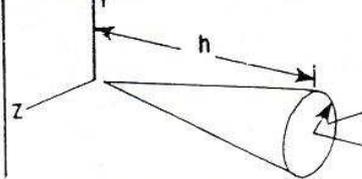
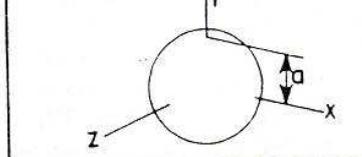


**A.20 RELACION DE AMPLITUD DE DESPLAZAMIENTO CONTRA FRECUENCIA.**



**A.21 LIMITES DE VIBRACION PARA TURBOMAQUINAS.**

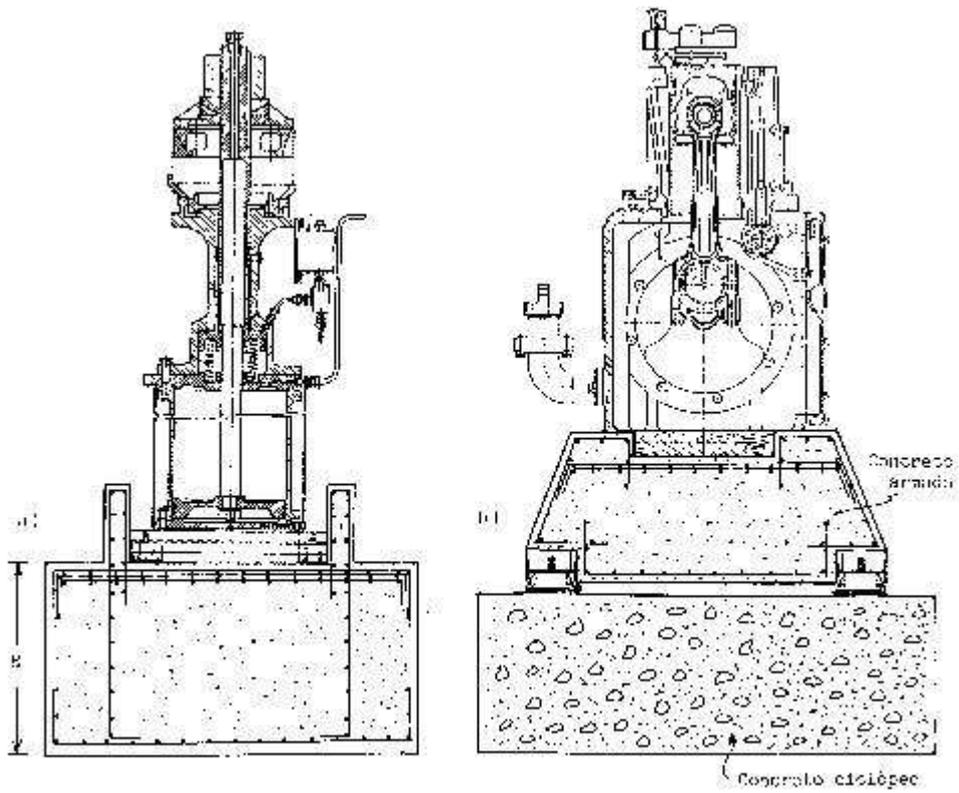
**A.22 MOMENTOS DE INERCIA DE FORMAS GEOMETRICAS COMUNES.**

<p>SLENDER ROD</p>		$I_y = I_z = \frac{1}{12} mL^2$
<p>THIN RECTANGULAR PLATE</p>		$I_x = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$ $I_y = \frac{1}{12} ma^2$ $I_z = \frac{1}{12} mb^2$
<p>RECTANGULAR PRISM</p>		$I_x = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$ $I_y = \frac{1}{12} m (a^2 + L^2)$ $I_z = \frac{1}{12} m (b^2 + L^2)$ $I_{z'} = I_z + mL^2/4$
<p>THIN DISK</p>		$I_x = \frac{1}{2} mr^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{4} mr^2$
<p>CIRCULAR CYLINDER</p>		$I_x = \frac{1}{2} ma^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{12} m (3a^2 + L^2)$ $I_{z'} = I_z + mL^2/4$
<p>CIRCULAR CONE</p>		$I_x = \frac{3}{10} ma^2$ $I_y = I_z = \frac{3}{5} m (\frac{1}{4} a^2 + h^2)$
<p>SPHERE</p>		$I_x = I_y = I_z = \frac{2}{5} ma^2$

**A.23 LIMITES DE AMPLITUDES PARA VIBRACIONES PRODUCIDAS  
POR FUERZAS DE EXCITACIÓN.**

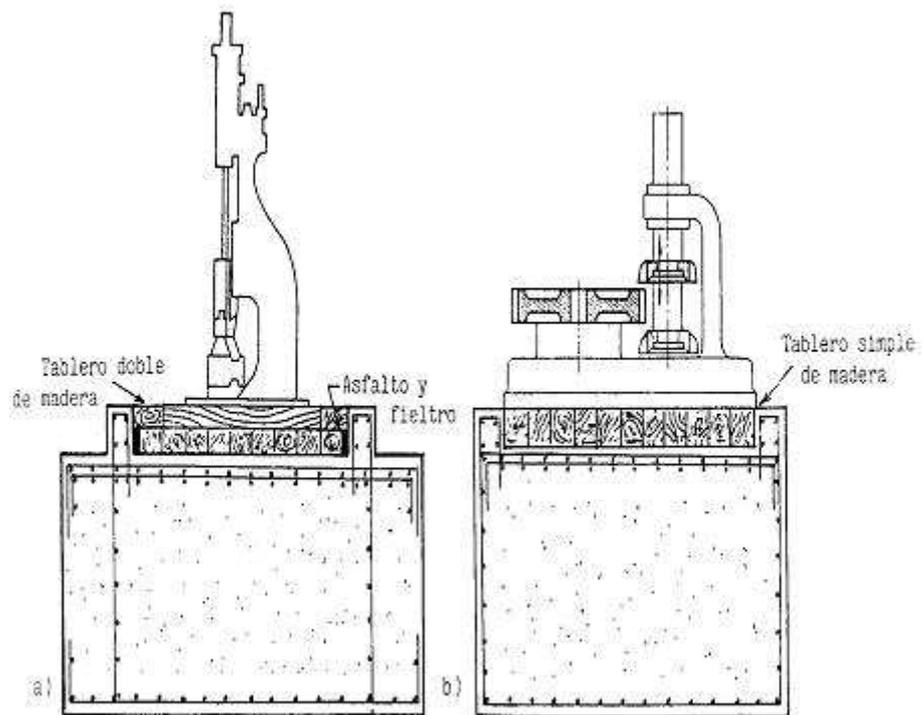
Tipo de vibraciones	Amplitudes máximas admisibles $A_{adm}$ en mm. para máquinas con frecuencia operacional en rev/min							
	rev/min < 500	500	750	1.000	1.500	3.000	5.000	10.000
Horizontales	0,2	0,16	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,0075
Verticales	0,15	0,12	0,09	0,075	0,06	0,03	0,015	0,005

### A.24 FUNDACIONES DE BLOQUE O MACIZAS.



**A.25 ALTURA MINIMA DE LA FUNDACION EN MAQUINAS DE IMPACTO.**

Peso del mazo (t)	H <sub>min</sub> (m)
≤ 1	1
2	1,25
3	1,5
4	1,75
5	2
6	2,25
> 6	3

**A.26. SOPORTE DE MADERA ENTRE LA FUNDACION Y LA MAQUINA.**

**A.27. CARACTERISTICAS DE RESISTENCIA DE ALGUNOS TIPOS DE MADERA.**

Espece de madera	Módulo de elasticidad E (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión $f_c$ (Kg/cm <sup>2</sup> ) (   a la veta)	Resistencia a tracción $f_t$ (Kg/cm <sup>2</sup> ) (   a la veta)	Resistencia a flexión $f_b$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a corte $f_v$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
ABEDUL	A la compresión : 100.000 a 180.000 A la tracción : 105.000 a 130.000	165	200 a 260	260	13
ABETO BLANCO		140 a 175	150 a 400	300	12
ABETO ROJO		140 a 220	300 a 320	280	9,5
ALERCE		180	350 a 450	300	13
CASTAÑO		115	150 a 400	250	10
CIPRES		150	280 a 350	220	11,2
ENCINA		170 a 200	350 a 450	300	11,6
FRESNO		150	280 a 350	220	14
HAYA		170	350 a 500	320	11,2
NOGAL		200	350 a 500	320	15,8
OLMO		140	300 a 400	220	14
PINO DE NORUEGA		115 a 150	360 a 450	300	9,5
PINO SIRIANO		180	360 a 450	250	14,4
ROBLE ROJO Y BLANCO		140	300 a 400	220	14
TUPELO		110	160 a 200	150	11,2

**A.28. ESPESORES MINIMOS DE SOPORTES DE MADERA**

Peso del martillo (t)	Martinete de forja	Martinete de acción simple	Martinete de acción doble
≤ 1	0,2	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4
2	0,2 a 0,4	0,2 a 0,3	0,5
3	0,4 a 0,6	0,3 a 0,4	0,6
5	0,6 a 0,8	0,4 a 0,6	0,8 a 1
10	0,8 a 1	0,6 a 0,9	1,2 a 1,4

### ***A.29. LISTADO CODIGO DEL PROGRAMA “FUNDEX”***

Listamos el código fuente del programa para el análisis dinámico de fundaciones “FUNDEX”. Esta listado siguiendo el orden de los distintos formularios del programa:

#### ***FORMULARIO MENU PRINCIPAL:***

```
Public selectedIndex As Integer
Public openWindows As Integer

Private Sub Form_Activate()
    Shape1.Visible = False
End Sub

Private Sub Form_Deactivate()
    Shape1.Visible = True
End Sub

Private Sub Form_GotFocus()
    If Me.Enabled = True Then
        Shape1.Visible = False
    End If
End Sub

Private Sub Form_Load()
    selectedIndex = 0
    openWindows = -1
End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    End
End Sub
```

\*\*\*\*\* CODIGO EMPLEADO PARA EL MOVIMIENTO DE LOS BOTONES \*\*\*\*\*

```
Private Sub Image1_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
    Image2(selectedIndex).Picture = ImageList1.ListImages(1).Picture
End Sub
```

```
Private Sub Image2_MouseMove(Index As Integer, Button As Integer, Shift
As Integer, X As Single, Y As Single)
    Image2(Index).Picture = ImageList1.ListImages(2).Picture

    If Index <> selectedIndex Then
        Image2(selectedIndex).Picture = ImageList1.ListImages(1).Picture
        selectedIndex = Index
    End If
End Sub
```

```
Private Sub Label1_MouseMove(Index As Integer, Button As Integer, Shift
As Integer, X As Single, Y As Single)
    Image2_MouseMove Index, Button, Shift, X, Y
End Sub
```

\*\*\*\*\* CODIGO EMPLEADO PARA EL MOVIMIENTO DE LOS  
BOTONES \*\*\*\*\*

```
Private Sub Label1_Click(Index As Integer)
On Error Resume Next
    If Index = 0 Then
        Load Frm_suelos
        Frm_suelos.Show
    ElseIf Index = 1 Then
        Load FrmMaquinas
        FrmMaquinas.Show
    Else
        End
    End If
    Me.Enabled = False

End Sub
```

***FORMULARIO ENTRADA DE DATOS FUNDACIONES PARA  
MAQUINAS DE IMPACTO:***

```
Public impac As New Maquina_Impacto
Public esEdicion As Boolean

Private Sub Cmd_ayuda_Click()
    Load Frm_Ayuda
    Frm_Ayuda.Show
End Sub
```

```
Private Sub Cmd_Borrar_Click()
```

```
Text1.Text = ""
```

```
Text2.Text = ""
```

```
Text3.Text = ""
```

```
Text4.Text = ""
```

```
Text5.Text = ""
```

```
Text6.Text = ""
```

```
Text7.Text = ""
```

```
Text8.Text = ""
```

```
Text9.Text = ""
```

```
Text10.Text = ""
```

```
Text11.Text = ""
```

```
Text12.Text = ""
```

```
Text13.Text = ""
```

```
Text16.Text = ""
```

```
Text17.Text = ""
```

```
Text18.Text = ""
```

```
Text19.Text = ""
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Cmd_Calcular_Click()
```

```
On Error GoTo vacio
```

```
impac.Nombre = Text1.Text
```

```
impac.Wn = CDBl(Text2.Text)
```

```
impac.W0 = CDBl(Text3.Text)
```

```
impac.h = CDBl(Text4.Text)
```

```
impac.A = CDBl(Text5.Text)
```

```
impac.P = CDBl(Text6.Text)
```

```
impac.Wa = CDBl(Text7.Text)
```

```
impac.A2 = CDBl(Text8.Text)
```

```
impac.b = CDBl(Text9.Text)
```

```
impac.n = CDBl(Text10.Text)
```

```
impac.Echica = CDBl(Text11.Text)
```

```
impac.Wf = CDBl(Text12.Text)
```

```
impac.Af = CDBl(Text13.Text)
```

```
impac.P0 = CDBl(Text16.Text)
```

```
impac.E = CDBl(Text17.Text)
```

```
impac.Cu = CDBl(Text18.Text)
```

```
impac.CuIni = CDBl(Text18.Text)
```

```
impac.K = CDBl(Text19.Text)
```

```
'impac.alpha = CDBl(Text20.Text)
```

```
impac.calcular
```

```
Unload Me
```

```
Load Frm_analisis
```

```
Frm_analisis.Show
Set Frm_analisis.impac = impac

Frm_analisis.Llenar
vacio:
  If Err.Number <> 0 Then MsgBox "Llene todos los datos"
End Sub

Private Sub Cmd_cancelar_Click()
  Unload Me
End Sub

Private Sub Form_Load()
  ' Text2.Text = 3
  ' Text3.Text = "3,5"
  ' Text4.Text = 1
  ' Text5.Text = "0,15"
  ' Text6.Text = 80
  ' Text7.Text = 90
  ' Text8.Text = "4,75"
  ' Text9.Text = "0,6"
  ' Text10.Text = "0,65"
  ' Text11.Text = "0,5"
  ' Text12.Text = "165,4"
  ' Text13.Text = "35,7"
  ' Text16.Text = 20
  ' Text17.Text = 50000
  ' Text18.Text = 4000
  ' Text19.Text = 3

  FrmPrincipal.Enabled = False
End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
  FrmPrincipal.Enabled = True
End Sub

Public Sub Llenar()
  Text1.Text = impac.Nombre
  Text2.Text = impac.Wn
  Text3.Text = impac.W0
  Text4.Text = impac.h
  Text5.Text = impac.A
  Text6.Text = impac.P
  Text7.Text = impac.Wa
  Text8.Text = impac.A2
```

```

Text9.Text = impac.b
Text10.Text = impac.n
Text11.Text = impac.Echica
Text12.Text = impac.Wf
Text13.Text = impac.Af
Text16.Text = impac.P0
Text17.Text = impac.E
Text18.Text = impac.CuIni
Text19.Text = impac.K
End Sub

```

***FORMULARIO ENTRADA DE DATOS DEL SUELO. FUNDACIONES  
PARA MAQUINAS RECIPROCANES Y ROTATIVAS.***

```

Public recip As New Maquina_Reciprocante
Public esEdicion As Boolean

```

```

Private Sub Cmd_Calcular_Click()
On Error GoTo vacio
    recip.Gs = CDBl(Text1.Text)
    recip.v = CDBl(Text2.Text)
    recip.h0 = CDBl(Text3.Text)
    recip.Y = CDBl(Text4.Text)
    recip.Di = CDBl(Text5.Text)
    recip.Oadm = CDBl(Text6.Text)

```

```

Unload Me
Load Frm_sistema
Set Frm_sistema.recip = recip
If (esEdicion = True) Then
    Frm_sistema.Llenar
End If

```

```

Frm_sistema.Show

```

```

vacio:

```

```

    If Err.Number <> 0 Then MsgBox "Llene todos los datos"
End Sub

```

```

Private Sub Cmd_cancelar_Click()
    Unload Me
End Sub

```

```

Private Sub Command1_Click()
    Text1.Text = ""

```

```
Text2.Text = ""
Text3.Text = ""
Text4.Text = ""
Text5.Text = ""
Text6.Text = ""
Set recip = New Maquina_Reciprocante
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
    ' Text1.Text = 703
    ' Text2.Text = "0,4"
    ' Text3.Text = "1,5"
    ' Text4.Text = 1600
    ' Text5.Text = "0,05"
    ' Text6.Text = 1
```

```
    FrmPrincipal.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
```

```
    FrmPrincipal.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Llenar()
```

```
    Text1.Text = recip.Gs
    Text2.Text = recip.v
    Text3.Text = recip.h0
    Text4.Text = recip.Y
    Text5.Text = recip.Di
    Text6.Text = recip.Oadm
```

```
End Sub
```

***FORMULARIO PARA ENTRADA DE DATOS SISTEMA.  
FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS.***

```
Public recip As Maquina_Reciprocante
```

```
Private Sub Cmd_Menu_Click()
```

```
    Text1.Text = ""
    Text2.Text = ""
    Text3.Text = ""
    Text4.Text = ""
    Text5.Text = ""
    Text6.Text = ""
    Text7.Text = ""
    Text8.Text = ""
```

```
Text9.Text = ""  
Text10.Text = ""  
Text11.Text = ""  
Text12.Text = ""  
Text13.Text = ""  
Text14.Text = ""  
Text15.Text = ""  
Text16.Text = ""  
Text17.Text = ""
```

```
recip.Nombre = ""  
recip.Wt = 0  
recip.m = 0  
recip.b = 0  
recip.L = 0  
recip.X0 = 0  
recip.Y0 = 0  
recip.Z0 = 0  
recip.Ix = 0  
recip.Iy = 0  
recip.Iz = 0  
recip.Fx = 0  
recip.Fy = 0  
recip.Fz = 0  
recip.W = 0  
recip.Mox = 0  
recip.Moy = 0  
recip.Moz = 0
```

End Sub

```
Private Sub Cmd_siguiente_Click()
```

```
On Local Error GoTo vacio
```

```
recip.Nombre = Text18.Text  
recip.Wt = CDBl(Text1.Text)  
recip.m = CDBl(Text2.Text)  
recip.b = CDBl(Text3.Text)  
recip.L = CDBl(Text4.Text)  
recip.X0 = CDBl(Text5.Text)  
recip.Y0 = CDBl(Text6.Text)  
recip.Z0 = CDBl(Text7.Text)  
recip.Ix = CDBl(Text8.Text)  
recip.Iy = CDBl(Text9.Text)  
recip.Iz = CDBl(Text10.Text)  
recip.Fx = CDBl(Text11.Text)  
recip.Fy = CDBl(Text12.Text)
```

```
    recip.Fz = CDbI(Text13.Text)
    recip.W = CDbI(Text14.Text)
    recip.Mox = CDbI(Text15.Text)
    recip.Moy = CDbI(Text16.Text)
    recip.Moz = CDbI(Text17.Text)

    recip.calcular

    Unload Me
    Load Frm_analisisr
    Frm_analisisr.Show
    Set Frm_analisisr.recip = recip
    Frm_analisisr.Llenar
vacio:
    If Err.Number <> 0 Then MsgBox "Llene todos los datos"
End Sub

Private Sub Command1_Click()
    Unload Me
    Load Frm_suelos
    Set Frm_suelos.recip = recip
    ' Frm_suelos.esEdicion = True
    Frm_suelos.esEdicion = False
    Frm_suelos.Llenar
    Frm_suelos.Show
End Sub

Private Sub Command2_Click()

End Sub

Private Sub Form_Load()
    Text1.Text = "72223,1"
    Text2.Text = 7362
    Text3.Text = 3
    Text4.Text = 6
    Text5.Text = "1,5"
    Text6.Text = "2,95"
    Text7.Text = "1,06"
    Text8.Text = "19372,4"
    Text9.Text = "8604,4"
    Text10.Text = "19364,3"
    Text11.Text = 300
    Text12.Text = 1500
    Text13.Text = 4200
    Text14.Text = 480
```

```
"Text15.Text = 4600
```

```
"Text16.Text = 250
```

```
"Text17.Text = 175
```

```
FrmPrincipal.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Llenar()
```

```
Text18.Text = recip.Nombre
```

```
Text1.Text = recip.Wt
```

```
Text2.Text = recip.m
```

```
Text3.Text = recip.b
```

```
Text4.Text = recip.L
```

```
Text5.Text = recip.X0
```

```
Text6.Text = recip.Y0
```

```
Text7.Text = recip.Z0
```

```
Text8.Text = recip.Ix
```

```
Text9.Text = recip.Iy
```

```
Text10.Text = recip.Iz
```

```
Text11.Text = recip.Fx
```

```
Text12.Text = recip.Fy
```

```
Text13.Text = recip.Fz
```

```
Text14.Text = recip.W
```

```
Text15.Text = recip.Mox
```

```
Text16.Text = recip.Moy
```

```
Text17.Text = recip.Moz
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
```

```
FrmPrincipal.Enabled = True
```

```
End Sub
```

### ***FORMULARIO DE SALIDA 1 DE DATOS, FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO.***

```
Public impac As Maquina_Impacto
```

```
Private hayError As Boolean
```

```
Private Sub Cmd_principal_Click()
```

```
Unload Me
```

```
Load FrmPrincipal
```

```
FrmPrincipal.Show
```

```
FrmPrincipal.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Cmd_siguiente_Click()
    Unload Me
    Load Frm_amplitudes
    Frm_amplitudes.Show

    Set Frm_amplitudes.impac = impac
    Frm_amplitudes.Llenar
End Sub

Private Sub Command1_Click()
    Unload Me
    Load FrmMaquinas
    Set FrmMaquinas.impac = impac
    'FrmMaquinas.esEdicion = True
    FrmMaquinas.Llenar
    FrmMaquinas.Show
End Sub

Public Sub Llenar()
    hayError = False
    Text1.Text = Round(impac.v, 3)
    Text2.Text = Round(impac.Ca, 3)
    Text3.Text = Round(impac.ma, 3)
    Text4.Text = Round(impac.Fna ^ 2, 3)
    Text5.Text = Round(impac.Fl ^ 2, 3)
    Text6.Text = Round(impac.Fn12, 3)
    Text7.Text = Round(impac.Fn22, 3)
    Text8.Text = Round(impac.Va, 3)

    Text9.Text = Round(impac.Wf, 3)
    Text10.Text = Round(impac.Wfp, 3)
    If (impac.Wf <= impac.Wfp) Then
        lbl_peso.Caption = "La fundación no tiene el peso requerido"
        lbl_peso.ForeColor = &HFF&
        hayError = True
    Else
        lbl_peso.Caption = "La fundación tiene el peso requerido"
        lbl_peso.ForeColor = &HC000&
    End If
    Text11.Text = Round(impac.Af, 3)
    Text12.Text = Round(impac.Afp, 3)
    If (impac.Af <= impac.Afp) Then
        lbl_nopeso.Caption = "La fundación no tiene el Área requerida"
        lbl_nopeso.ForeColor = &HFF&
        hayError = True
    End If
End Sub
```

```
Else
    lbl_nopeso.Caption = "La fundación tiene el Área requerida"
    lbl_nopeso.ForeColor = &HC000&
End If
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
    FrmPrincipal.Enabled = False
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    FrmPrincipal.Enabled = True
End Sub
```

***FORMULARIO DE SALIDA 2 DE DATOS. FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO.***

```
Public impac As Maquina_Impacto
```

```
Private Sub Cmd_Menu_Click()
    FrmPrincipal.Enabled = True
    Unload Me
End Sub
```

```
Public Sub Llenar()
    Text1.Text = Round(impac.Z1, 3)
    Text2.Text = Round(impac.Z2, 3)
    If (1 <= impac.Z1 And impac.Z1 <= 1.2) Then
        lbl_peso.Caption = "La amplitud esta en el rango establecido."
        lbl_peso.ForeColor = &HC000&
    Else
        lbl_peso.Caption = "La amplitud no esta en el rango establecido."
        lbl_peso.ForeColor = &HFF&
    End If

    Text3.Text = Round(impac.ro, 3)

    If (impac.ro <= 350) Then
        Label4.Caption = "No excede el esfuerzo permitido"
        Label4.ForeColor = &HC000&
    Else
        Label4.Caption = "Se excede el esfuerzo permitido"
        Label4.ForeColor = &HFF&
    End If
End Sub
```

```
Private Sub Cmd_atras_Click()  
    Unload Me  
    Load Frm_analisis  
    Frm_analisis.Show  
    Set Frm_analisis.impac = impac  
  
    Frm_analisis.Llenar  
End Sub
```

```
Private Sub Cmd_principal_Click()  
    Unload Me  
    Load FrmPrincipal  
    FrmPrincipal.Show  
    FrmPrincipal.Enabled = True  
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()  
    Load FrmMaquinas  
    Set FrmMaquinas.impac = impac  
    FrmMaquinas.esEdicion = True  
    FrmMaquinas.Llenar  
    Unload Me  
    FrmMaquinas.Show  
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()  
    FrmPrincipal.Enabled = False  
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)  
    FrmPrincipal.Enabled = True  
End Sub
```

***FORMULARIO DE AYUDA. FUNDACIONES PARA MAQUINAS DE IMPACTO.***

```
Public impac As Maquina_Impacto
```

```
Private Sub Cmd_Menu_Click()  
    FrmPrincipal.Enabled = True  
    Unload Me  
End Sub
```

```
Public Sub Llenar()  
    Text1.Text = Round(impac.Z1, 3)
```

```
Text2.Text = Round(impac.Z2, 3)
If (1 <= impac.Z1 And impac.Z1 <= 1.2) Then
    lbl_peso.Caption = "La amplitud esta en el rango establecido."
    lbl_peso.ForeColor = &HC000&
Else
    lbl_peso.Caption = "La amplitud no esta en el rango establecido."
    lbl_peso.ForeColor = &HFF&
End If

Text3.Text = Round(impac.ro, 3)

If (impac.ro <= 350) Then
    Label4.Caption = "No excede el esfuerzo permitido"
    Label4.ForeColor = &HC000&
Else
    Label4.Caption = "Se excede el esfuerzo permitido"
    Label4.ForeColor = &HFF&
End If
End Sub

Private Sub Cmd_atras_Click()
    Unload Me
    Load Frm_analisis
    Frm_analisis.Show
    Set Frm_analisis.impac = impac

    Frm_analisis.Llenar
End Sub

Private Sub Cmd_principal_Click()
    Unload Me
    Load FrmPrincipal
    FrmPrincipal.Show
    FrmPrincipal.Enabled = True
End Sub

Private Sub Command1_Click()
    Load FrmMaquinas
    Set FrmMaquinas.impac = impac
    FrmMaquinas.esEdicion = True
    FrmMaquinas.Llenar
    Unload Me
    FrmMaquinas.Show
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
    FrmPrincipal.Enabled = False
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    FrmPrincipal.Enabled = True
End Sub
```

***FORMULARIO DE SALIDA DE RESULTADOS. FUNDACIONES  
PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS.***

```
Public recip As Maquina_Reciprocante
```

```
Public Sub Llenar()
```

```
ListViewanalysis.ListItems(1).SubItems(1) = Round(recip.Iz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(1).SubItems(2) = Round(recip.Ix, 3)
ListViewanalysis.ListItems(1).SubItems(3) = Round(recip.Iy, 3)
ListViewanalysis.ListItems(1).SubItems(4) = Round(recip.Iy, 3)
ListViewanalysis.ListItems(1).SubItems(5) = Round(recip.Ix, 3)
ListViewanalysis.ListItems(1).SubItems(6) = Round(recip.Iz, 3)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(2).SubItems(1) = Round(recip.R0v, 3)
ListViewanalysis.ListItems(2).SubItems(2) = Round(recip.R0v, 3)
ListViewanalysis.ListItems(2).SubItems(3) = Round(recip.R0v, 3)
ListViewanalysis.ListItems(2).SubItems(4) = Round(recip.R0w, 3)
ListViewanalysis.ListItems(2).SubItems(5) = Round(recip.R0q, 3)
ListViewanalysis.ListItems(2).SubItems(6) = Round(recip.R0t, 3)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(3).SubItems(1) = Round(recip.Nz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(3).SubItems(2) = Round(recip.Nh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(3).SubItems(3) = Round(recip.Nh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(3).SubItems(4) = Round(recip.Nw, 3)
ListViewanalysis.ListItems(3).SubItems(5) = Round(recip.Nq, 3)
'ListViewanalysis.ListItems(3).SubItems(6) = Round(recip.Iz,3)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(4).SubItems(1) = Round(recip.Kz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(4).SubItems(2) = Round(recip.Kx, 3)
ListViewanalysis.ListItems(4).SubItems(3) = Round(recip.Kx, 3)
ListViewanalysis.ListItems(4).SubItems(4) = Round(recip.Kw, 3)
ListViewanalysis.ListItems(4).SubItems(5) = Round(recip.Kq, 3)
ListViewanalysis.ListItems(4).SubItems(6) = Round(recip.Kt, 3)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(5).SubItems(1) = Round(recip.Fnz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(5).SubItems(2) = Round(recip.Fnh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(5).SubItems(3) = Round(recip.Fnh, 3)
```

```

ListViewanalysis.ListItems(5).SubItems(4) = Round( recip.Fnw, 3)
ListViewanalysis.ListItems(5).SubItems(5) = Round( recip.Fnq, 3)
ListViewanalysis.ListItems(5).SubItems(6) = Round( recip.Fnt, 3)

ListViewanalysis.ListItems(6).SubItems(1) = Round( recip.Bz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(6).SubItems(2) = Round( recip.Bh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(6).SubItems(3) = Round( recip.Bh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(6).SubItems(4) = Round( recip.Bw, 3)
ListViewanalysis.ListItems(6).SubItems(5) = Round( recip.Bq, 3)
ListViewanalysis.ListItems(6).SubItems(6) = Round( recip.Bt, 3)

ListViewanalysis.ListItems(7).SubItems(1) = Round( recip.Alfaz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(7).SubItems(2) = Round( recip.Alfah, 3)
ListViewanalysis.ListItems(7).SubItems(3) = Round( recip.Alfah, 3)
ListViewanalysis.ListItems(7).SubItems(4) = Round( recip.Alfaw, 3)
ListViewanalysis.ListItems(7).SubItems(5) = Round( recip.Alfaq, 3)
'ListViewanalysis.ListItems(7).SubItems(6) = Round( recip.

ListViewanalysis.ListItems(8).SubItems(1) = Round( recip.Doiz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(8).SubItems(2) = Round( recip.Doh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(8).SubItems(3) = Round( recip.Doh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(8).SubItems(4) = Round( recip.Dow, 3)
ListViewanalysis.ListItems(8).SubItems(5) = Round( recip.Doq, 3)
ListViewanalysis.ListItems(8).SubItems(6) = Round( recip.Dot, 3)

ListViewanalysis.ListItems(9).SubItems(1) = Round( recip.Di, 3)
ListViewanalysis.ListItems(9).SubItems(2) = Round( recip.Di, 3)
ListViewanalysis.ListItems(9).SubItems(3) = Round( recip.Di, 3)
ListViewanalysis.ListItems(9).SubItems(4) = Round( recip.Di, 3)
ListViewanalysis.ListItems(9).SubItems(5) = Round( recip.Di, 3)
ListViewanalysis.ListItems(9).SubItems(6) = Round( recip.Di, 3)

ListViewanalysis.ListItems(10).SubItems(1) = Round( recip.Dz, 3)
ListViewanalysis.ListItems(10).SubItems(2) = Round( recip.Dh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(10).SubItems(3) = Round( recip.Dh, 3)
ListViewanalysis.ListItems(10).SubItems(4) = Round( recip.Dw, 3)
ListViewanalysis.ListItems(10).SubItems(5) = Round( recip.Dq, 3)
ListViewanalysis.ListItems(10).SubItems(6) = Round( recip.Dt, 3)

If ( recip.Frz = 0) Then
  ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(1) = "Sobreamortiguado"
Else
  ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(1) = Round( recip.Frz, 3)
End If
If ( recip.Frh = 0) Then
  ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(2) = "Sobreamortiguado"

```

```
ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(3) = "Sobreamortiguado"  
Else  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(2) = Round(recip.Frh, 3)  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(3) = Round(recip.Frh, 3)  
End If  
If (recip.Frw = 0) Then  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(4) = "Sobreamortiguado"  
Else  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(4) = Round(recip.Frw, 3)  
End If  
If (recip.Frq = 0) Then  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(5) = "Sobreamortiguado"  
Else  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(5) = Round(recip.Frq, 3)  
End If  
If (recip.Frt = 0) Then  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(6) = "Sobreamortiguado"  
Else  
    ListViewanalysis.ListItems(11).SubItems(6) = Round(recip.Frt, 3)  
End If
```

```
ListViewanalysis.ListItems(12).SubItems(1) = Round(recip.Mz, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(12).SubItems(2) = Round(recip.Mh, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(12).SubItems(3) = Round(recip.Mh, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(12).SubItems(4) = Round(recip.Mw, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(12).SubItems(5) = Round(recip.Mq, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(12).SubItems(6) = Round(recip.Mt, 3)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(13).SubItems(1) = Round(recip.Az, 8)  
ListViewanalysis.ListItems(13).SubItems(2) = Round(recip.Ax, 8)  
ListViewanalysis.ListItems(13).SubItems(3) = Round(recip.Ay, 10)  
ListViewanalysis.ListItems(13).SubItems(4) = Round(recip.Aw, 8)  
ListViewanalysis.ListItems(13).SubItems(5) = Round(recip.Aq, 10)  
ListViewanalysis.ListItems(13).SubItems(6) = Round(recip.At, 8)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(14).SubItems(1) = Round(recip.Trz, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(14).SubItems(2) = Round(recip.Trh, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(14).SubItems(3) = Round(recip.Trh, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(14).SubItems(4) = Round(recip.Trw, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(14).SubItems(5) = Round(recip.Trq, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(14).SubItems(6) = Round(recip.Trt, 3)
```

```
ListViewanalysis.ListItems(15).SubItems(1) = Round(recip.Ftz, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(15).SubItems(2) = Round(recip.Ftx, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(15).SubItems(3) = Round(recip.Fty, 3)  
ListViewanalysis.ListItems(15).SubItems(4) = Round(recip.Mty, 3)
```

```

ListViewanalysis.ListItems(15).SubItems(5) = Round(recip.Mtx, 3)
ListViewanalysis.ListItems(15).SubItems(6) = Round(recip.Mtz, 3)

```

```
End Sub
```

```

Private Sub Cmd_atras_Click()
    Unload Me
    Load Frm_suelos
    Set Frm_suelos.recip = recip
    Frm_suelos.esEdicion = True
    Frm_suelos.Llenar
    Frm_suelos.Show
End Sub

```

```

Private Sub Cmd_siguiente_Click()
    Unload Me
    Load Frm_ambiente
    Frm_ambiente.Show

    Set Frm_ambiente.recip = recip
    Frm_ambiente.Llenar
End Sub

```

```

Private Sub Form_Load()
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Momento de inercia [kg* s2 *m]"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Radio equivalente [m]"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Factor de embutimiento "
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Constante de resorte [kg/m]/[kg*m]"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Frecuencia natural [RPM]"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Relación de masas"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Amortiguamiento por embutimiento"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Relación de amortiguación
geométrica"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Amortiguamiento del suelo"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Relación de amortiguamiento"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Frecuencia de resonancia [RPM]"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Factor de amplificación dinámica"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Amplitud máxima [mm]/[rad]"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Factor de transmisibilidad"
    ListViewanalysis.ListItems.Add = "Fuerzas y momentos transmitidos
[kg]/[kg*m]"

    FrmPrincipal.Enabled = False
End Sub

```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    FrmPrincipal.Enabled = True
End Sub
```

***FORMULARIO DE SALIDA AMPLITUDES. FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS.***

```
Public recip As Maquina_Reciprocante
```

```
Private Sub Cmd_atras_Click()
    Unload Me

    Load Frm_analisisr
    Frm_analisisr.Show
    Set Frm_analisisr.recip = recip
    Frm_analisisr.Llenar
End Sub
```

```
Public Sub Llenar()
    Text1.Text = Round(recip.Ay, 3)
    Text2.Text = Round(recip.At, 3)
    Text3.Text = Round(recip.Ax, 3)
    Text4.Text = Round(recip.Az, 3)
    Text5.Text = Round(recip.Aw, 3)
    Text6.Text = Round(recip.Aq, 3)
    Text7.Text = Round(recip.W, 3)
End Sub
```

```
Private Sub Cmd_Menu_Click()

    Unload Me
    Load FrmPrincipal
    FrmPrincipal.Show
    FrmPrincipal.Enabled = True

End Sub
```

```
Private Sub Cmd_siguiete_Click()
    Unload Me
    Load Frm_excentricidad
    Frm_excentricidad.Show

    Set Frm_excentricidad.recip = recip
    Frm_excentricidad.Llenar
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()  
    FrmPrincipal.Enabled = False  
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)  
    FrmPrincipal.Enabled = True  
End Sub
```

***FORMULARIO SALIDA DE DATOS, ESTUDIO DE RESONANCIA.  
FUNDACIONES PARA MAQUINAS RECIPROCANTES Y ROTATIVAS.***

```
Public recip As New Maquina_Reciprocante
```

```
Private Sub Cmd_atrás_Click()  
    Unload Me  
    Load Frm_ambiente  
    Frm_ambiente.Show
```

```
    Set Frm_ambiente.recip = recip  
    Frm_ambiente.Llenar  
End Sub
```

```
Public Sub Llenar()  
    Text1.Text = Round(recip.Ex, 3)  
    If recip.Ex <= 5 Then  
        lbl_ex.Caption = "Correcta distribución de masas"  
        lbl_ex.ForeColor = &HC000&  
    Else  
        lbl_ex.Caption = "No cumple con la distribución de masas"  
        lbl_ex.ForeColor = &HFF&  
    End If
```

```
    Text2.Text = Round(recip.Ey, 3)  
    If recip.Ey <= 5 Then  
        lbl_ey.Caption = "Correcta distribución de masas"  
        lbl_ey.ForeColor = &HC000&  
    Else  
        lbl_ey.Caption = "No cumple con la distribución de masas"  
        lbl_ey.ForeColor = &HFF&  
    End If
```

```
    Text3.Text = Round(recip.Ps, 3)  
    If recip.Ps <= recip.Oadm Then  
        lbl_ez.Caption = "Correcta la presión ejercida en el suelo"
```

```
    lbl_ez.ForeColor = &HC000&  
Else  
    lbl_ez.Caption = "No cumple con la presión admitida"  
    lbl_ez.ForeColor = &HFF&  
End If
```

```
If recip.Rz = 0 Then  
    lbl_rz.Caption = "No hay riesgo de resonancia"  
    lbl_rz.ForeColor = &HC000&  
    Text4.Text = "Sobre amortiguado"  
ElseIf (recip.Rz >= 0.7 And recip.Rz <= 1.4) Then  
    lbl_rz.Caption = "Hay riesgo de resonancia"  
    lbl_rz.ForeColor = &HFF&  
    Text4.Text = Round(recip.Rz, 3)  
Else  
    lbl_rz.Caption = "No hay riesgo de resonancia"  
    lbl_rz.ForeColor = &HC000&  
    Text4.Text = Round(recip.Rz, 3)  
End If
```

```
If recip.Ry = 0 Then  
    lbl_ry.Caption = "No hay riesgo de resonancia"  
    lbl_ry.ForeColor = &HC000&  
    Text5.Text = "Sobre amortiguado"  
ElseIf (recip.Ry >= 0.7 And recip.Ry <= 1.4) Then  
    lbl_ry.Caption = "Hay riesgo de resonancia"  
    lbl_ry.ForeColor = &HFF&  
    Text5.Text = Round(recip.Ry, 3)  
Else  
    lbl_ry.Caption = "No hay riesgo de resonancia"  
    lbl_ry.ForeColor = &HC000&  
    Text5.Text = Round(recip.Ry, 3)  
End If
```

```
If recip.Rx = 0 Then  
    lbl_rx.Caption = "No hay riesgo de resonancia"  
    lbl_rx.ForeColor = &HC000&  
    Text6.Text = "Sobre amortiguado"  
ElseIf (recip.Rx >= 0.7 And recip.Rx <= 1.4) Then  
    lbl_rx.Caption = "Hay riesgo de resonancia"  
    lbl_rx.ForeColor = &HFF&  
    Text6.Text = Round(recip.Rx, 3)  
Else  
    lbl_rx.Caption = "No hay riesgo de resonancia"  
    lbl_rx.ForeColor = &HC000&
```

```
Text6.Text = Round(recip.Rx, 3)
End If

If recip.Rq = 0 Then
    lbl_rq.Caption = "No hay riesgo de resonancia"
    lbl_rq.ForeColor = &HC000&
    Text7.Text = "Sobre amotiguado"
ElseIf (recip.Rq >= 0.7 And recip.Rq <= 1.4) Then
    lbl_rq.Caption = "Hay riesgo de resonancia"
    lbl_rq.ForeColor = &HFF&
    Text7.Text = Round(recip.Rq, 3)
Else
    lbl_rq.Caption = "No hay riesgo de resonancia"
    lbl_rq.ForeColor = &HC000&
    Text7.Text = Round(recip.Rq, 3)
End If

If recip.Rw = 0 Then
    lbl_rw.Caption = "No hay riesgo de resonancia"
    lbl_rw.ForeColor = &HC000&
    Text8.Text = "Sobre amotiguado"
ElseIf (recip.Rw >= 0.7 And recip.Rw <= 1.4) Then
    lbl_rw.Caption = "Hay riesgo de resonancia"
    lbl_rw.ForeColor = &HFF&
    Text8.Text = Round(recip.Rw, 3)
Else
    lbl_rw.Caption = "No hay riesgo de resonancia"
    lbl_rw.ForeColor = &HC000&
    Text8.Text = Round(recip.Rw, 3)
End If

If recip.Rt = 0 Then
    lbl_rt.Caption = "No hay riesgo de resonancia"
    lbl_rt.ForeColor = &HC000&
    Text9.Text = "Sobre amotiguado"
ElseIf (recip.Rt >= 0.7 And recip.Rt <= 1.4) Then
    lbl_rt.Caption = "Hay riesgo de resonancia"
    lbl_rt.ForeColor = &HFF&
    Text9.Text = Round(recip.Rt, 3)
Else
    lbl_rt.Caption = "No hay riesgo de resonancia"
    lbl_rt.ForeColor = &HC000&
    Text9.Text = Round(recip.Rt, 3)
End If

End Sub
```

```
Private Sub Cmd_Menu_Click()  
    Unload Me  
    Load FrmPrincipal  
    FrmPrincipal.Show  
    FrmPrincipal.Enabled = True  
  
End Sub  
  
Private Sub Command1_Click()  
    Load Frm_suelos  
    Set Frm_suelos.recip = recip  
    Frm_suelos.esEdicion = True  
    Frm_suelos.Llenar  
    Unload Me  
    Frm_suelos.Show  
End Sub  
  
Private Sub Form_Load()  
    FrmPrincipal.Enabled = False  
End Sub  
  
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)  
    FrmPrincipal.Enabled = True  
End Sub
```