



CIMENTACIONES SOMETIDAS A ACCIONES DINÁMICAS

CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

Marcelo ZEBALLOS
Guillermo GERBAUDO
Roberto TERZARIOL



OBJETIVO

- Identificación de tipo de máquina a cimentar.
- Descripción de modelo de simulación.
- Identificación de parámetros de suelo necesarios.
- Descripción del método simplificado para cimentaciones con solicitaciones rotacionales
- Temas varios de interés.

REFERENCIAS:

- **Apuntes de clase. Disponibles en página virtual.**



PREGUNTAS INICIALES

- Caracterización de máquinas. Qué **acciones externas** producen las sollicitaciones que actúan sobre la máquina? Variables admisibles.
- Cómo puede **esquematzarse el sistema máquina – cimiento?**
- Cuál es la **hipótesis de falla** que debe aplicarse?



TIPO DE MAQUINAS

CARACTERIZACION

VARIABLES ADMISIBLES



TIPO DE MAQUINAS

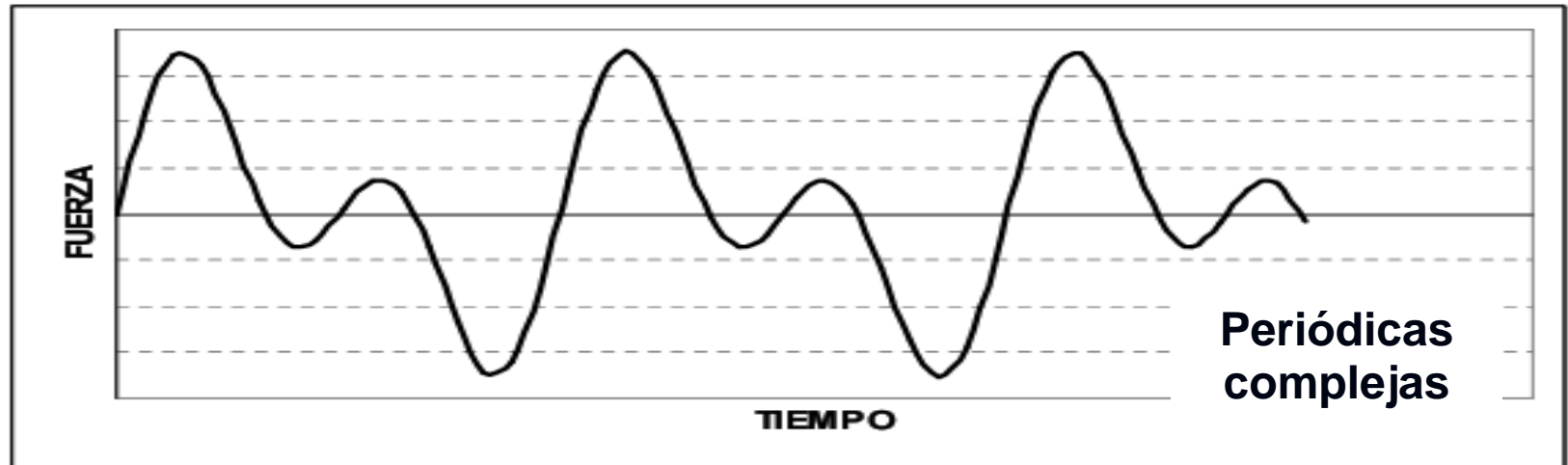
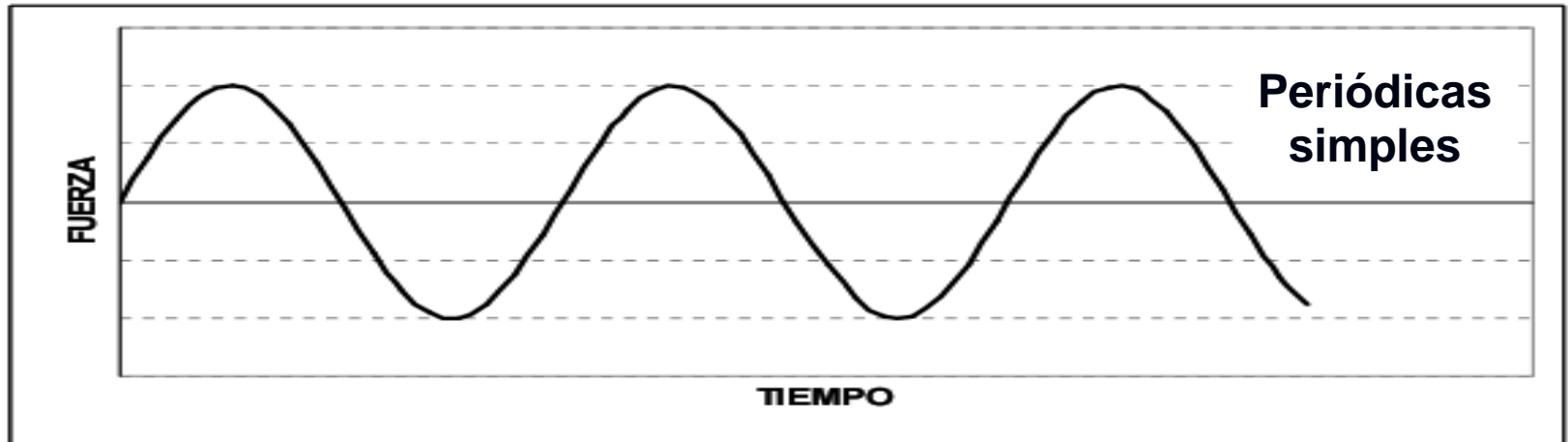
- Según en **tiempo de aplicación** de las cargas
 - De acciones periódicas
 - De acciones no periódicas
- Según la **frecuencia** de las acciones
 - Baja Frecuencia
 - Media Frecuencia
 - Alta Frecuencia



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

TIPO DE MAQUINAS

- Según en **tiempo de aplicación** de las cargas





Según la frecuencia de las acciones

- **Baja Frecuencia,** < de 300 rpm
 - Motores diesel, sistemas biela manivela, motores a combustión, etc.
- **Media Frecuencia,** 300 a 1000 rpm
 - Turbomáquinas lentas, motores diésel medios, motores alternativos de compresores.
- **Alta Frecuencia,** > de 1000 rpm
 - Turbogeneradores, turbomáquinas, etc.

CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

Según la frecuencia de las acciones

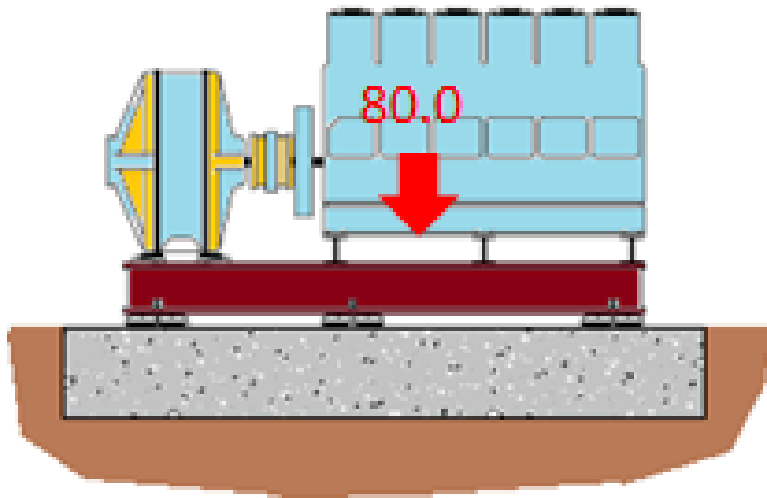
- **Alta Frecuencia,** > de 1000 rpm
 - Turbogeneradores, turbomáquinas, etc.



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

Según la frecuencia de las acciones

- **Media Frecuencia**



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

Según la frecuencia de las acciones

- **Acciones en forma de impulso,**
- Prensas.

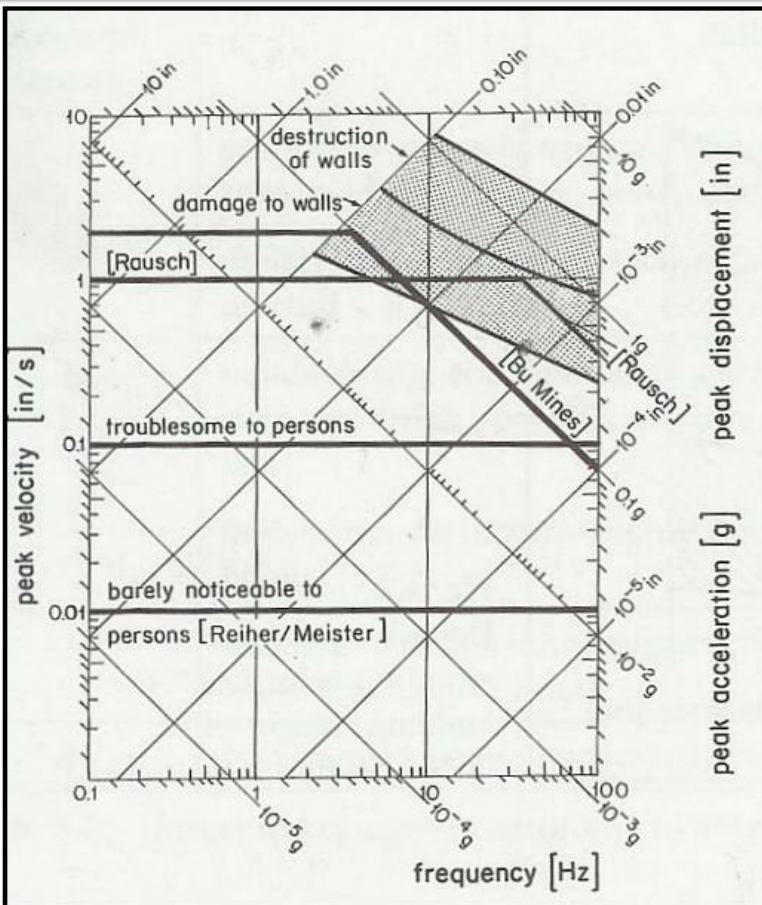




CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

VARIABLES ADMISIBLES

(Efectos en estructuras y personas)



Frecuencia de Vibración	Efectos
< 1 Hz	Mareos
3,5 a 6 Hz	Efectos de alerta
4 a 10 Hz	Dolor de pecho y abdomen
Aprox 5 Hz	Reducción motricidad manual
7 a 20 Hz	Problemas de comunicación
8 a 10 Hz	Dolor de espalda
10 a 20 Hz	Dolor de intestino y vejiga
10 a 30 Hz	Reduce capac control manual y visual
10 a 90 Hz	Reduce capacidad de acciones visuales



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

VARIABLES ADMISIBLES



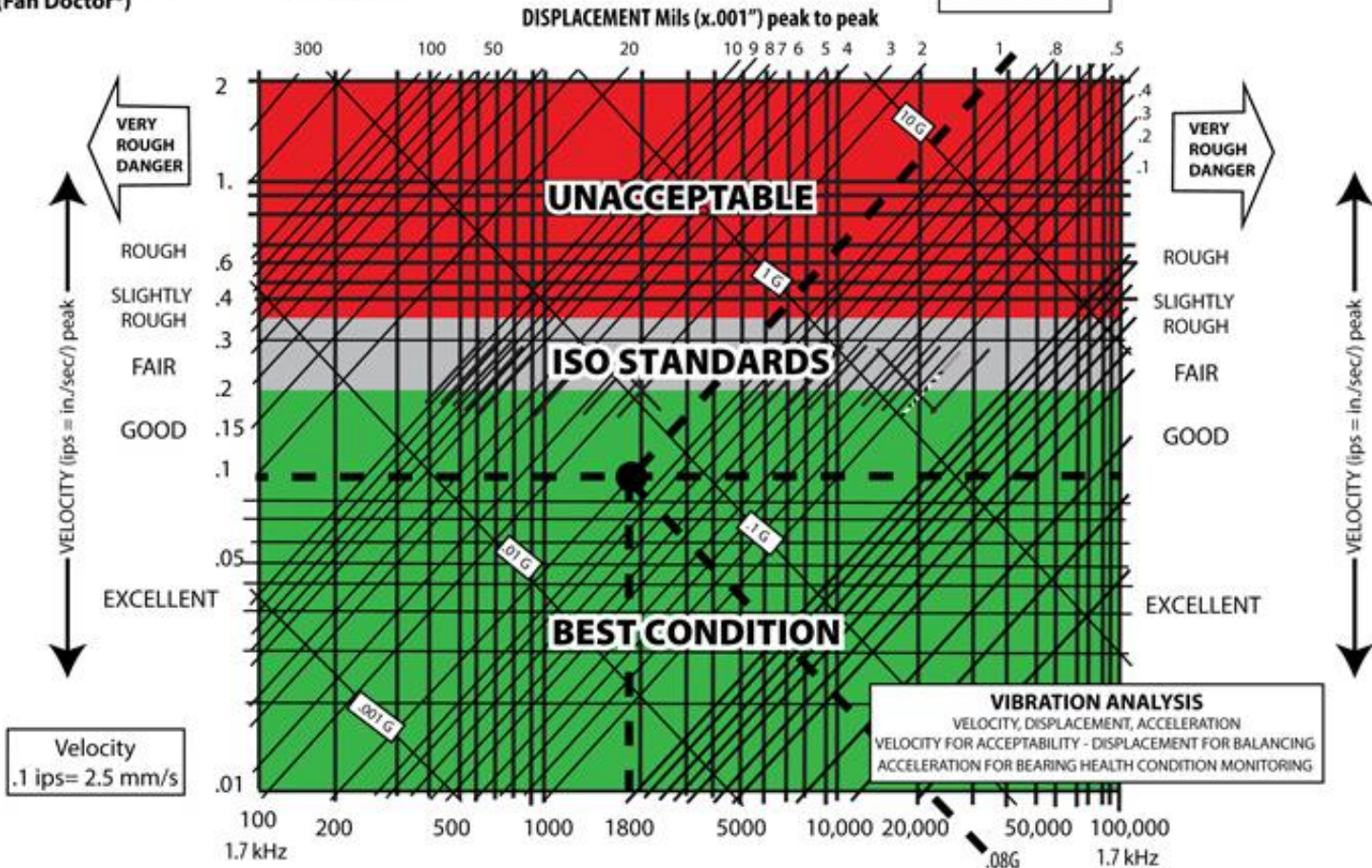
VIBRATION SEVERITY GRAPH FOR GENERAL ROTATING MACHINERY

604-619-9381 (24/7)

This Chart is based
on ISO 10816-3

← AMPLITUDE →

Displacement
1 mil = 25 microns



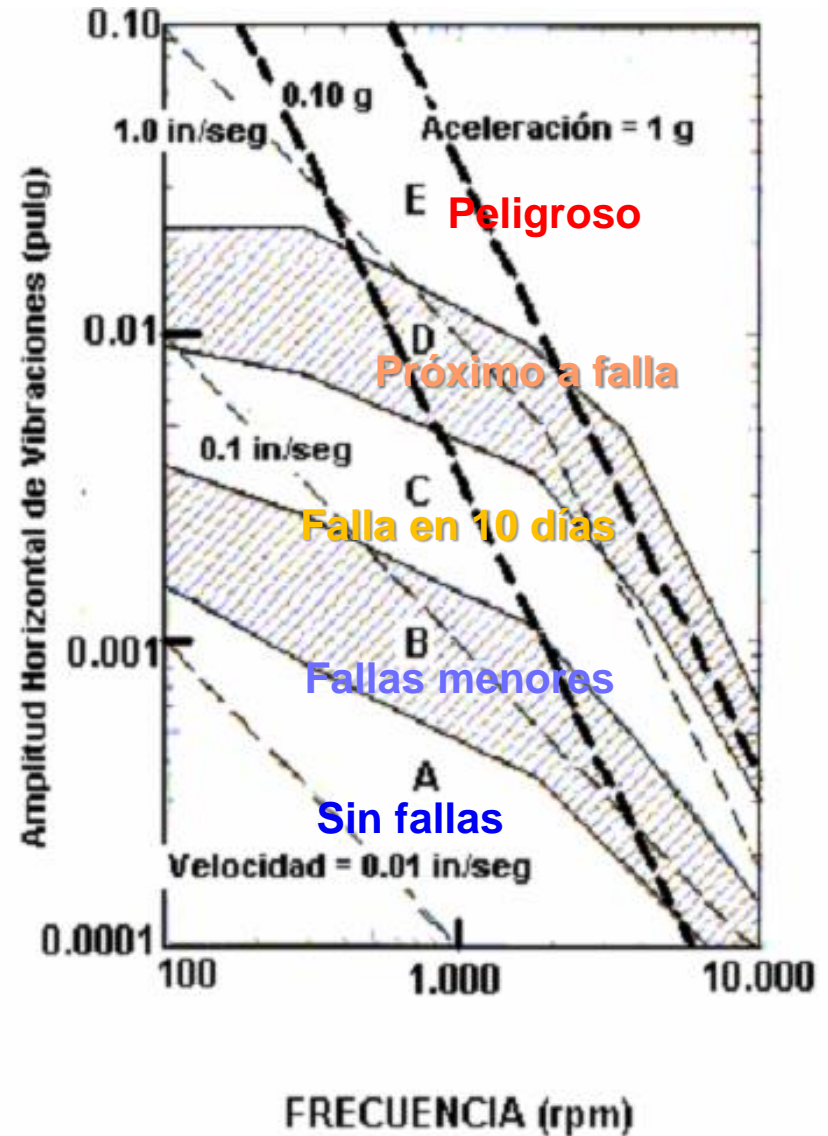
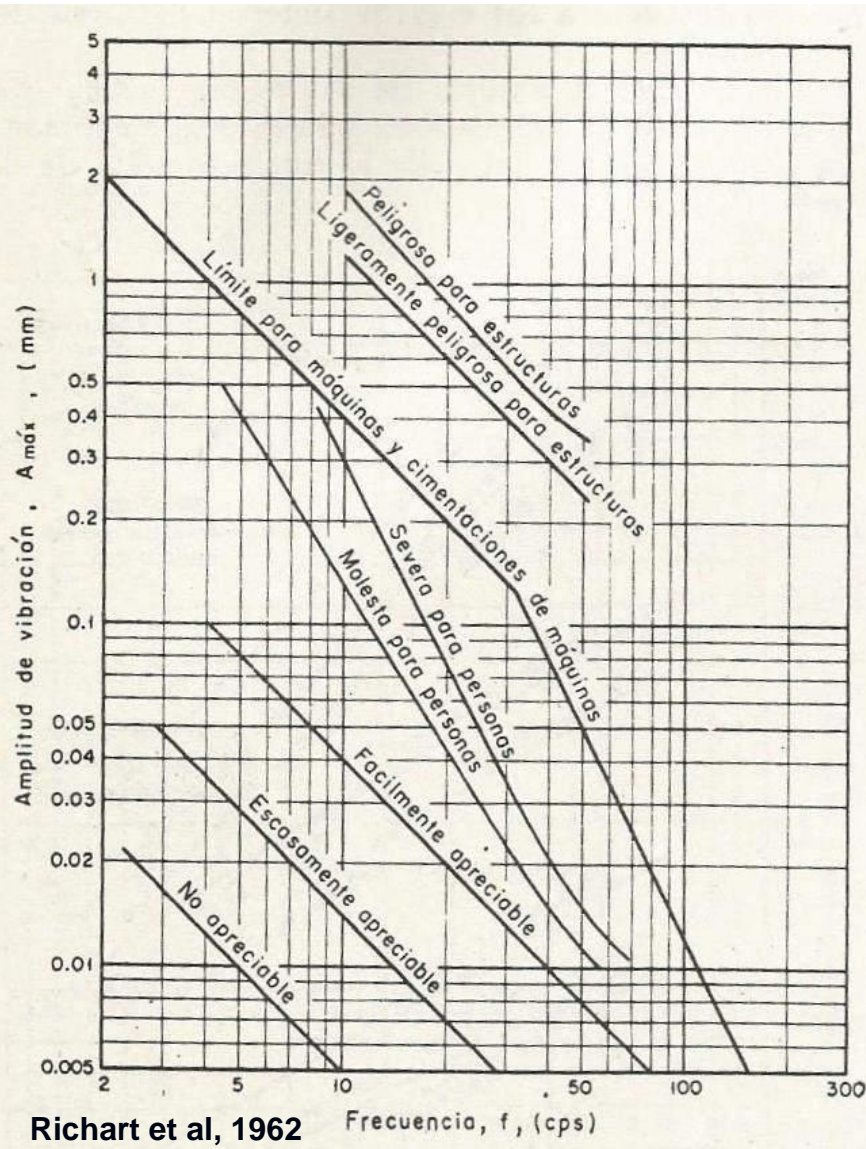
REFERENCE POINT ● = 1800 rpm machine/ motor excellent condition

ACCELERATION or FORCE OF GRAVITY "G" (ips² = in./sec² for simplicity)
ACTUAL G = 32 fps/s = 9.8 m/s/s



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

VARIABLES ADMISIBLES





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

RECOMENDACIONES DE DISEÑO

EQUIPO ROTATIVOS

Velocidad de Operación	Desplazamiento Admisible (micras)
100 a 500	200 a 80
500 a 1.500	80 a 40
1.500 a 3.000	40 a 20
3.000 a 10.000	20 a 5

EQUIPOS DE ACCIONES RECÍPROCAS

Velocidad de Operación	Desplazamiento Admisible (micras)
300 a 1.500	1.000 a 20
100 a 300	1.000

Valores orientativos, dependen de cada máquina



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

RECOMENDACIONES DE DISEÑO

BASICAS

- **CIMIENTOS SOLIDOS, MACIZOS, RESISTENTES**
- **FRECUENCIA NATURAL PROPIA ALEJADA DE LA FRECUENCIA DE SOLICITACION**
- **AISLAR EL CIMIENTO RESPECTO DEL RESTO DE LA ESTRUCTURA**

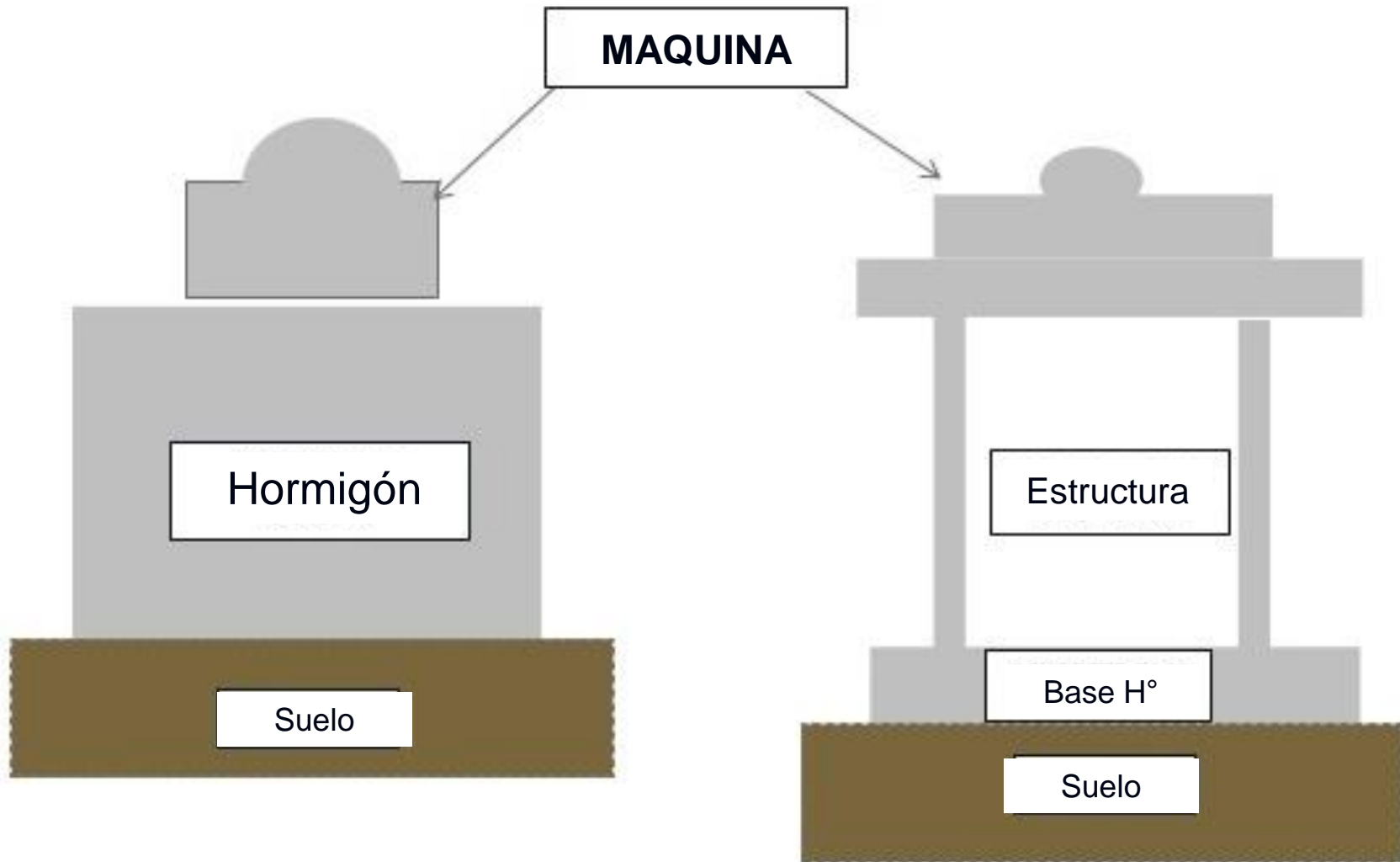
COMPLEMENTARIAS

- **NIVELACION DEL CIMIENTO**
- **COMPACTACION DEL SUELO DE APOYO**
- **VINCULO RIGIDO DE LA MAQUINA AL CIMIENTO**
- **ACCESO A LOS MECANISMOS INTERNOS DE LA MAQUINA**
- **COINCIDENCIA CENTRO DE GRAVEDAD MAQUINA – CIMIENTO**
- **TENSIONES DE CONTACTO REDUCIDAS**



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

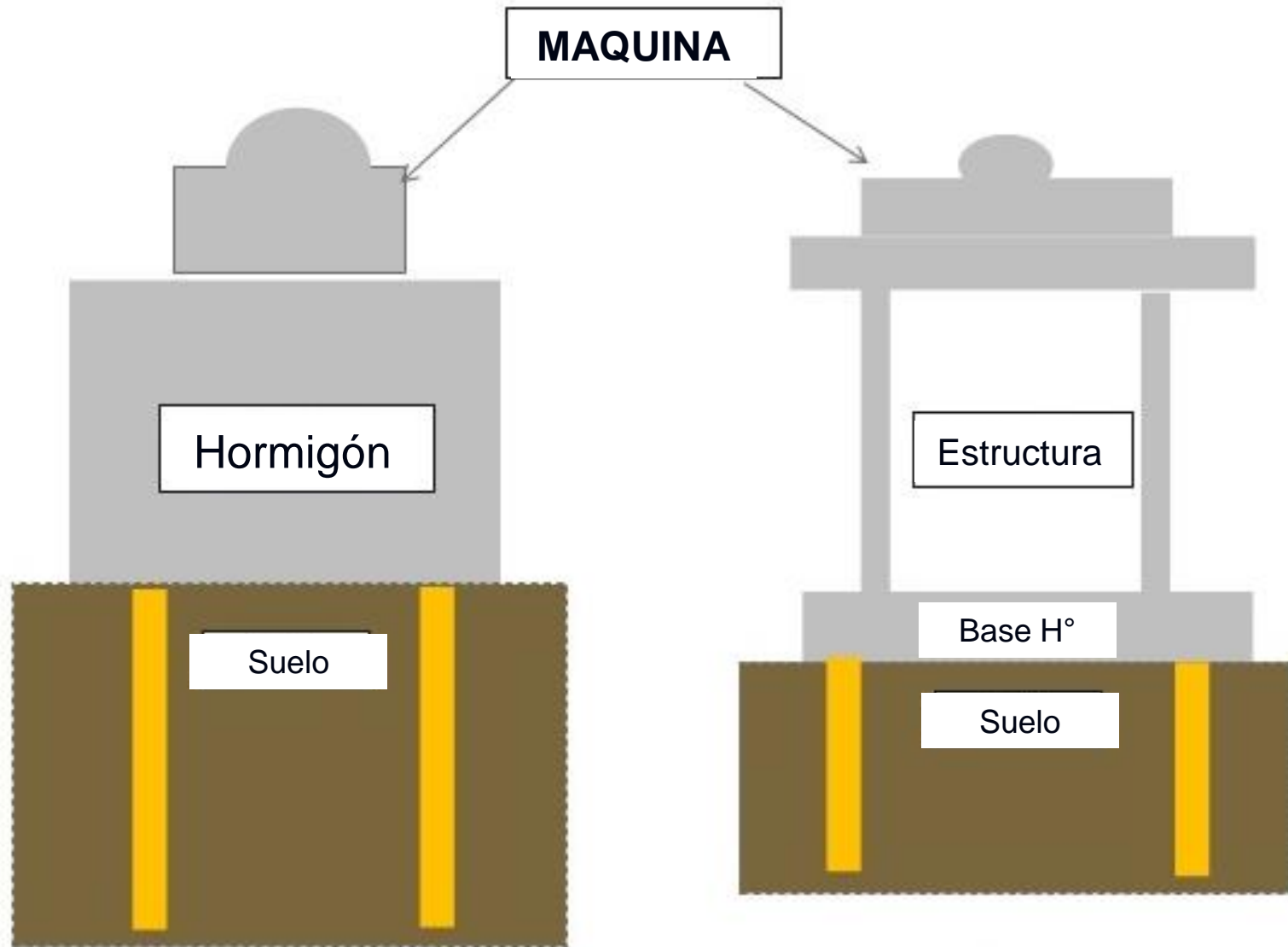
OPCIONES DE DISEÑO





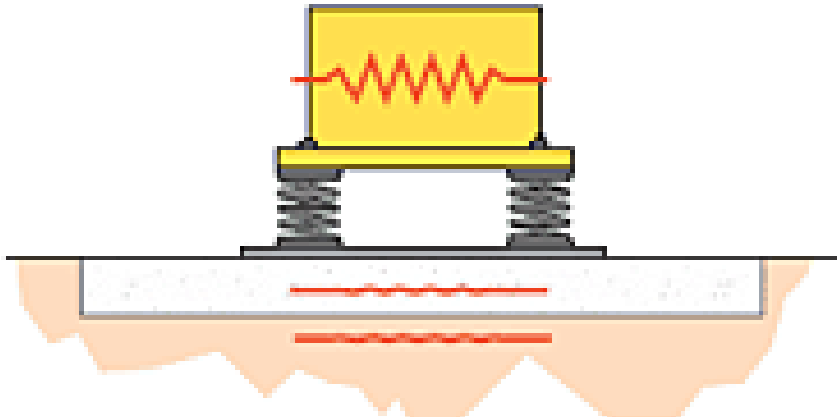
CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

OPCIONES DE DISEÑO

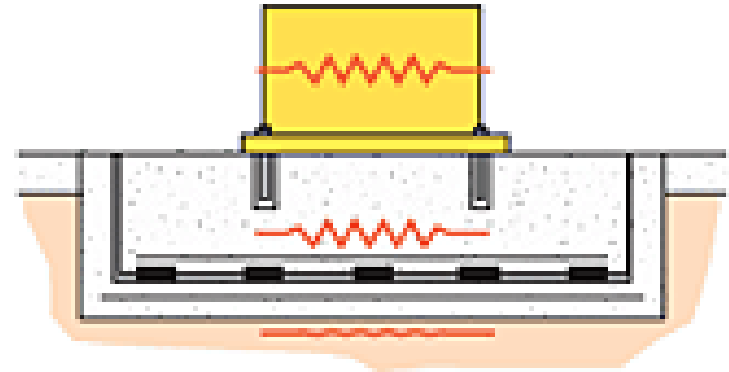


CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

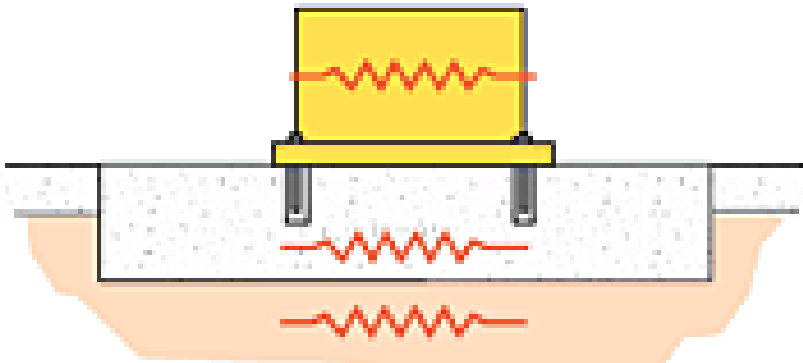
OPCIONES DE DISEÑO



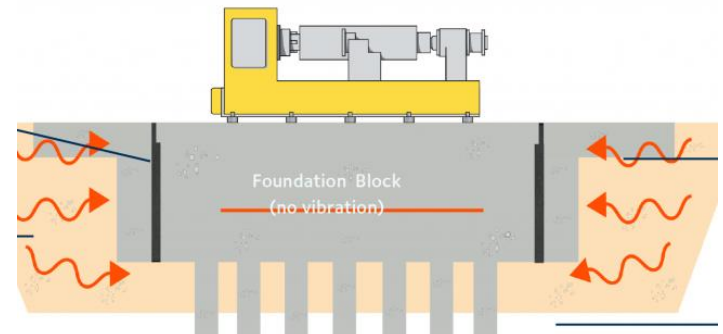
Cimentación de la máquina



**Cimentación de la máquina
con aislamiento activo**



**Cimentación de la máquina, contacto con
losa de piso, sin aislamiento**

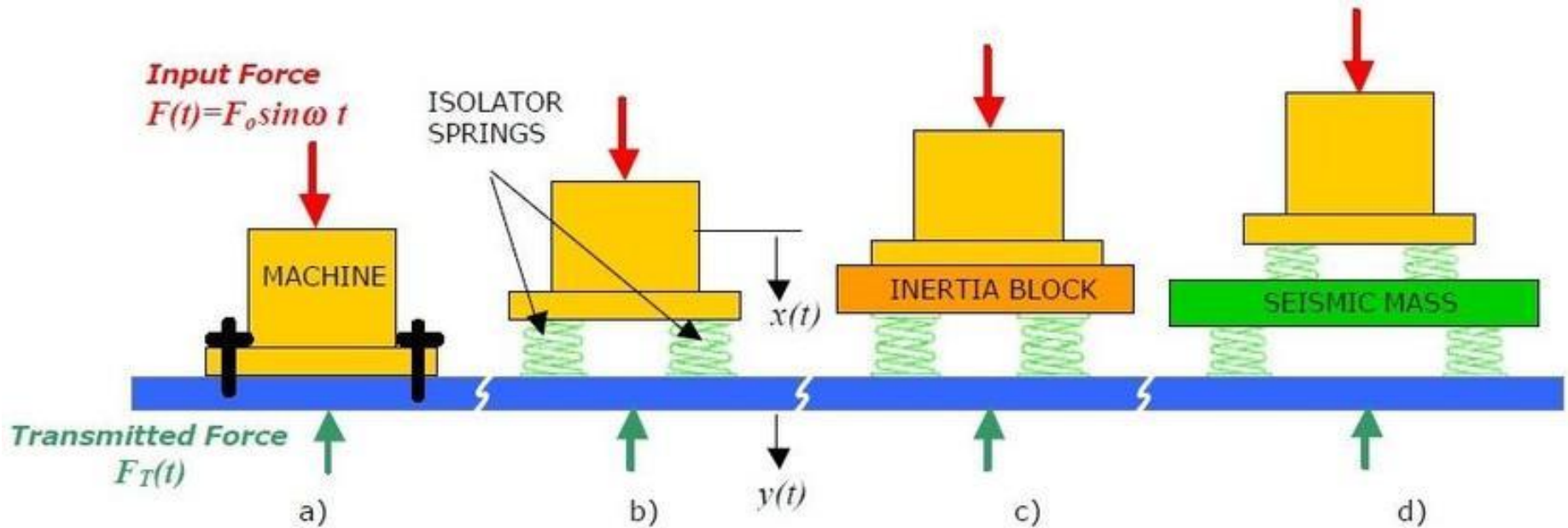


**Cimentación de la máquina
con aislamiento pasivo**



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

OPCIONES DE DISEÑO



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

ESTRUCTURA DE CIMENTACIÓN



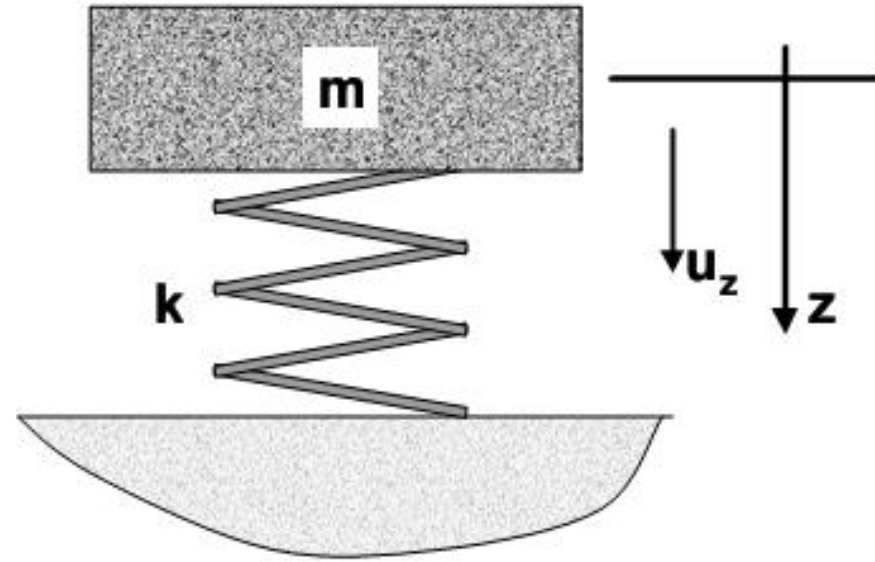
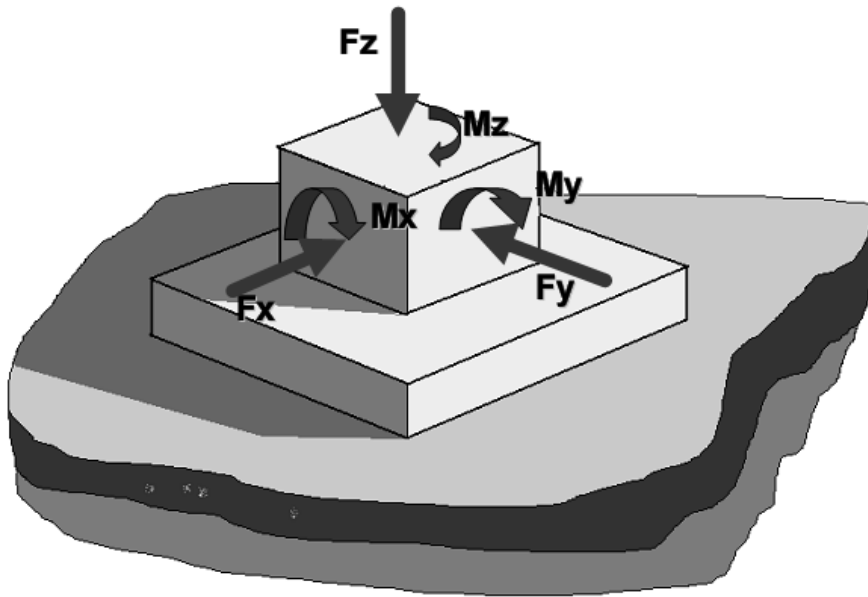


MODELO EQUIVALENTE



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS LIBRES





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS LIBRES

Ecuación de equilibrio

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + ku = 0$$

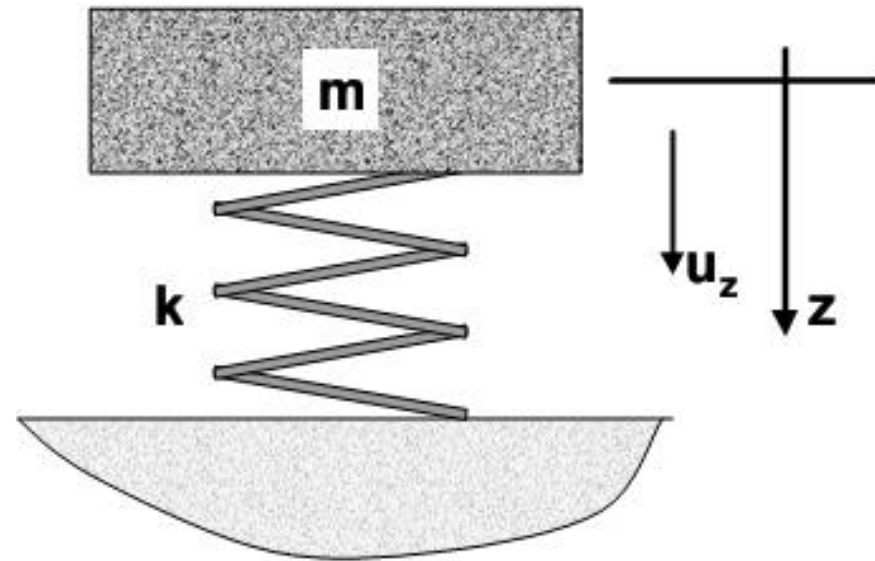
Solución:

- Función de $u(z)$
- Se expresa como una combinación de componentes armónicos (seno y coseno)

Variables derivadas

Pulsación $\omega^2 = \frac{k}{m}$

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





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS LIBRES

AMORTIGUADOS

Ecuación de equilibrio

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + ku = 0$$

Variables derivadas

Pulsación

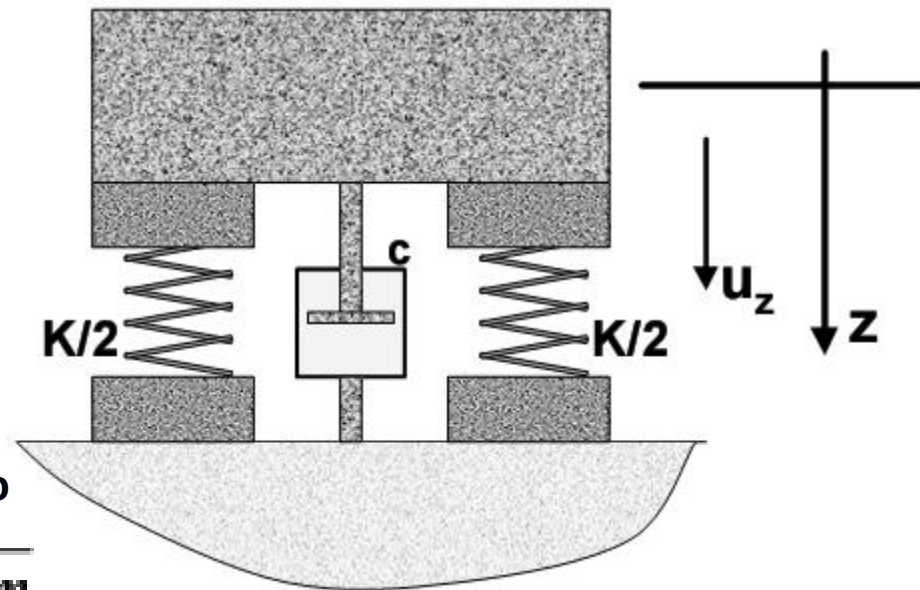
$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

Amortiguamiento

$$c_c = \sqrt{2km}$$

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

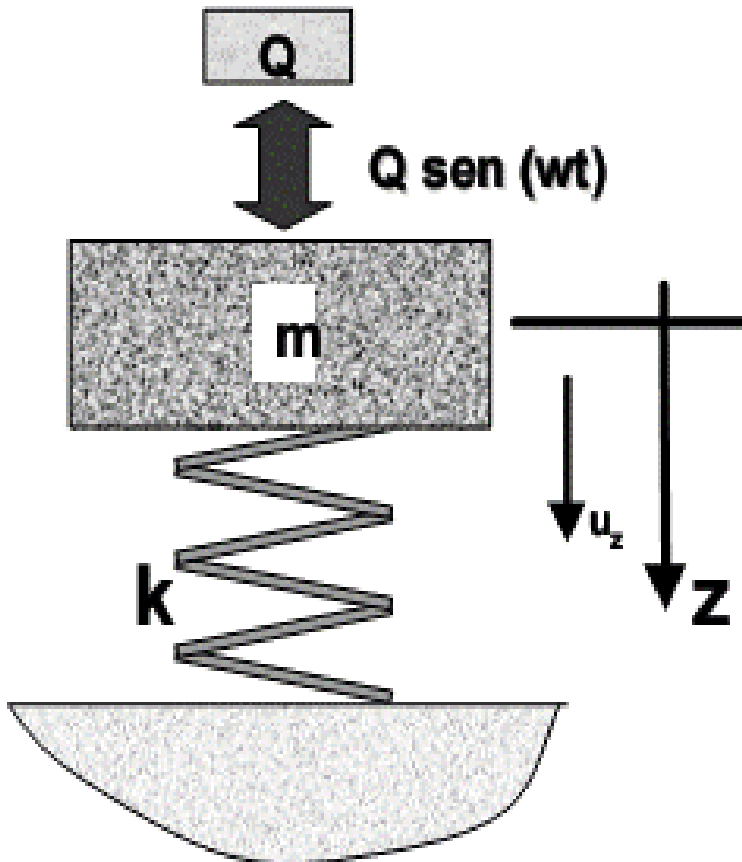
$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - D^2}$$





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS



$$m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + ku = Q_o \text{ seno } (\omega t)$$

$$A_d = \frac{Q_o}{k} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$



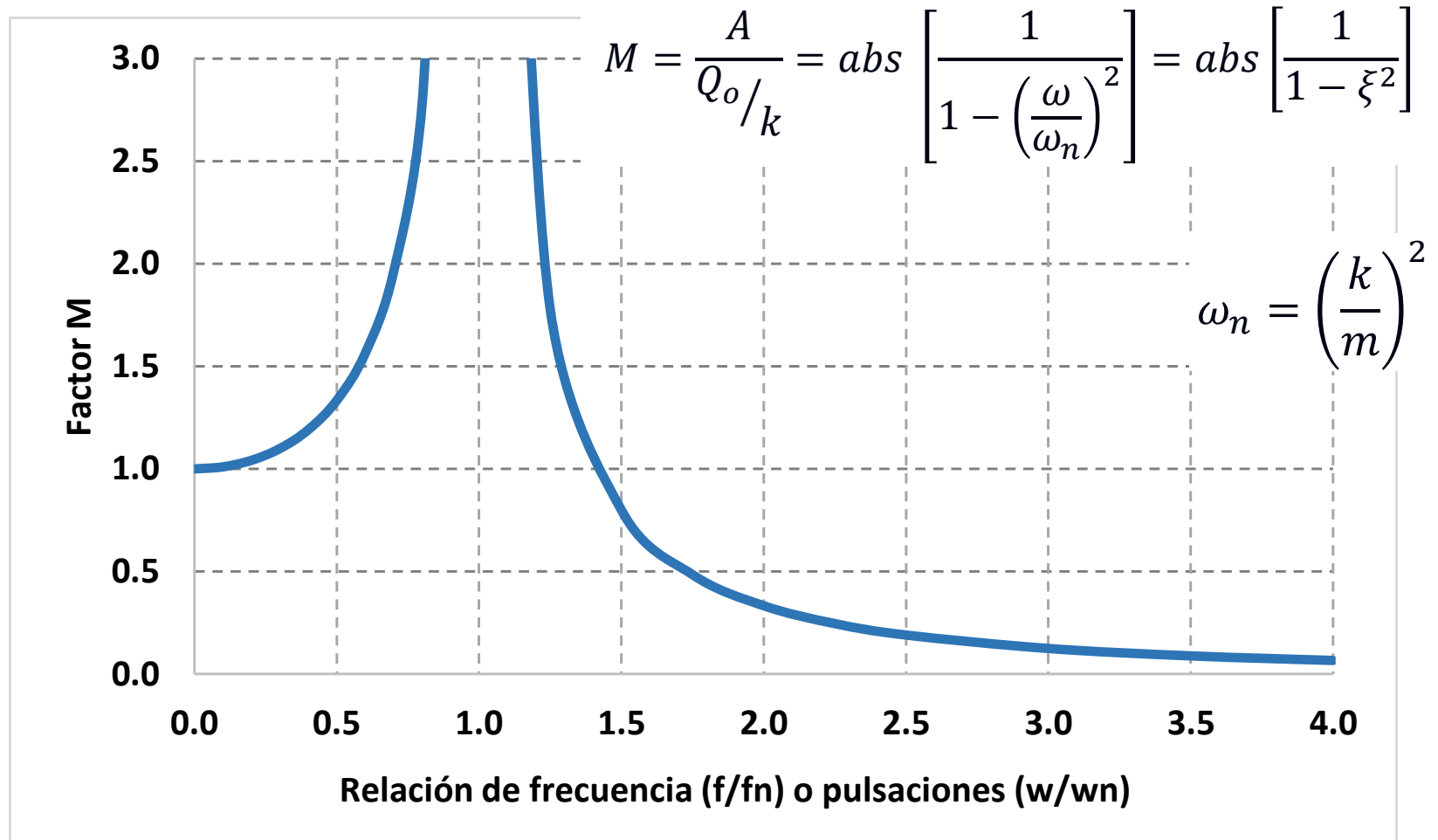
$$A_d = A_{est} M$$



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS

FACTOR DE MAGNIFICACIÓN





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS

AMORTIGUADO

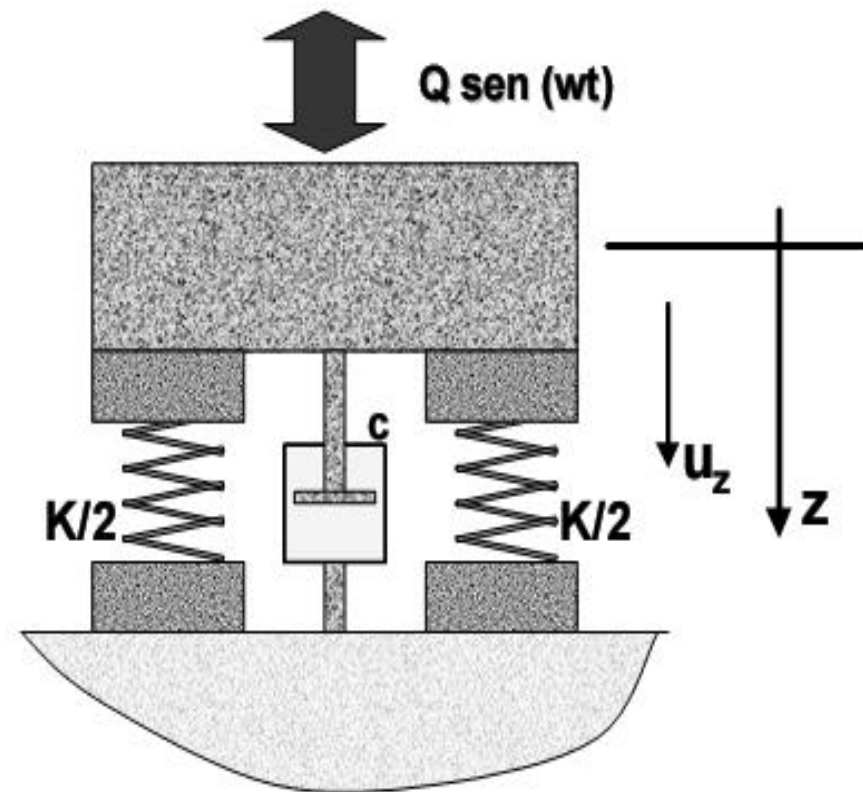
Ecuación de equilibrio

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial u}{\partial z} + ku = Q_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Variables derivadas

$$A = \frac{Q_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2}$$





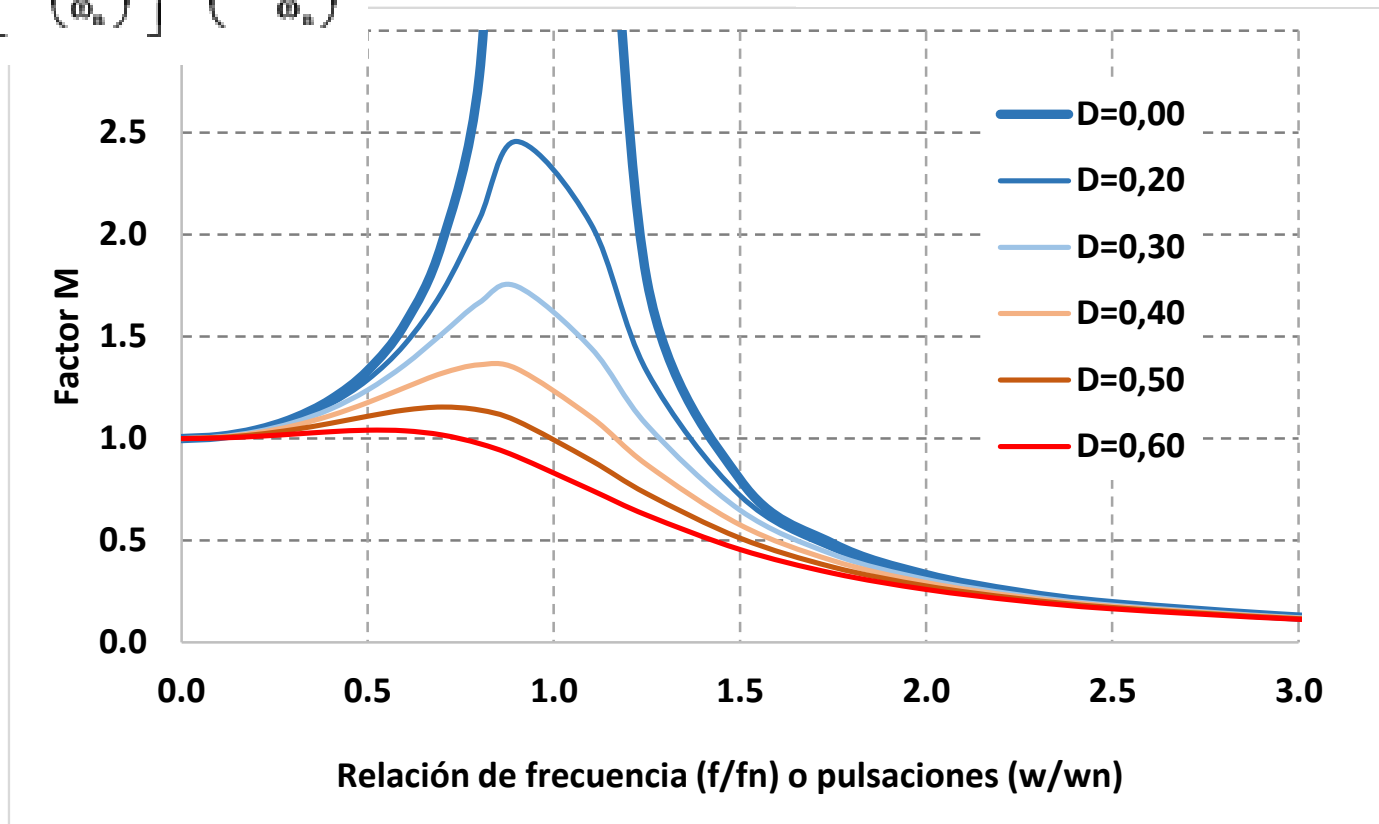
CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS

AMORTIGUADO

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

$$f_n = f \sqrt{1 - 2D^2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \sqrt{1 - 2D^2}$$





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

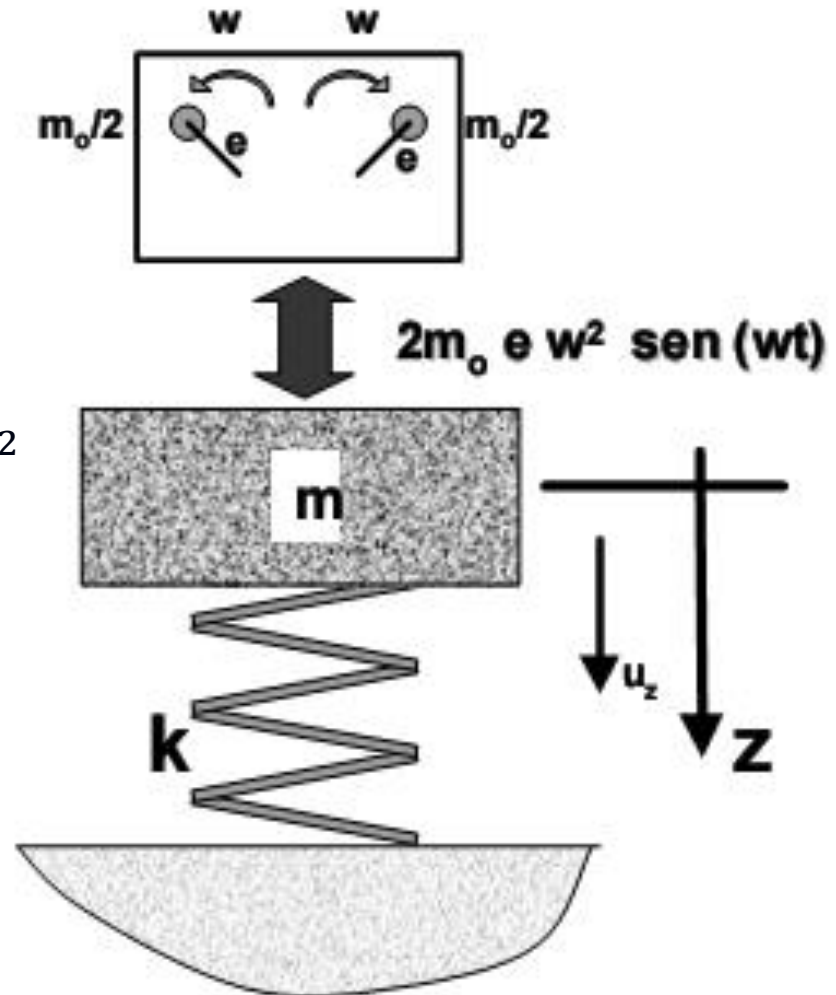
SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS POR CARGAS EXCENTRICAS Y AMORTIGUADO

$$Q(t) = m_e e \omega^2 \sin(\omega \cdot t)$$

$$\Delta_e = \frac{Q_o}{k} = \frac{m_e e \omega^2}{k} = \frac{m_e e}{m} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

$$M_e = \frac{\Delta_{din}}{\frac{m_e e}{k}} = \frac{\Delta_{din}}{\Delta_{est}} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 = M \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

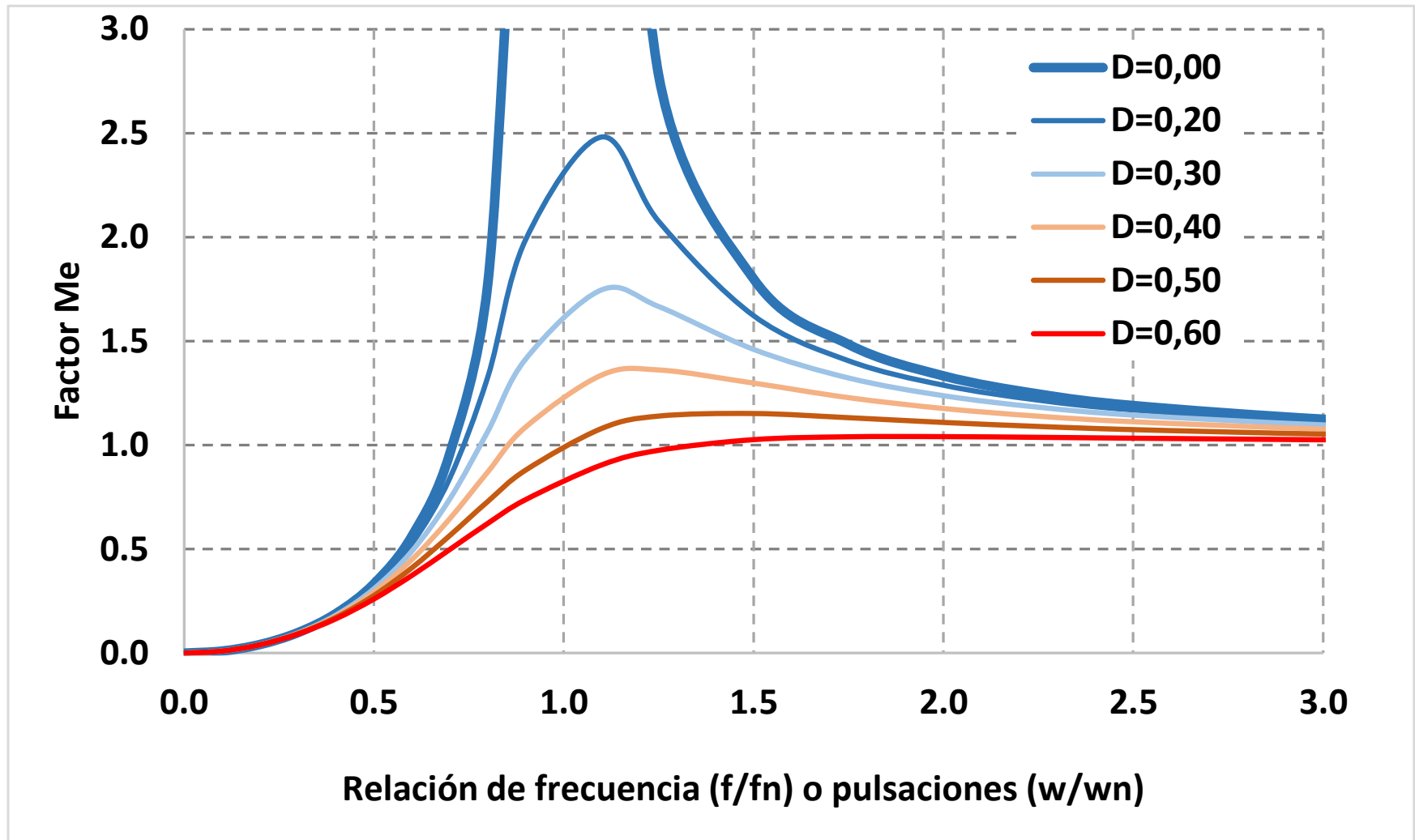
$$f_{na} = f_n \frac{1}{\sqrt{1 - 2D^2}}$$





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

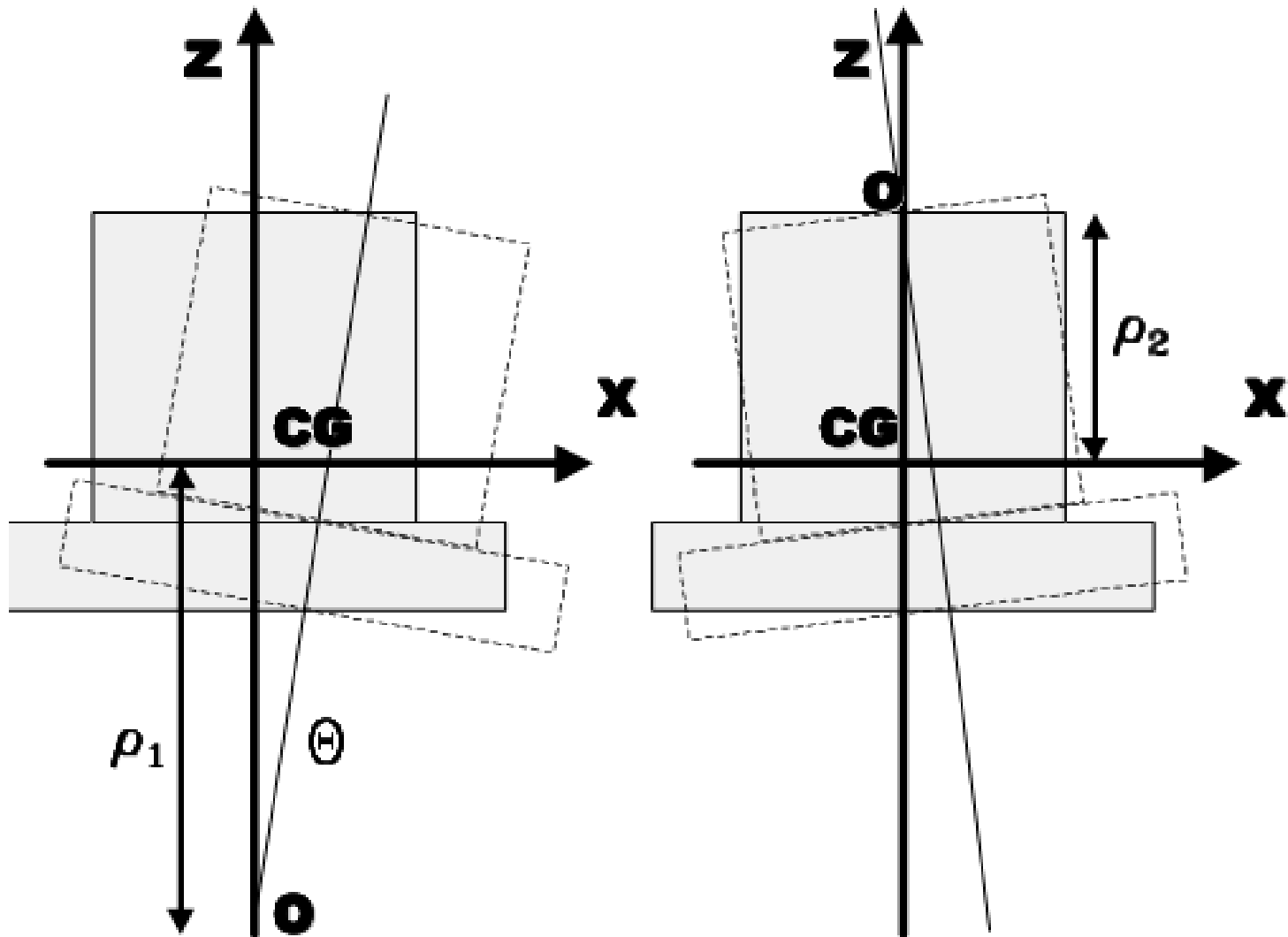
SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS POR CARGAS EXCENTRICAS Y AMORTIGUADO





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

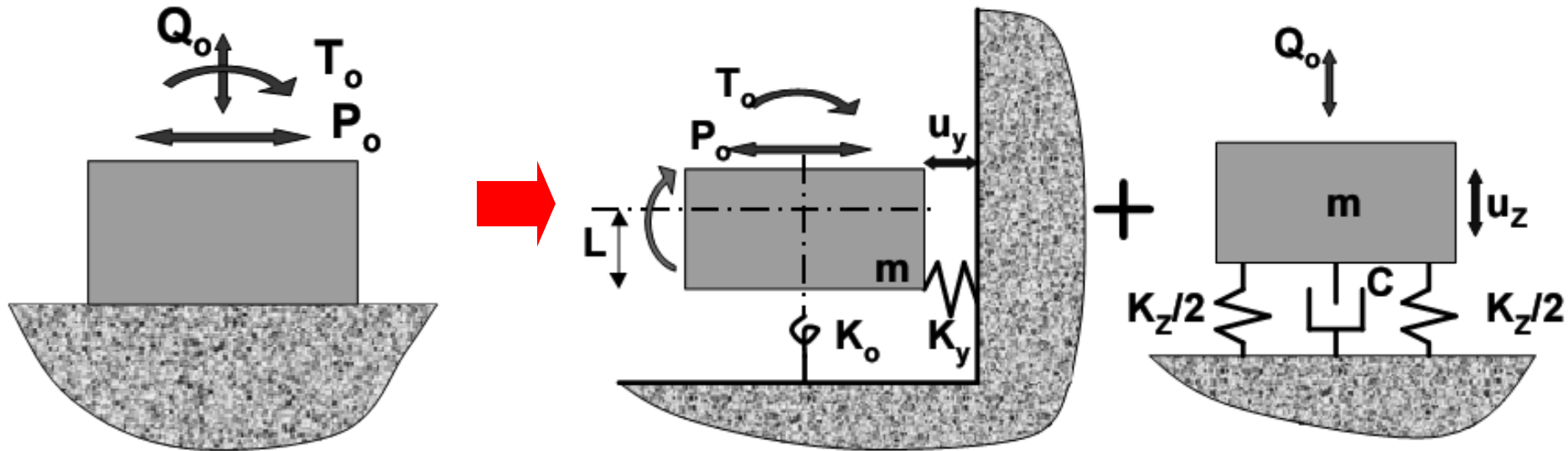
COMBINACION DE DESPLAZAMIENTOS





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

COMBINACION DE DESPLAZAMIENTOS





DATOS DE CALCULO PARAMETROS DE SUELO



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

DATOS DEL PROBLEMA

- **De Proyecto**

- Normativas locales de aplicación en relación con cuestiones de cimentación y ambientales.
- Información de limitaciones estructurales.

- **De la Máquina**

- Indicaciones respecto de desplazamientos admisibles y frecuencias de trabajo.
- Interpretación de esfuerzos dinámicos generados.
- Recomendaciones de elementos de contacto con el cimiento.
- Criterios generales de diseño.



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

PARAMETROS PRINCIPALES

- **Velocidad de Propagación de la Onda**
- **Módulo de Elasticidad Dinámica**
- **Factor de Amortiguamiento**

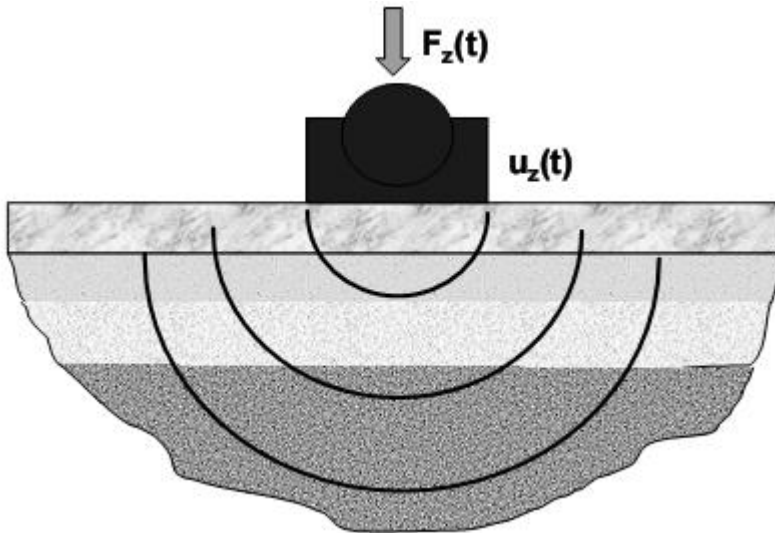
ENSAYOS DE CARACTERIZACION

- **Ensayos de penetración (SPT, CPT)**
- **Ensayos de propagación de onda en campo (Down hole, Cross hole, Refracciones, SASW).**
- **Ensayos de Laboratorio**
 - **Columna Resonante**
 - **Traxial Cíclico.**

CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA



$$v_p = \sqrt{\frac{E_s(1-\mu)}{\rho(1-\mu)(1-2\mu)}}$$

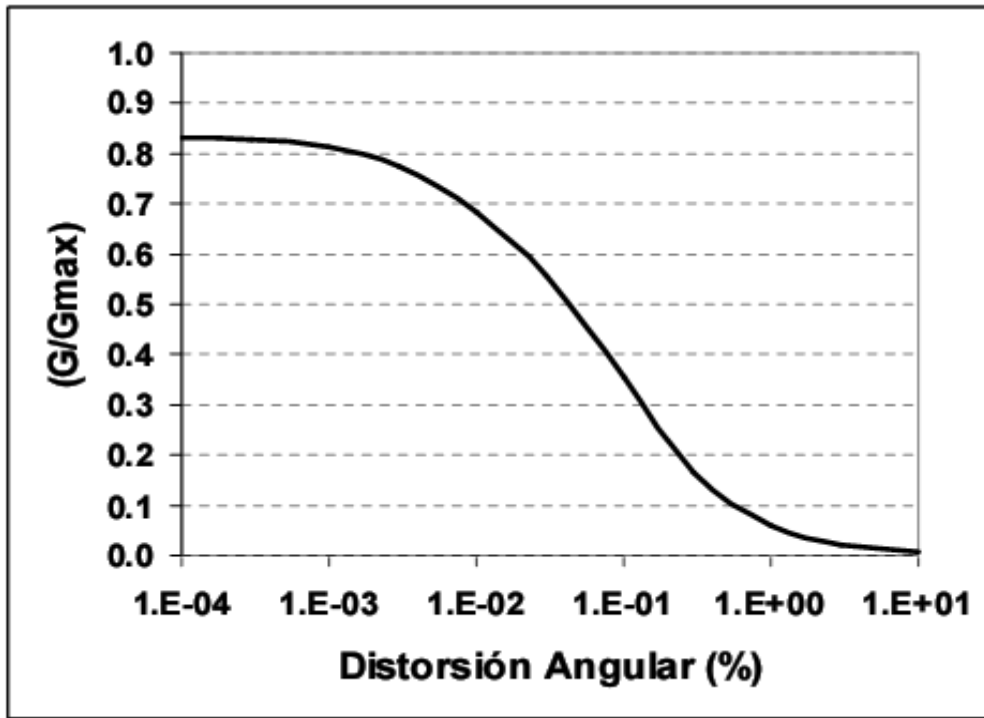
$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

CARACTERISTICAS ELASTICAS DEL SUELO



Suelos friccionales

$$G_{max} = 4.500 \cdot (N_1)_{60}^{1/3} \cdot \sqrt{\sigma_o^*}$$

Suelos cohesivos

$$G_{max} = 625 \frac{OCR^{\mu^*}}{0,30 + 0,70e^2} \cdot \sqrt{p_a \sigma_o^*}$$

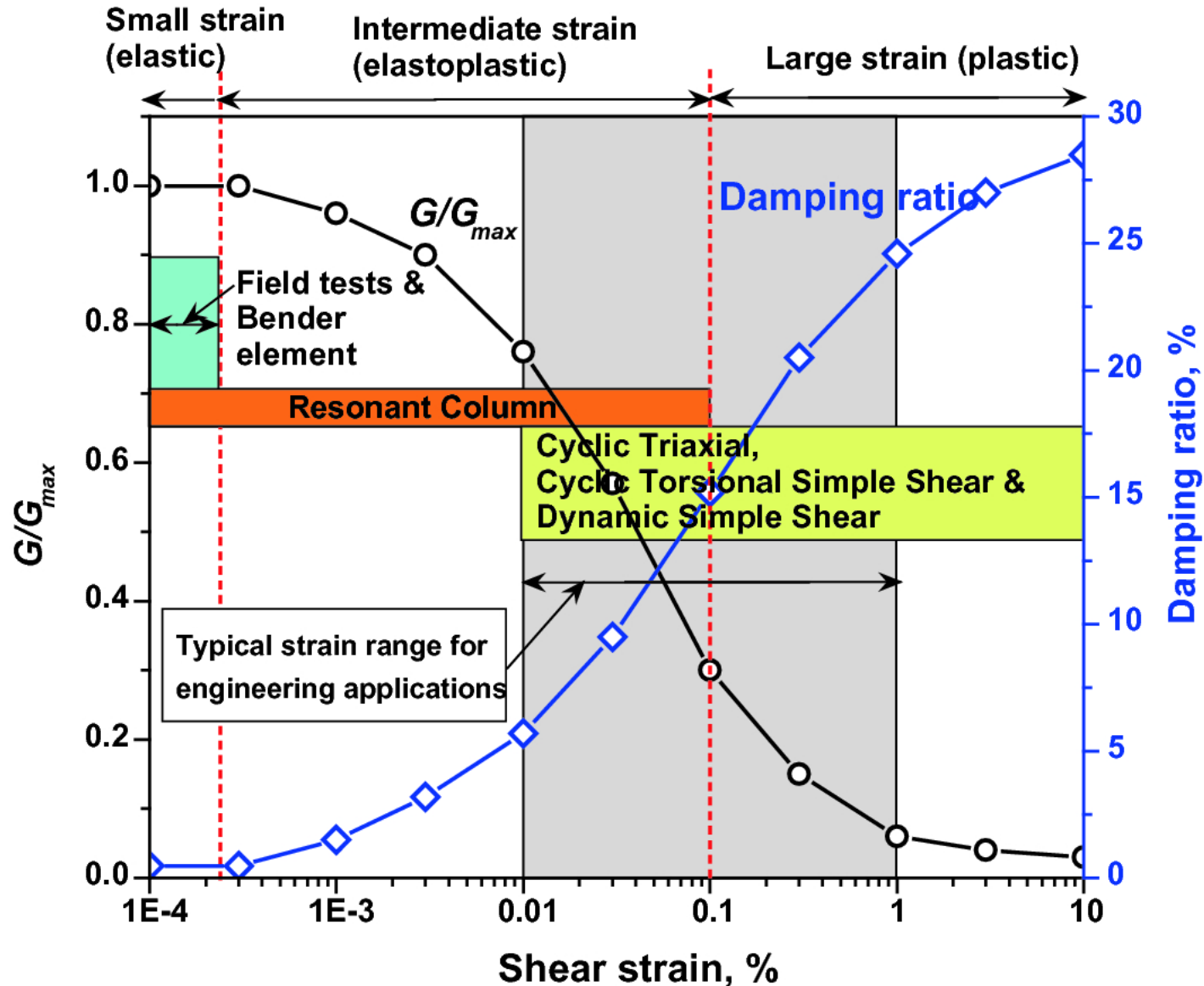
Curva de atenuación

$$\frac{G}{G_{max}} = [1,2 + 16 \cdot \gamma \cdot (1 + 10^{(-20\gamma)})]^{-1}$$



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

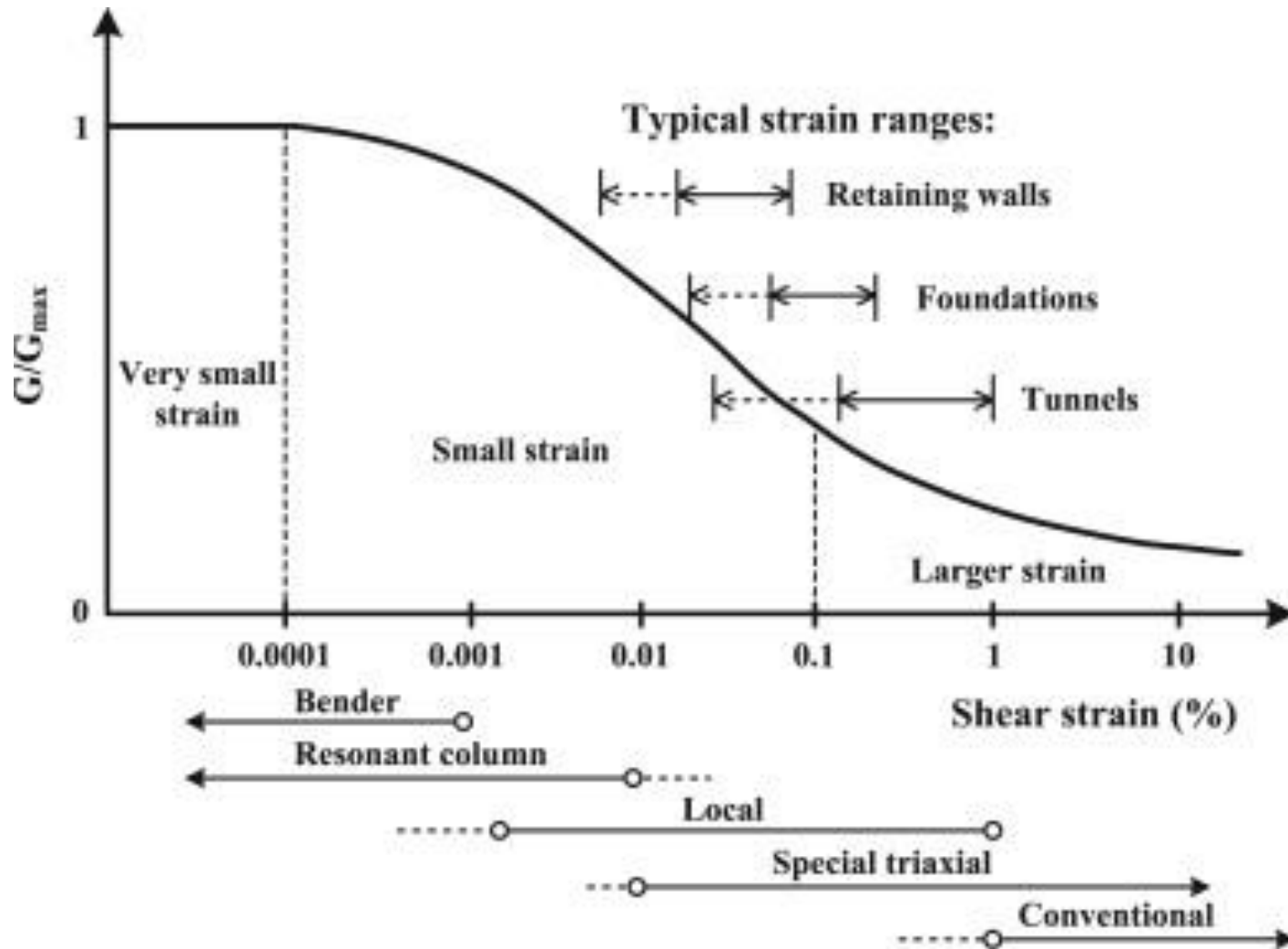




CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

ENSAYOS Y APLICACIONES

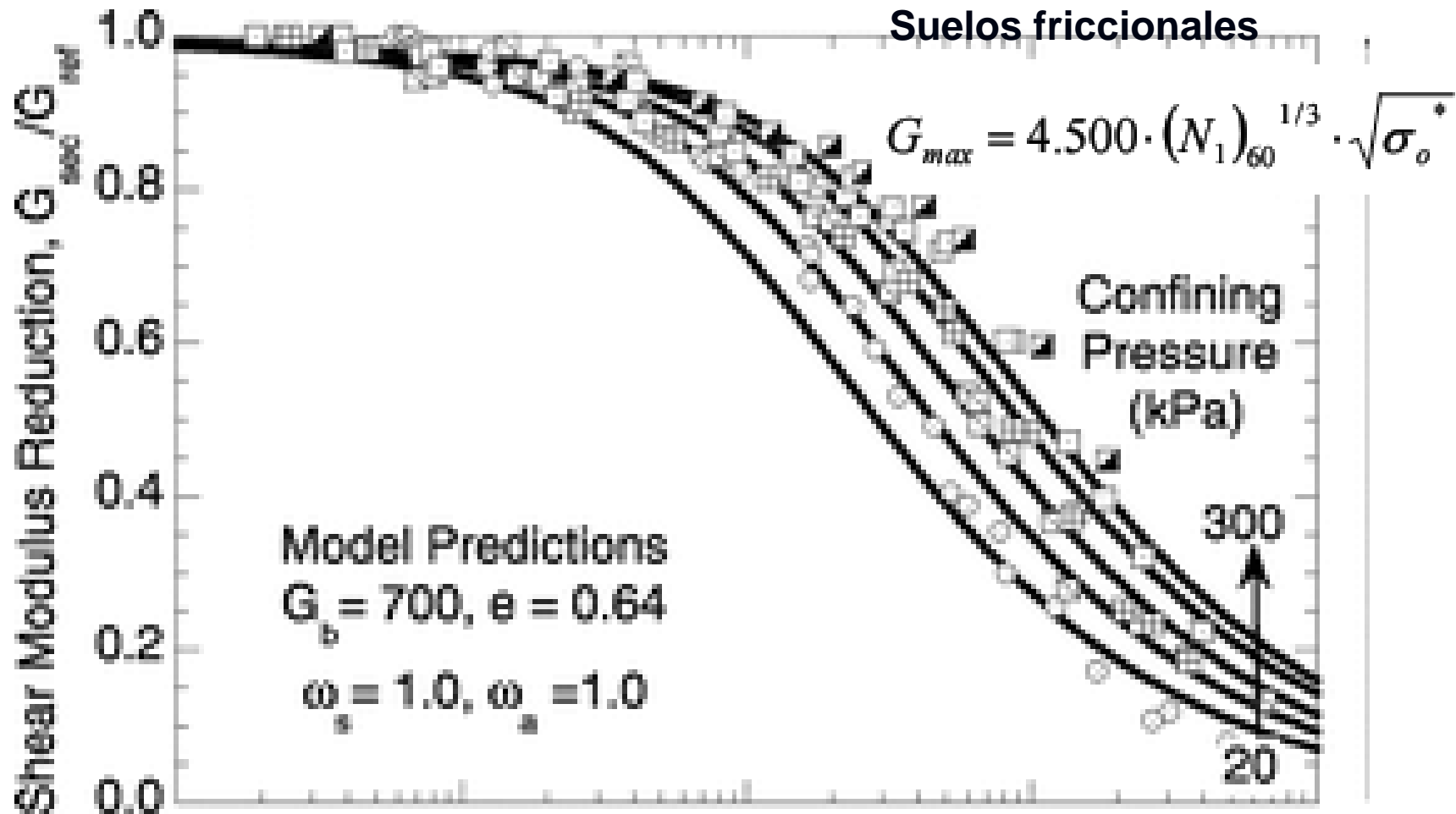




CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

CARACTERISTICAS ELASTICAS DEL SUELO

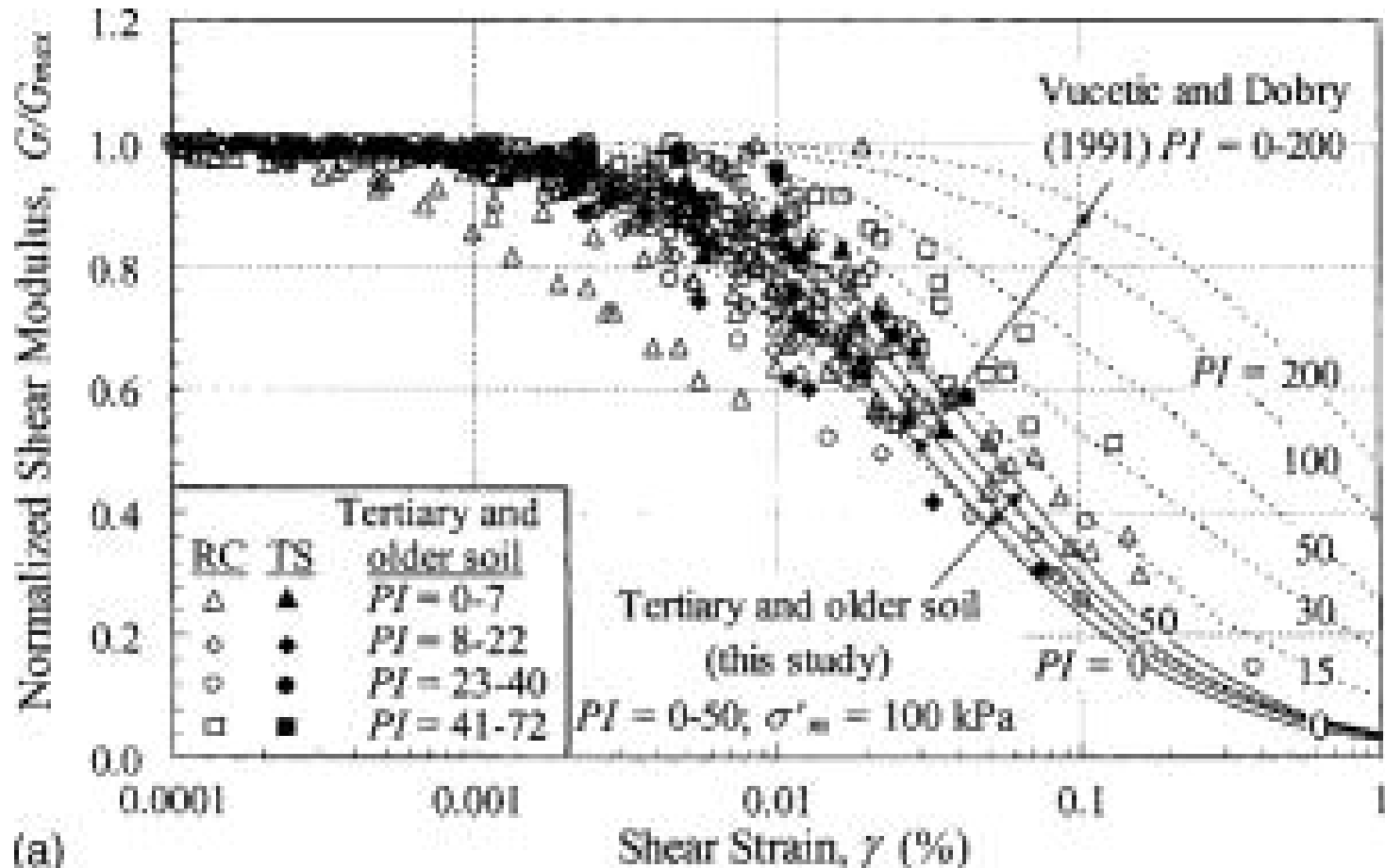




CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

CARACTERISTICAS ELASTICAS DEL SUELO

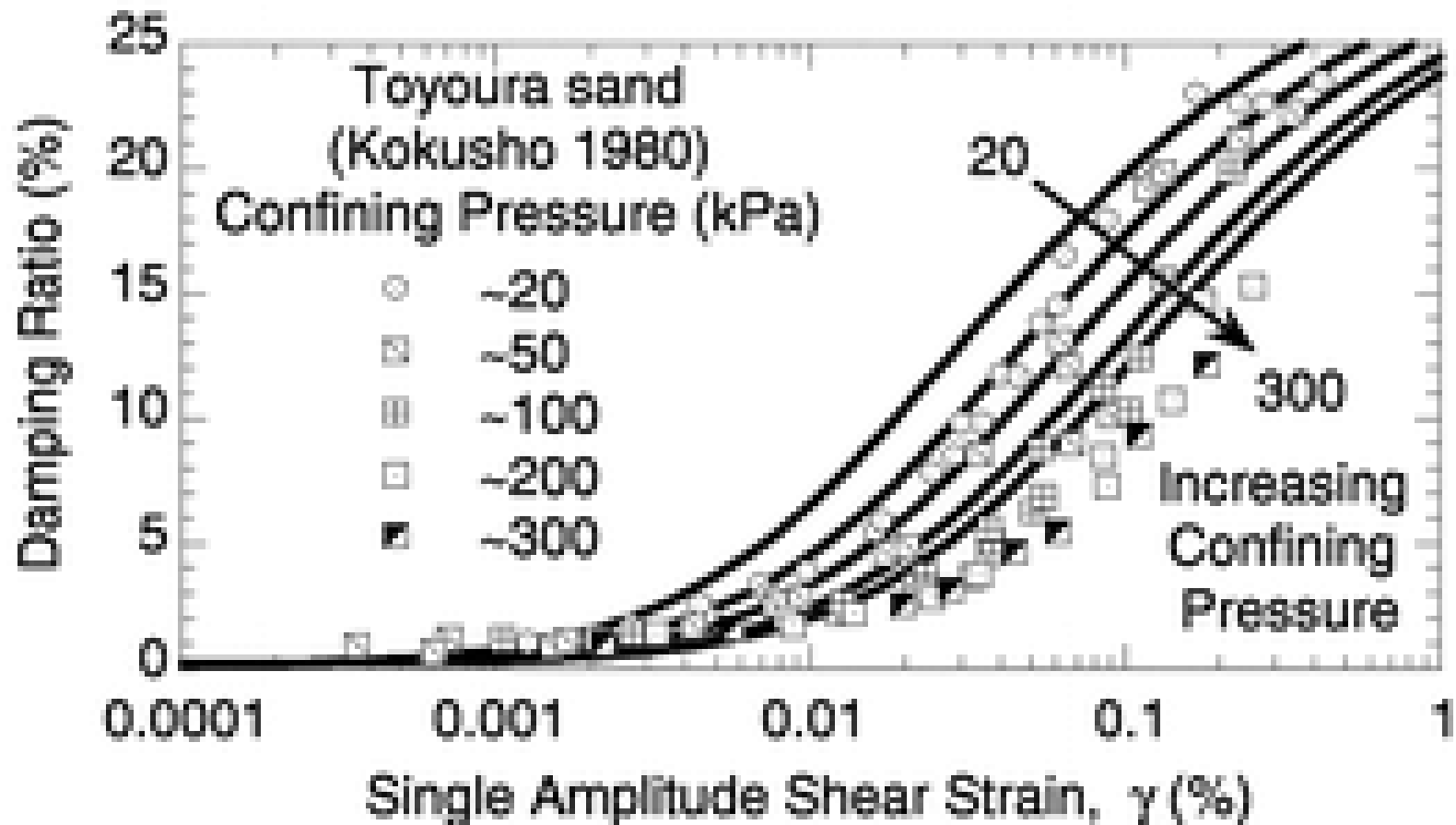




CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

AMORTIGUAMIENTO





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

AMORTIGUAMIENTO

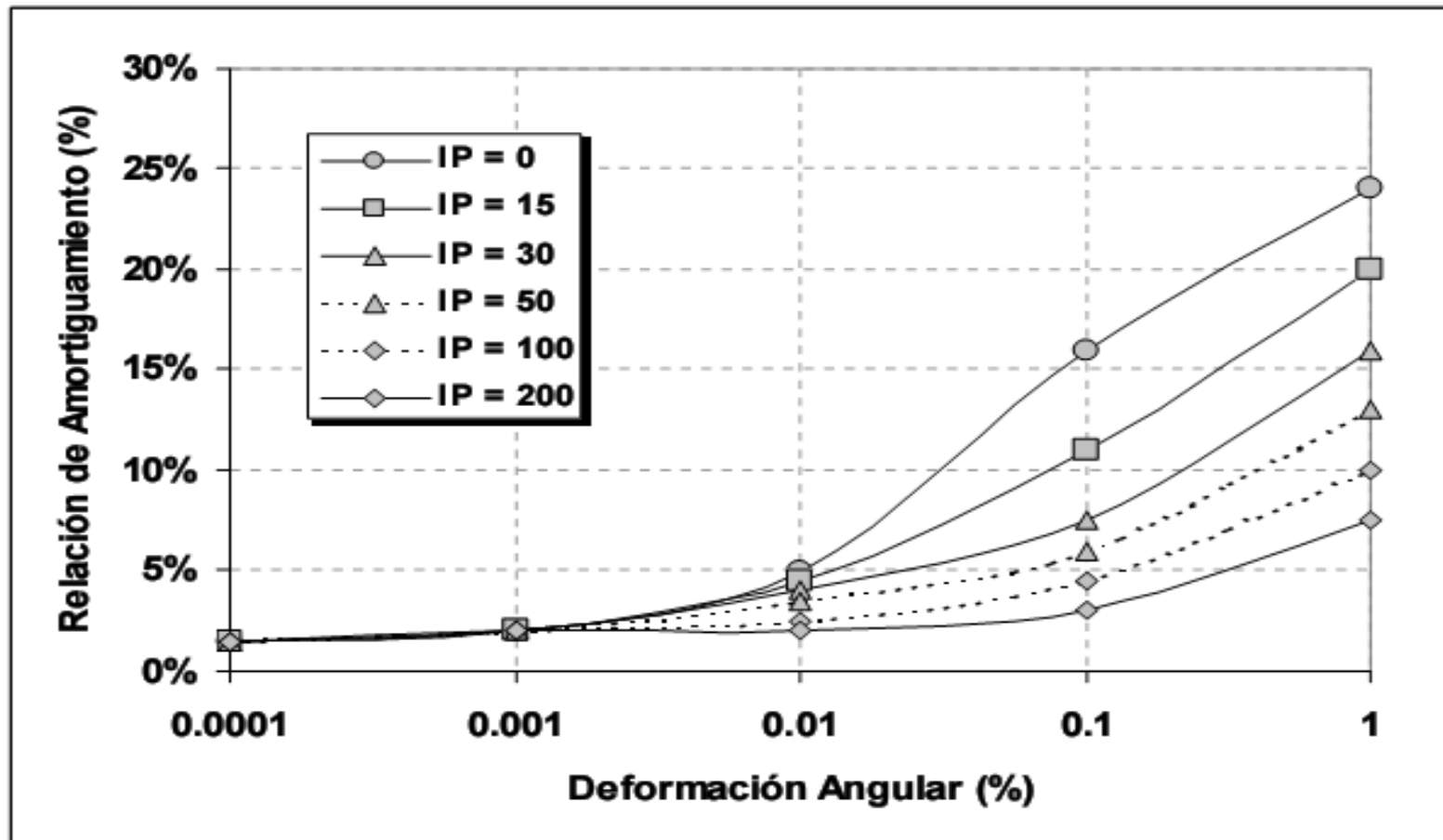


Figura N° 15. Deformación angular vs relación de amortiguamiento (%)
Fuente: Vucetic y Dobry (1991).



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

PARAMETROS COMPLEMENTARIOS

Radio Equivalente

$$r_o = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Coef. De Poisson

$$\begin{array}{ll} \mu = 0,25 \text{ a } 0,35 & \text{para suelos sin cohesión} \\ \mu = 0,35 \text{ a } 0,45 & \text{para suelos cohesivos.} \end{array}$$

Relación de Masas

$$b = \frac{1-\mu}{4} \cdot \frac{m_o}{\rho \cdot r_o^3} = \frac{1-\mu}{4} \cdot \frac{W_o}{\gamma \cdot r_o^3}$$

Constante Elástica

$$k_z = \frac{4Gr_o}{1-\mu}$$

Amortiguamiento

$$D_z = \frac{0,425}{\sqrt{b_z}}$$



MODELO SIMPLIFICADO EN SISTEMA REGULARES

MODELO DE IMPACTO



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

1. Cálculo de peso total del sistema máquina – cimiento (predimensionado) → W_o

2. Verificación de la presión de contacto,

$$\sigma_{\text{cont}} < 1/3 \sigma_{\text{adm}}$$

**3. Cálculo de la masa del sistema máquina – cimiento
→ $m_o = W_o/g$**

**4. Identificar el modo de vibración de la máquina:
traslacional, rotacional, torsional.**



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

5. Definición del radio equivalente, r_o

Modo de vibración	r_o (m)	I (m ⁴)
Traslacional	$r_o = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$	
Rotativo	$r_o = \sqrt[4]{\frac{L^3 \cdot B}{3\pi}}$	$I_\theta = m \left(\frac{r_o^2}{4} + \frac{H^2}{3} \right)$
Torsional	$r_o = \sqrt[4]{\frac{A(L^2 + B^2)}{6\pi}}$	$I_\psi = \frac{m \pi r_o^2}{2}$



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

6. Definición del módulo elástico, k

Modo de vibración	K
Vertical	$k_z = \frac{4G_s r_o}{1 - \mu}$
Horizontal	$k_x, k_y = \frac{32 \cdot (1 - \mu) \cdot G_s r_o}{7 - 8\mu}$
Rotativo	$k_\theta = \frac{8G_s r_o^3}{3 \cdot (1 - \mu)}$
Torsional	$k_\psi = \frac{16}{3} \cdot G_s r_o^3$



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

7. Cálculo de la frecuencia natural del sistema

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m_o}}$$

8. Cálculo de Factor de Masa y Amortig. Relativo

Modo de vibración	b	Ω
Vertical	$b_z = \frac{1-\mu}{4} \cdot \frac{W_o}{\gamma \cdot r_o^3}$	$\Omega_z = \frac{0,425}{\sqrt{b_z}}$
Traslación	$b_x, b_y = \frac{7-8\mu}{32 \cdot (1-\mu)} \cdot \frac{W_o}{\gamma \cdot r_o^3}$	$\Omega_x = \frac{0,288}{\sqrt{b_x}}$
Rotativo	$b_\theta = \frac{3(1-\mu)}{8} \cdot \frac{I_\theta}{\rho \cdot r_o^5}$	$\Omega_\theta = \frac{0,15}{(1+b_\theta)\sqrt{b_\theta}}$
Torsional	$b_\psi = \frac{I_\psi}{\rho \cdot r_o^5}$	$\Omega_\psi = \frac{0,50}{1+2b_\psi}$

Tabla N° 4. Factores de masa (b) y amortiguamiento (Ω)



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

9. Cálculo de la frecuencia amortiguada

$$f_{na} = f_n \cdot \sqrt{1 - 2D^2} \quad \text{Fuerza constante}$$

$$f_{na} = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2D^2}} \quad \text{Fuerza excéntrica}$$

10. Cálculo de la Relación de Amortiguamiento

$$\xi = \frac{f_{solic}}{f_{na}}$$

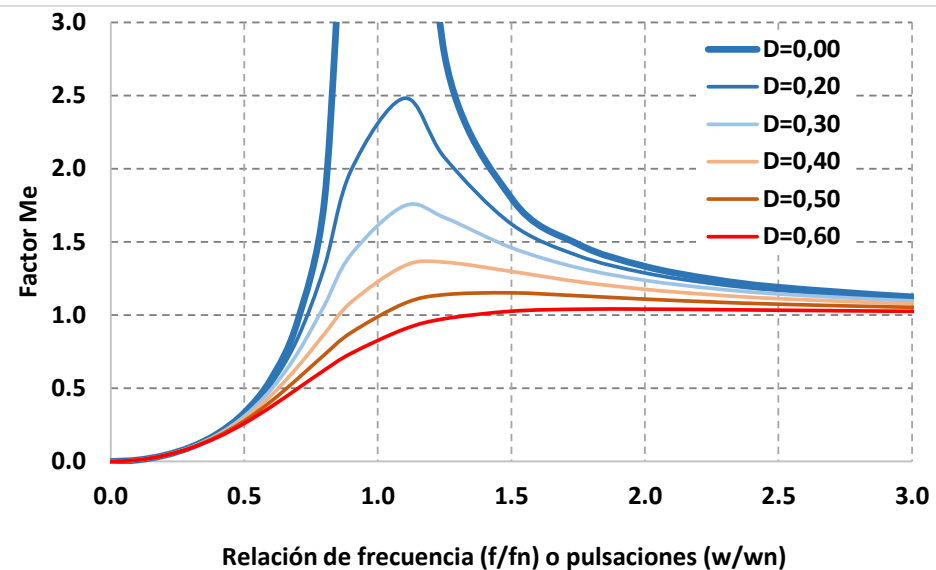
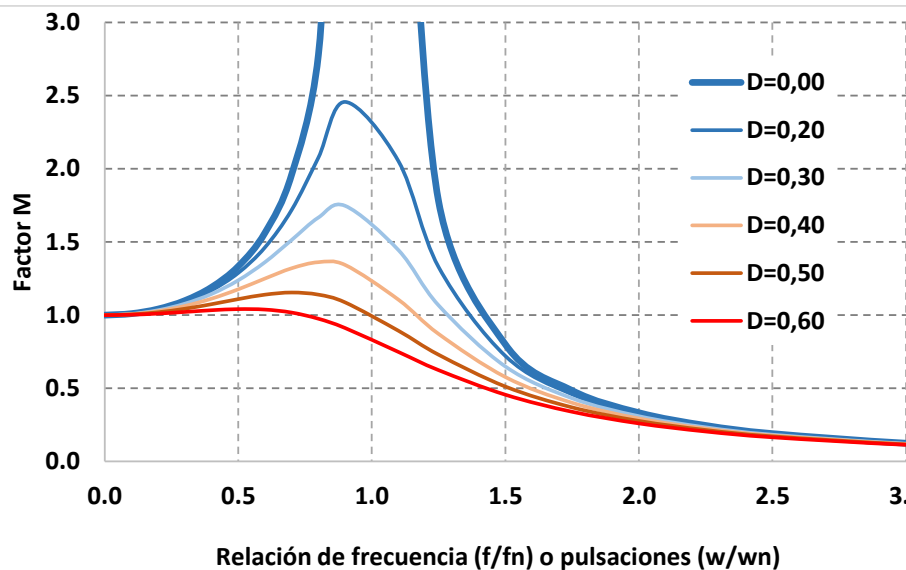


CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

11. Identificación del Factor de Magnificación





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

SOLICITACIONES PERIODICAS

METODO DE CALCULO SIMPLIFICADO

12. Identificación de la Fuerza Desbalanceada

13. Identificación del Desplazamiento Estático

$$A_{est} = \frac{P}{k}$$

14. Identificación del Desplazamiento Dinámico

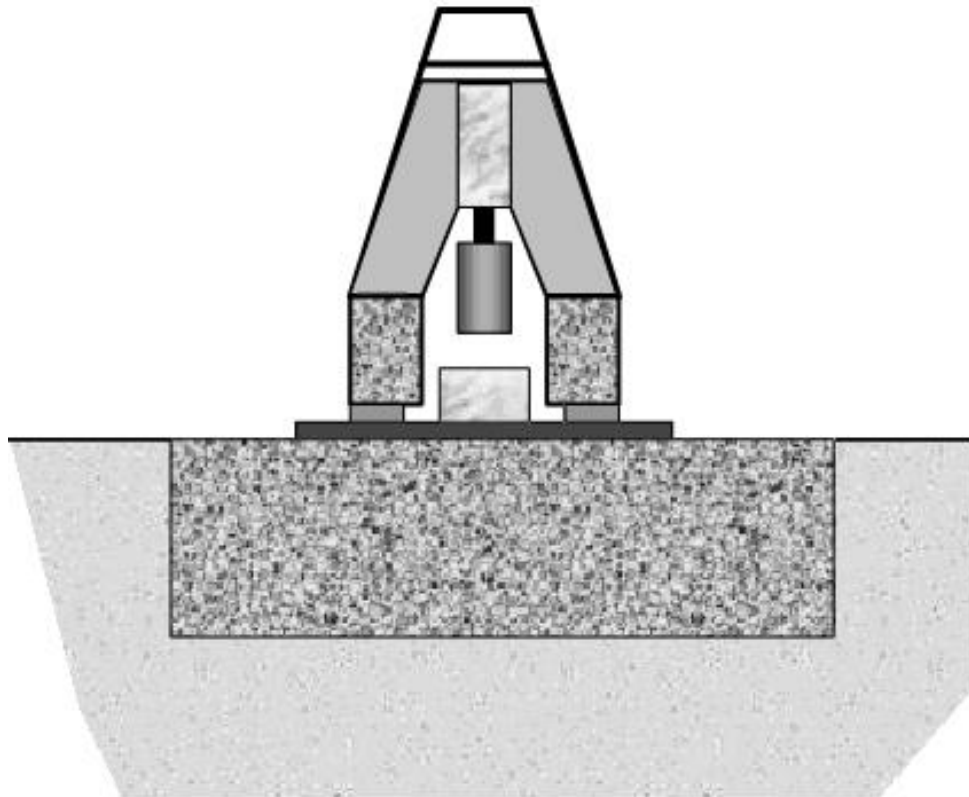
$$A_{din} = A_{est} M$$

$$A_{din} = A_{est} M \xi^2$$



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

MAQUINAS DE IMPACTO



$$m \cdot v_o = (m + M) \cdot v$$

$$v = (1 + \varepsilon) \cdot \frac{m}{m + M} \cdot v_o$$

$$\frac{1}{2} \frac{(W_o + W)}{g} v^2 = \frac{1}{2} \cdot \delta_{din} \cdot P_f$$

$$\frac{1}{2} \frac{(W_o + W)}{g} v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{EA} \cdot P_f^2$$

$$P_f = \frac{v}{\sqrt{\delta_{est} g}} (W_o + W)$$



TEMAS VARIOS

AMORTIGUADORES Y RESORTES

MODELOS ELEMENTOS FINITOS



CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

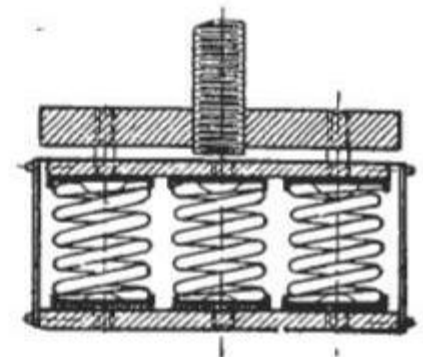
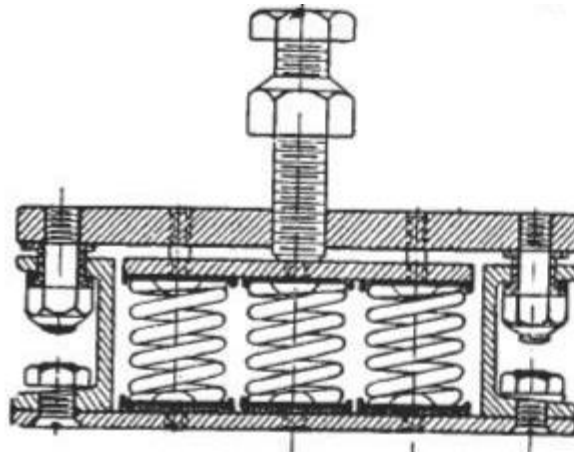
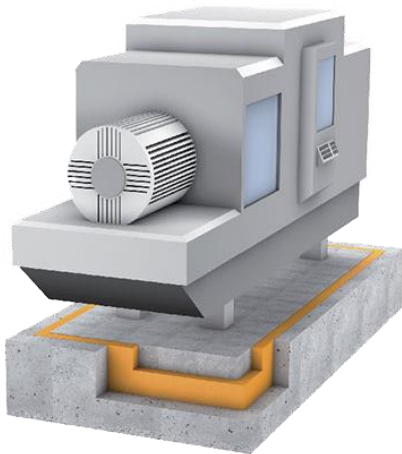
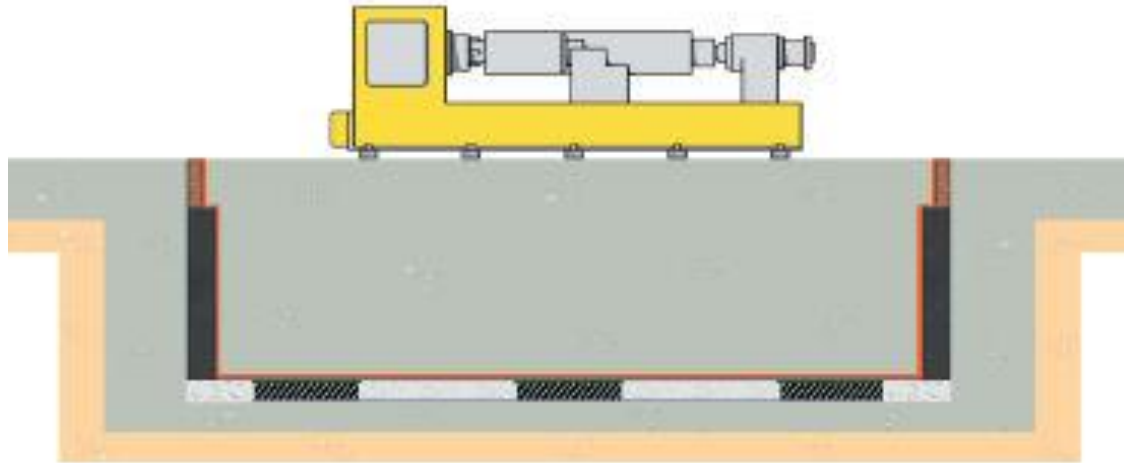
AISLANTES - AMORTIGUADORES

Resortes de acero	Helicoidales cilíndricos Laminados
Materiales absorbentes de las vibraciones	Planchas neumáticas Planchas de corcho Materiales aglomerados Capas de fieltro vibroaislante Tableros de madera
Amortiguadores hidráulicos	

Tabla N° 8. Elementos amortiguadores.

CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

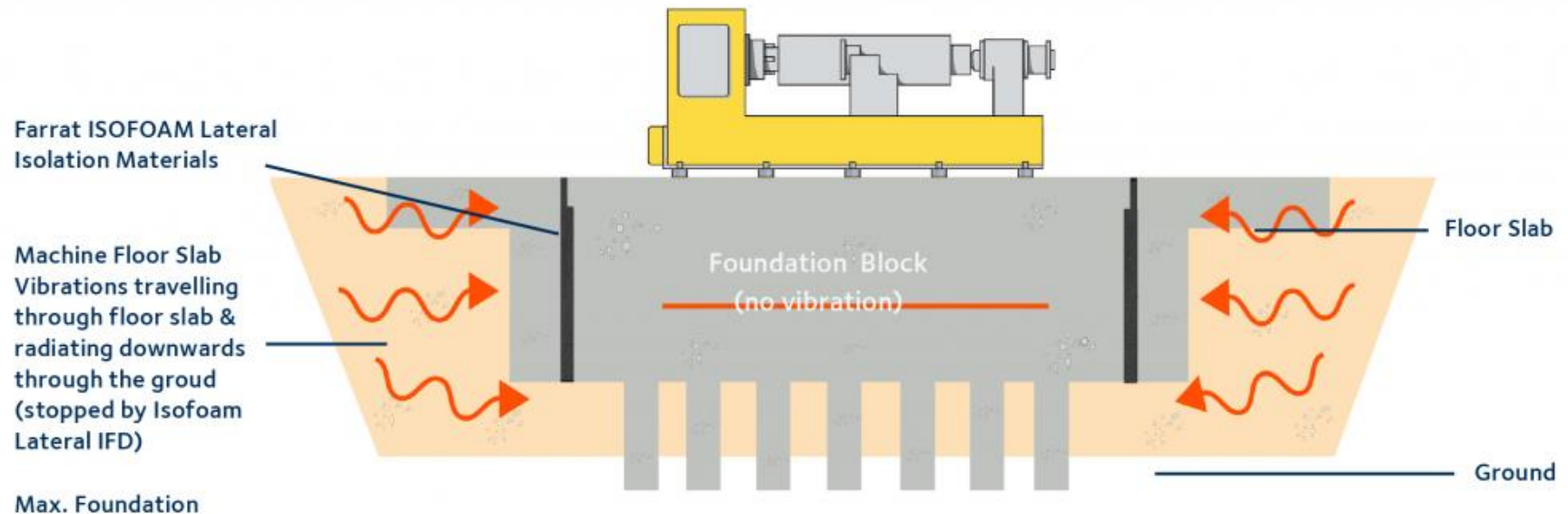
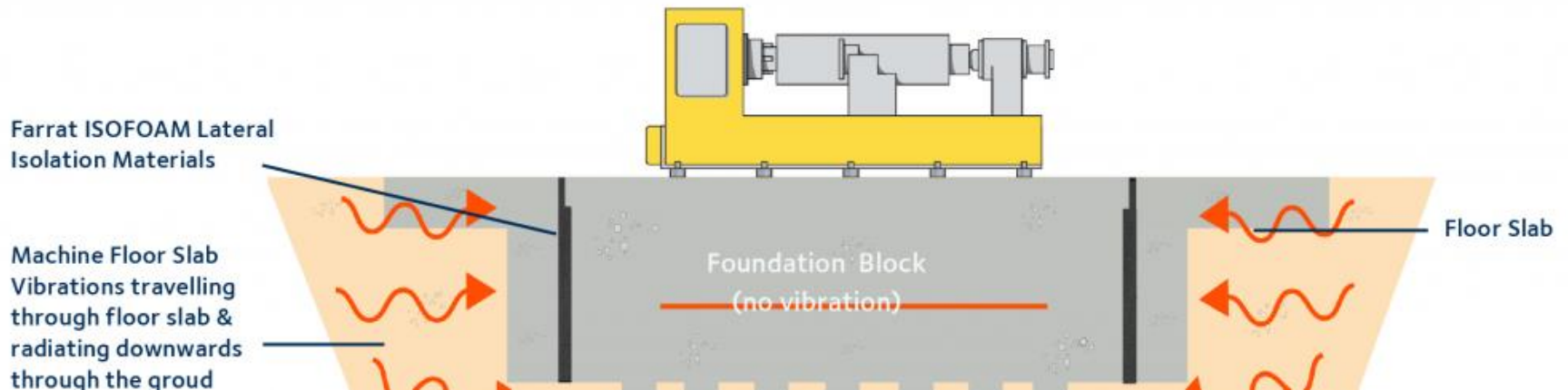
AISLANTES - AMORTIGUADORES





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

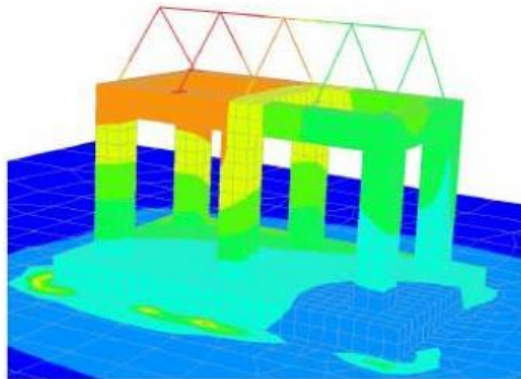
AISLANTES - AMORTIGUADORES



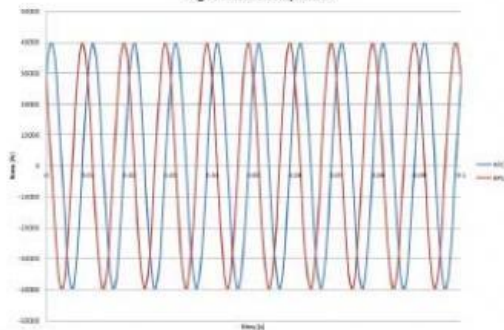
CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

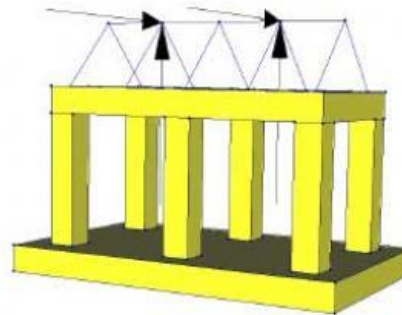
Transient dynamic analysis of a machine foundation



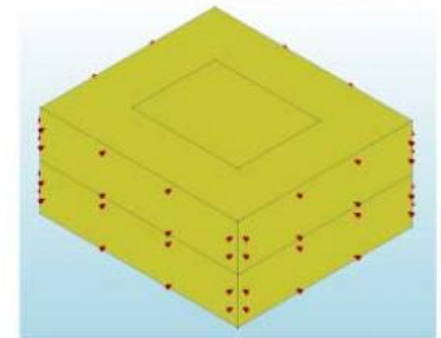
High Pressure Compressor



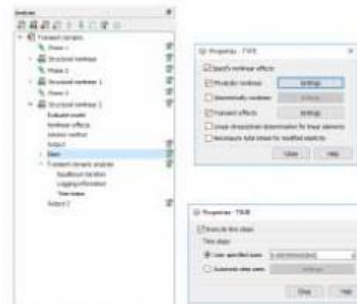
1 - Create geometry of the machine foundation



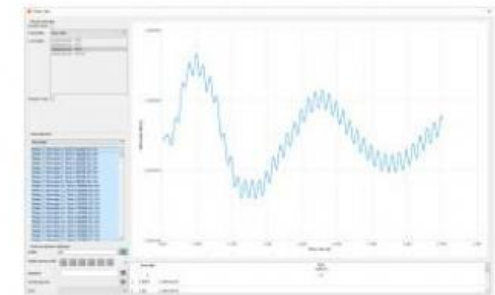
2 - Define the soil and Perfectly Matched Layers



3 - Set up a phased transient dynamic analysis



4 - Check the result amplitudes





CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

