



# **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 solicitudes rotacionales
- Temas varios de interés.

## REFERENCIAS:

- Apuntes de clase. Disponibles en página virtual.



## PREGUNTAS INICIALES

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



**TIPO DE MAQUINAS  
CARACTERIZACION  
VARIABLES ADMISIBLES**



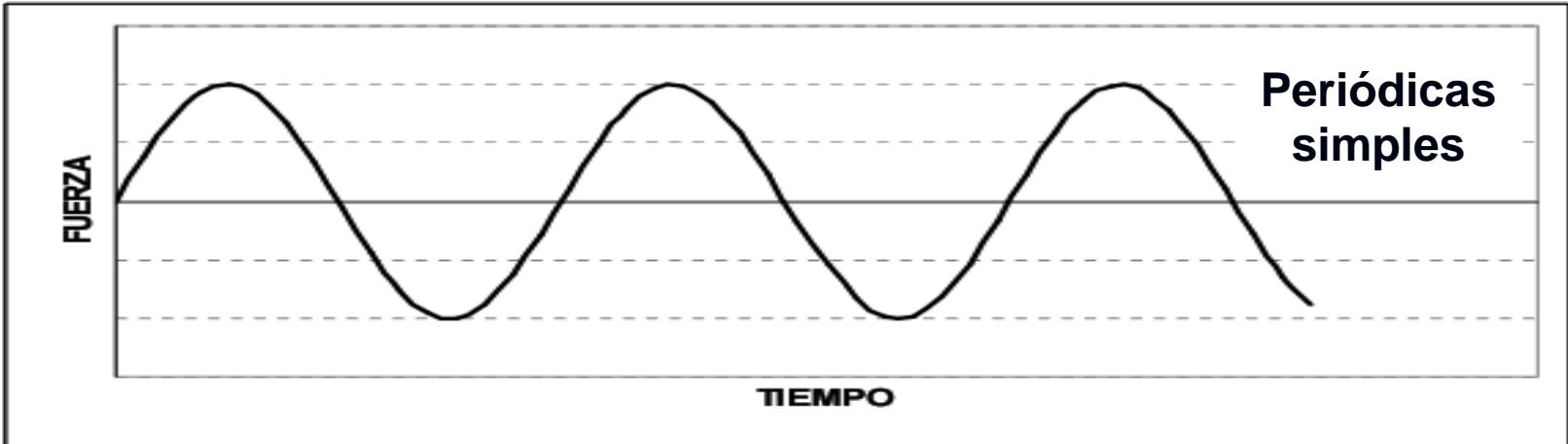
## TIPO DE MAQUINAS

- 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





# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## 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

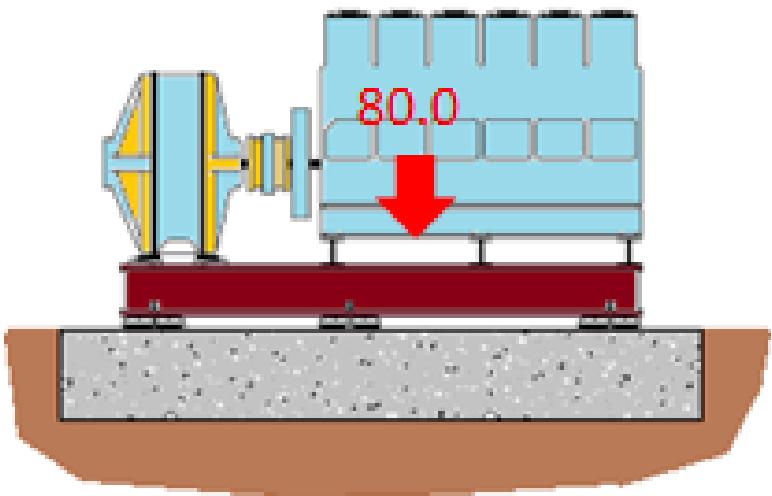
- **Alta Frecuencia,** > de 1000 rpm
  - Turbogeneradores, turbomáquinas, etc.



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## Según la frecuencia de las acciones

- **Media Frecuencia**





## Según la frecuencia de las acciones

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

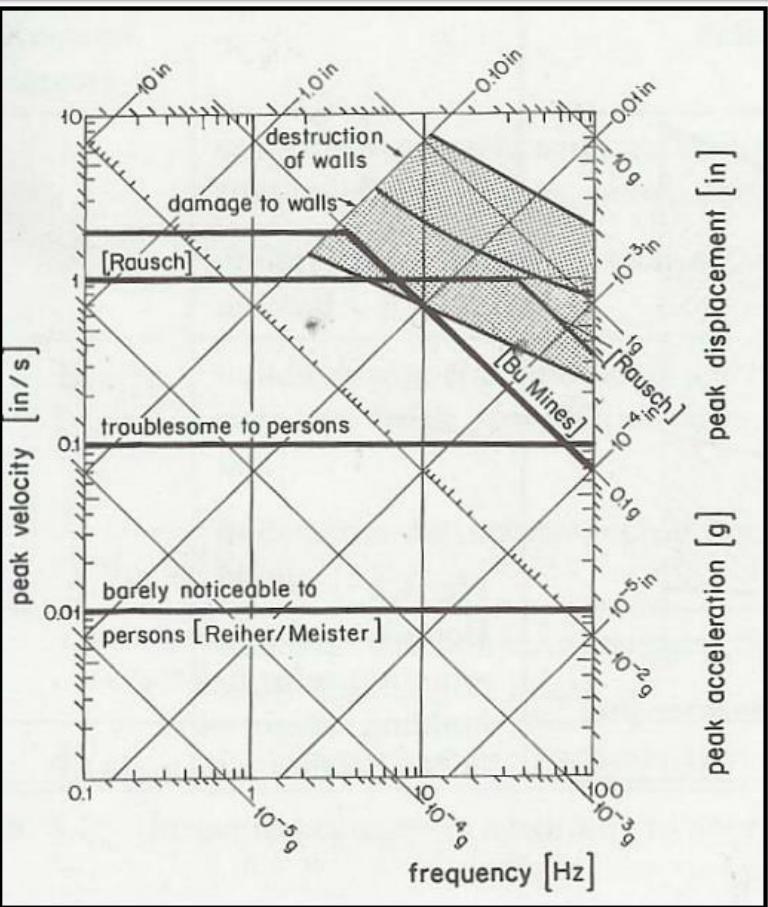




# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## 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

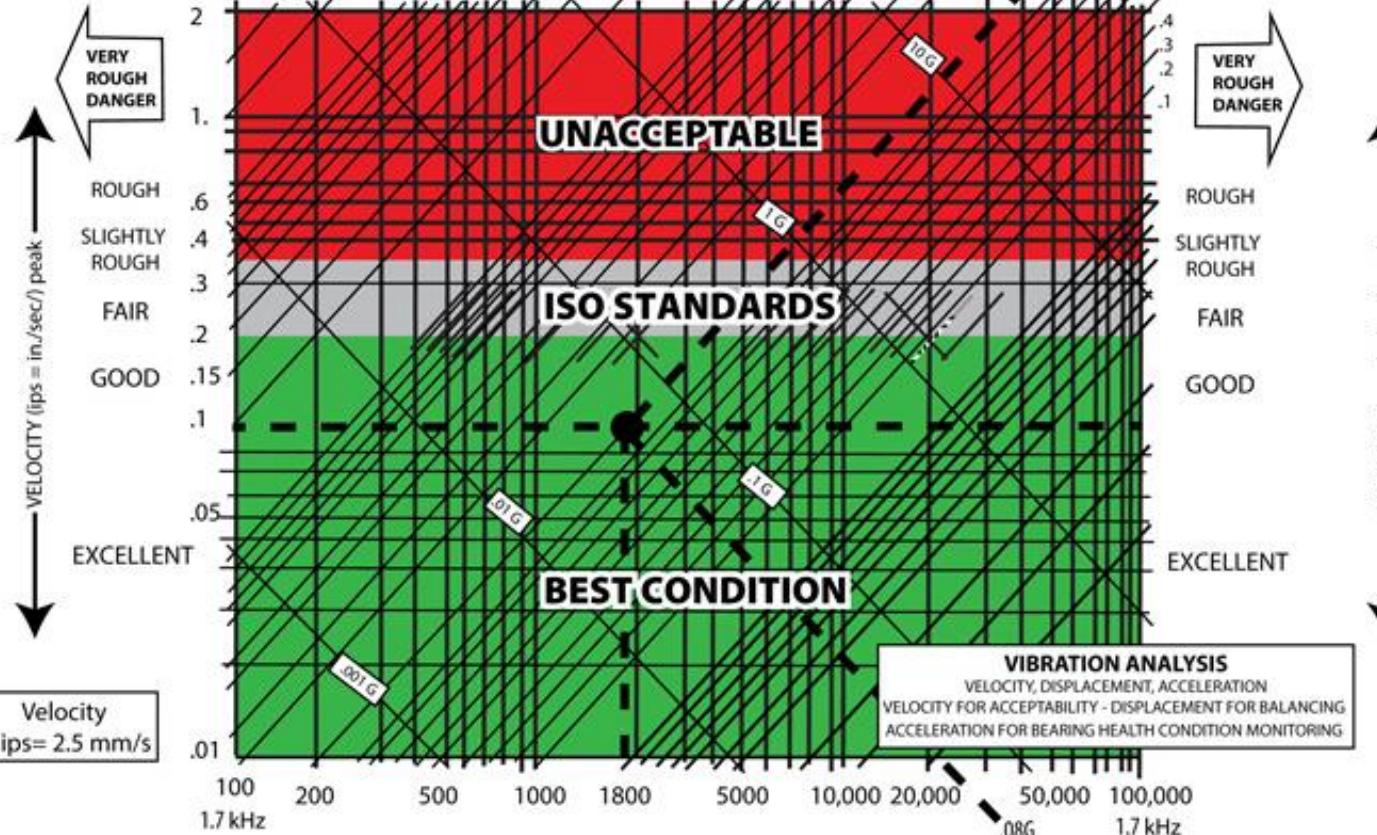
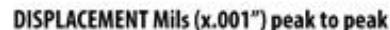
## VARIABLES ADMISIBLES



This Chart is based  
on ISO 10816-3



Displacement  
1 mil = 25 microns

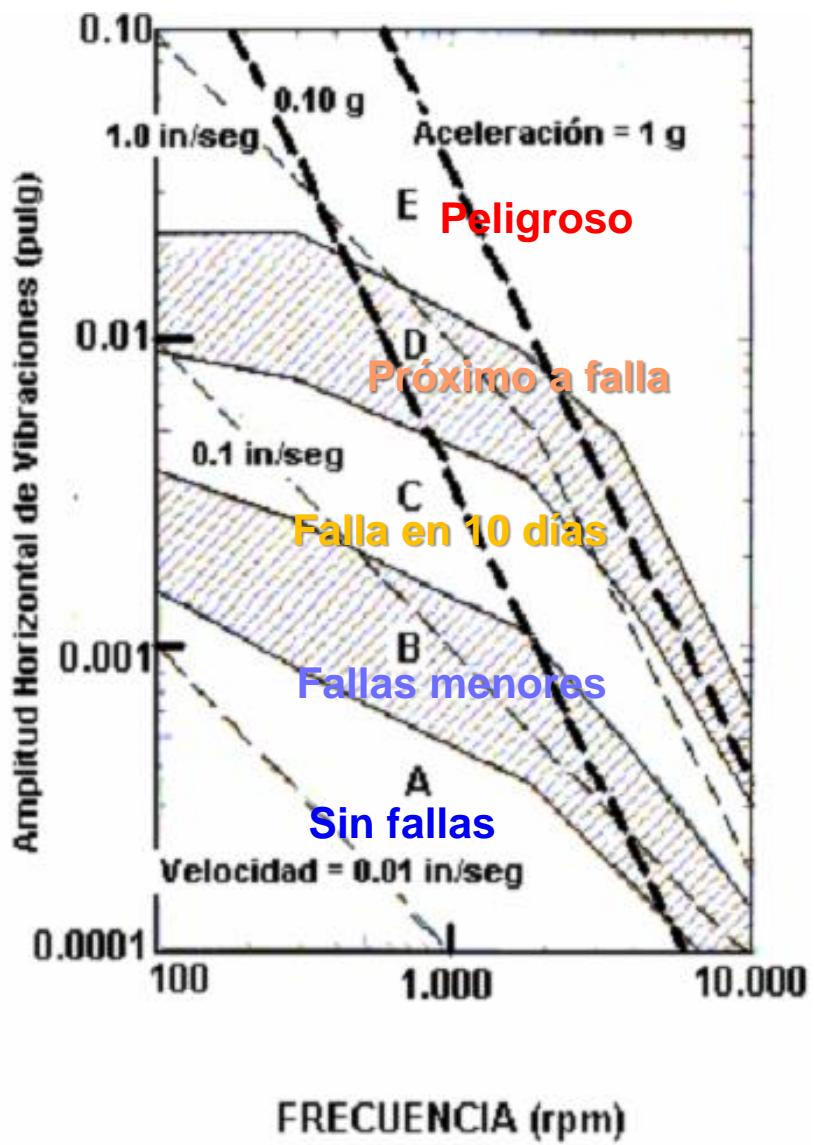
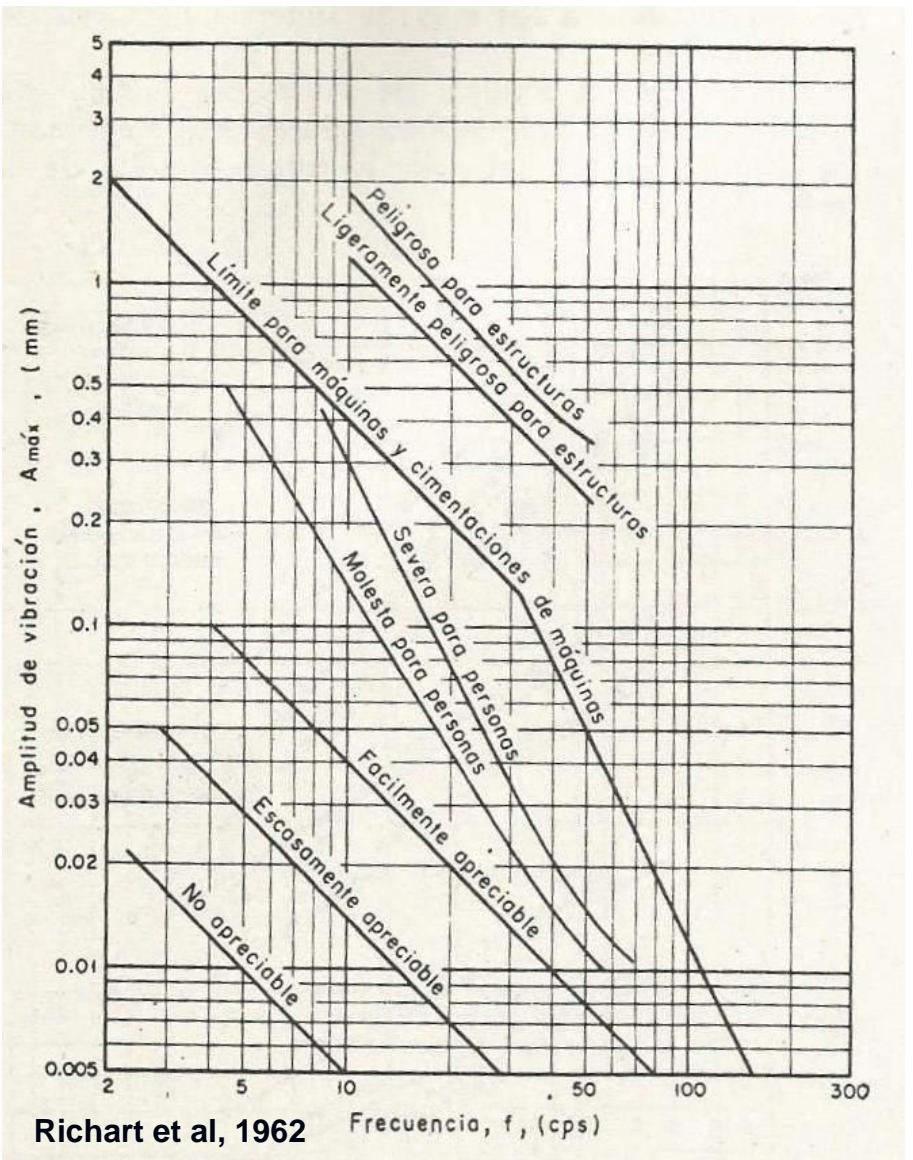


**REFERENCE POINT** ● = 1800 rpm machine/ motor excellent condition

ACCELERATION or FORCE OF GRAVITY "G" ( $\text{ips}^2 = \text{in/sec}^2$  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 CIMENTO RESPECTO DEL RESTO DE LA ESTRUCTURA

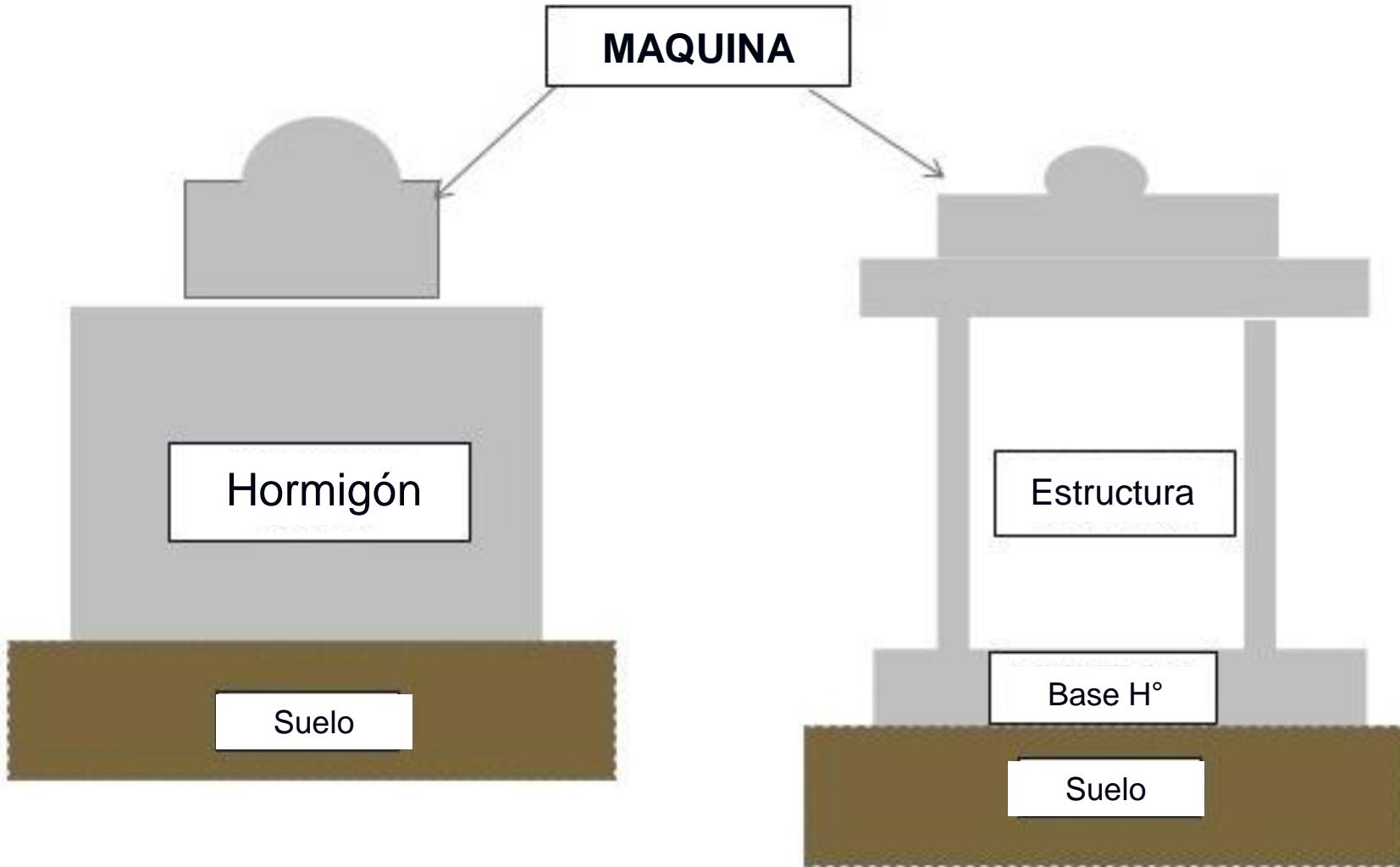
### COMPLEMENTARIAS

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



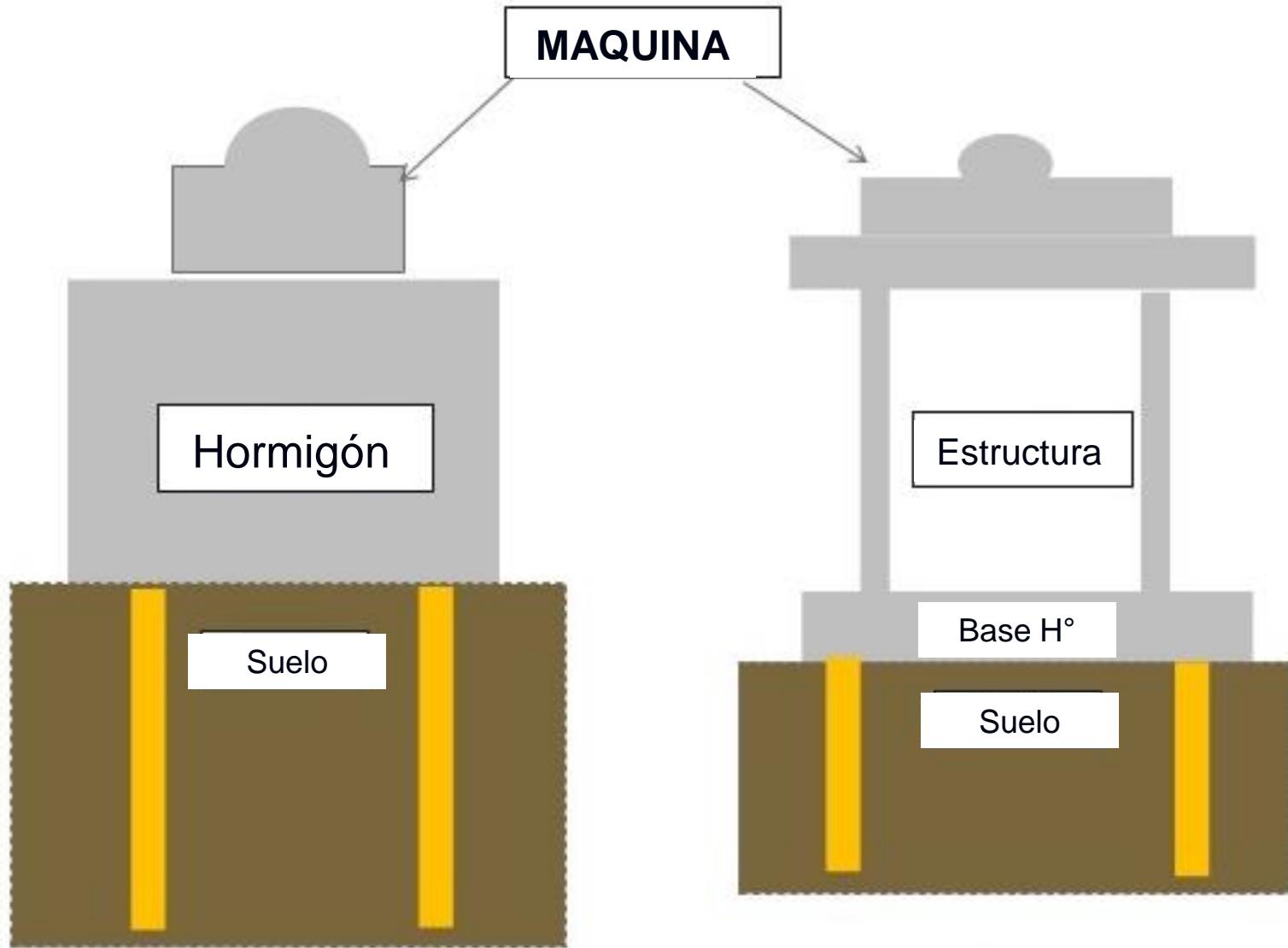
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## OPCIONES DE DISEÑO



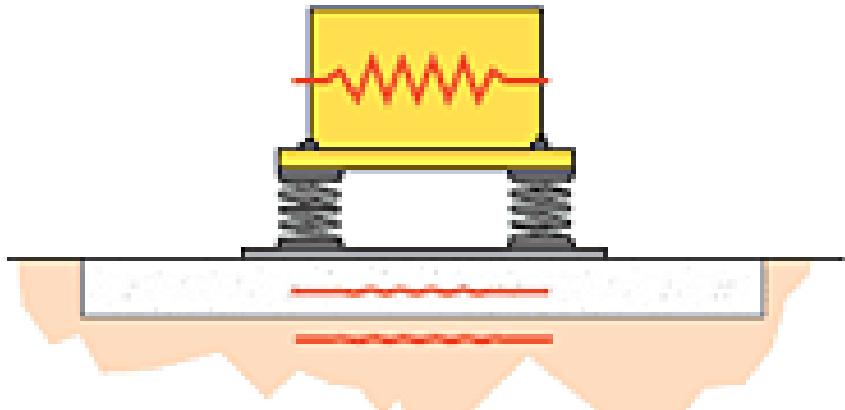
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## OPCIONES DE DISEÑO

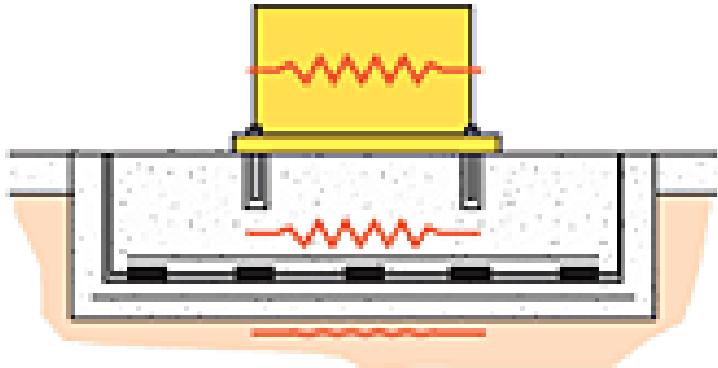


# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

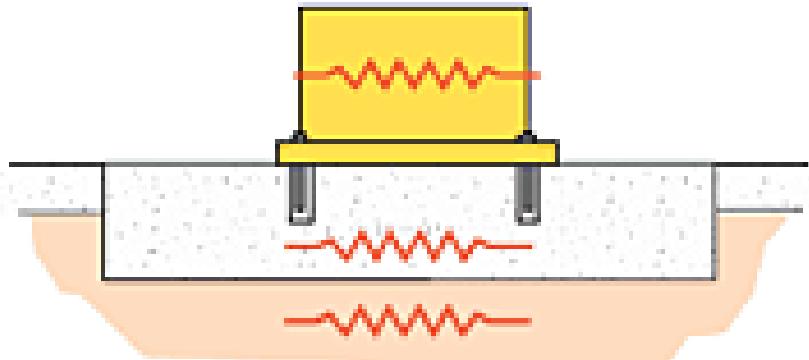
## OPCIONES DE DISEÑO



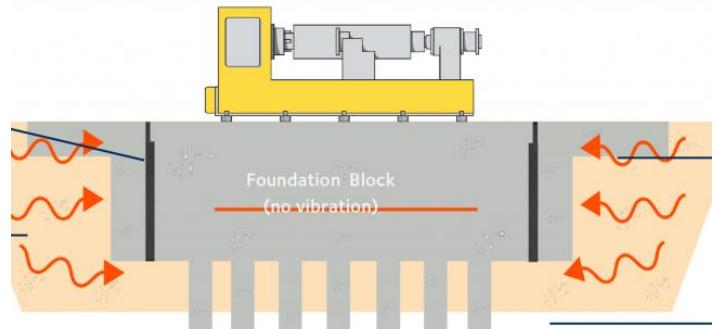
Cimentación de la máquina



Cimentación de la máquina  
con aislación activa



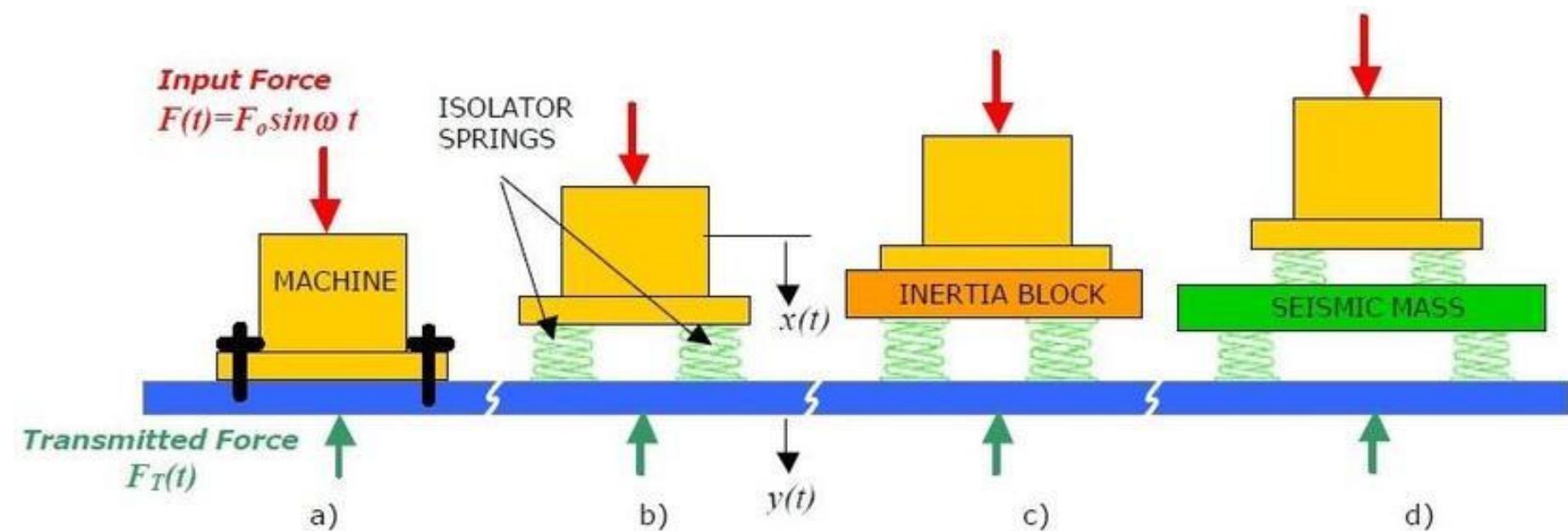
Cimentación de la máquina, contacto con  
losa de piso, sin aislación



Cimentación de la máquina  
con aislación pasiva

# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## OPCIONES DE DISEÑO



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## ESTRUCTURA DE CIMENTACIÓN

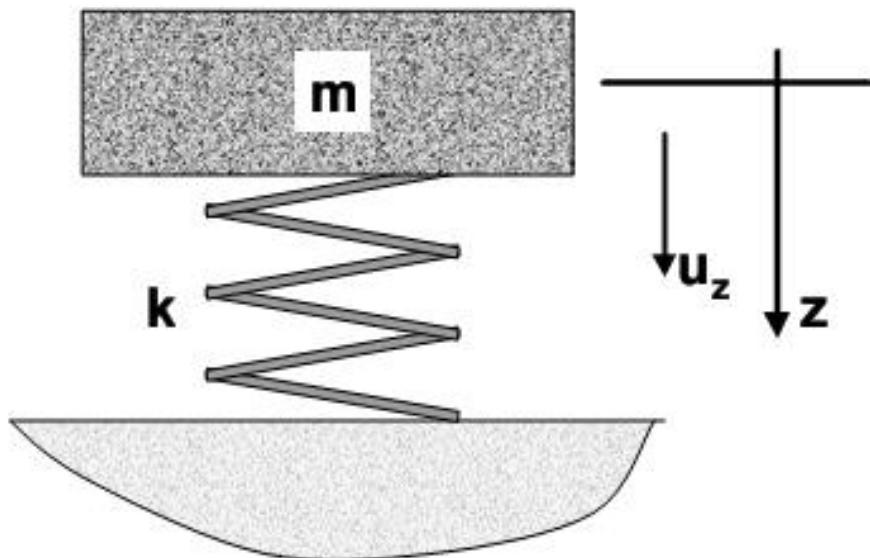
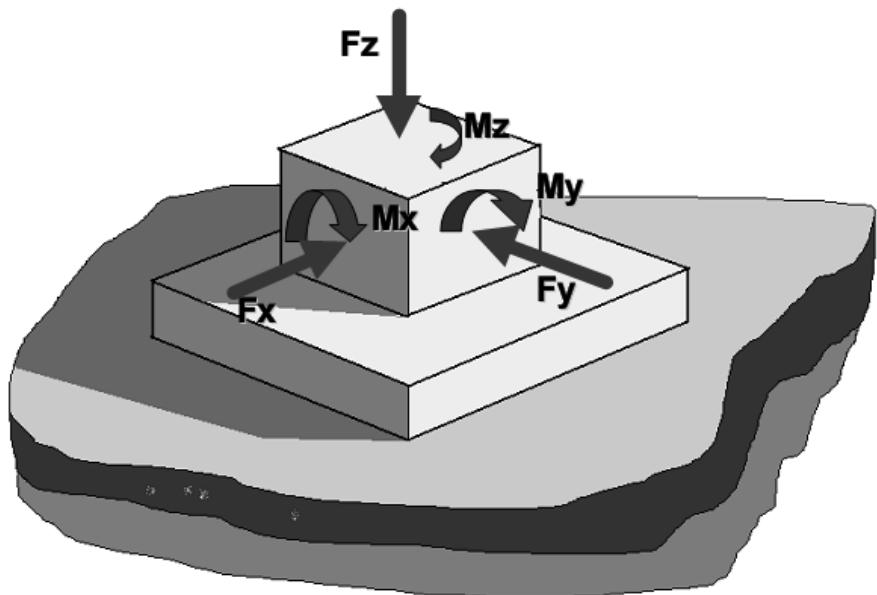




## MODELO EQUIVALENTE

# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## SISTEMAS DINAMICOS LIBRES



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## SISTEMAS DINAMICOS LIBRES

Ecuación de equilibrio

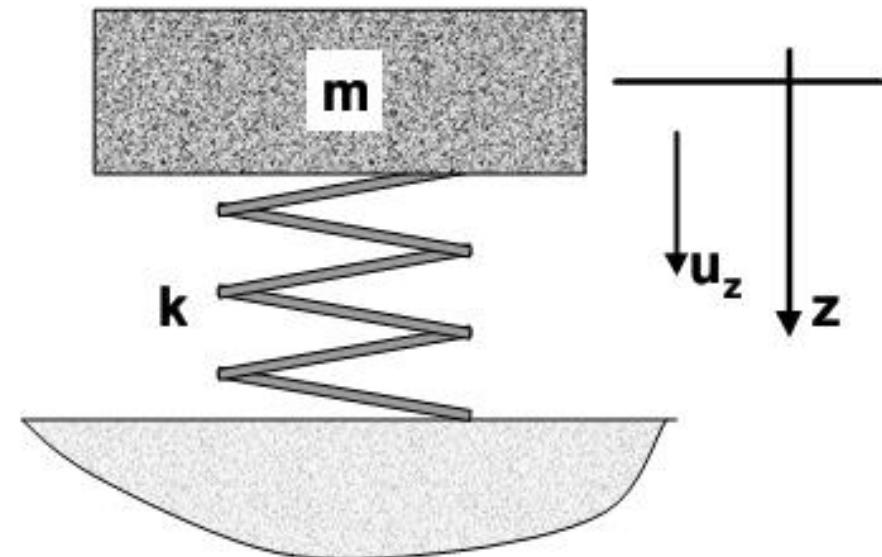
$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + ku = 0$$

Solución:

- Función de  $u(z)$
- Se expresión 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

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

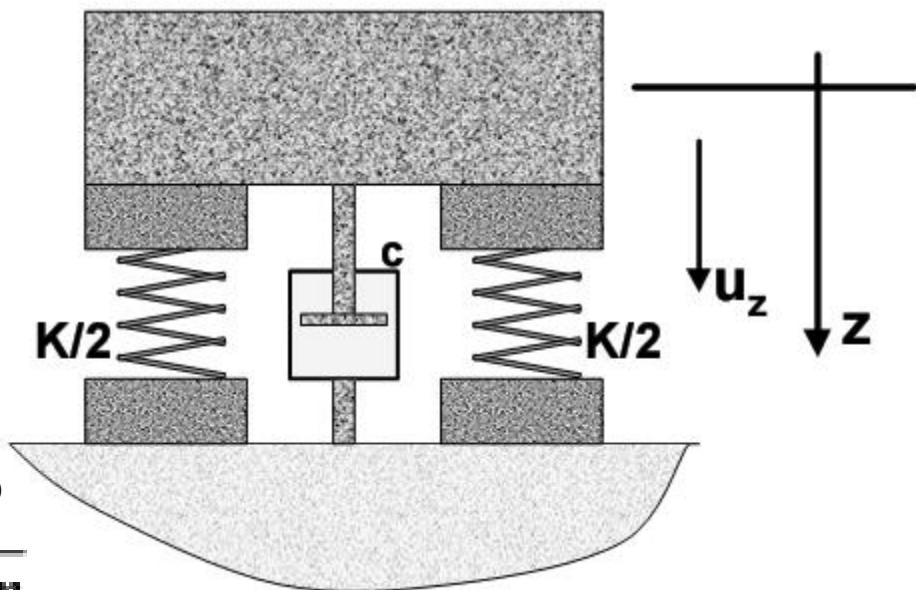
Variables derivadas

Pulsación

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

Amortiguamiento

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

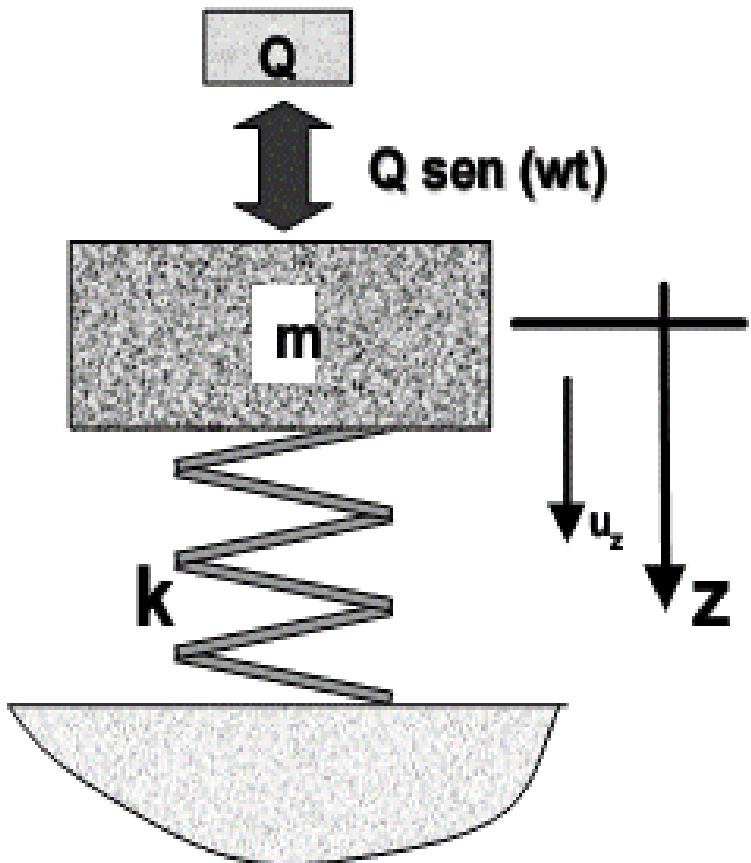


$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

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

# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS



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

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



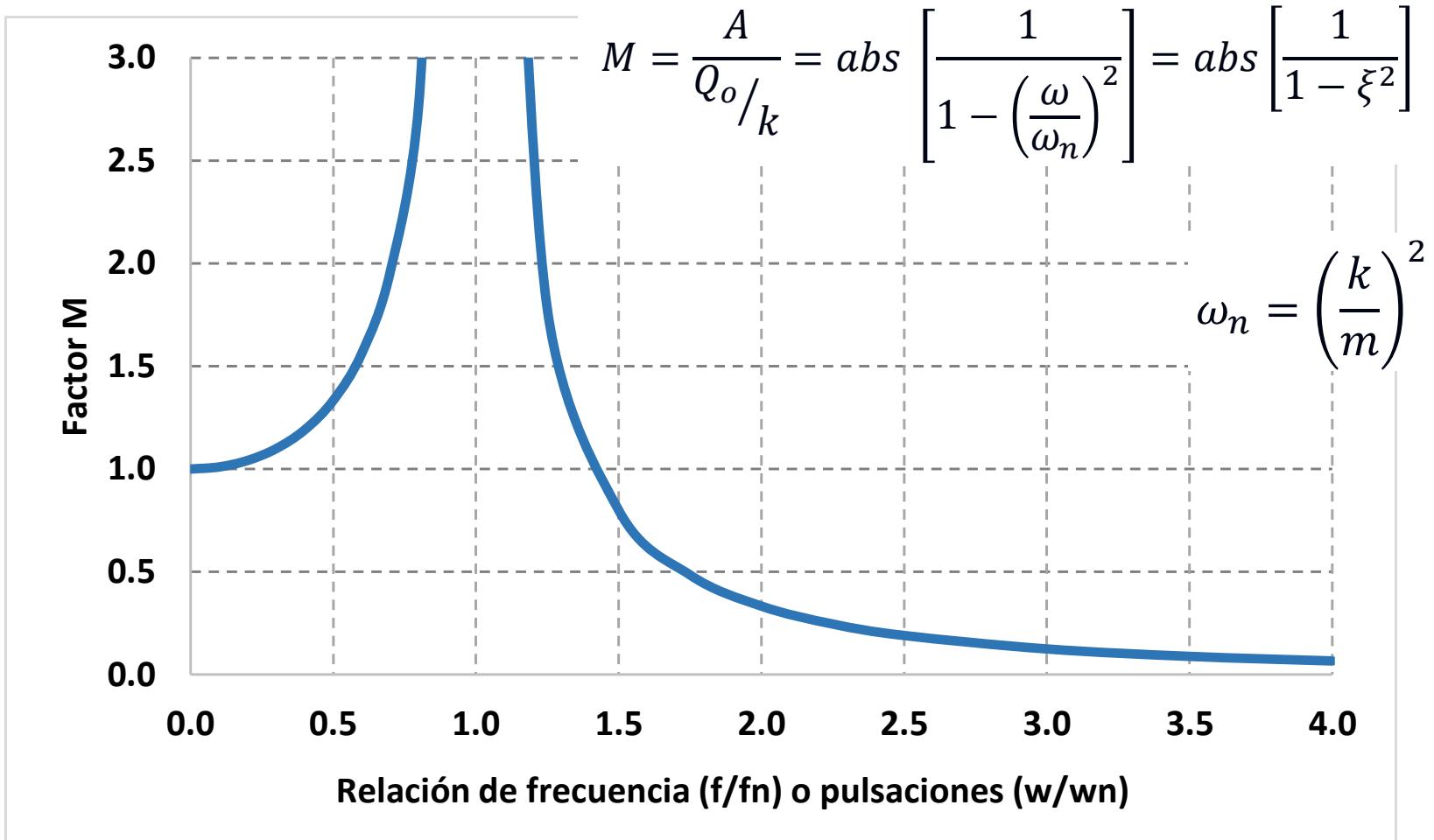
$$A_d = A_{est} M$$



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS

### FACTOR DE MAGNIFICACIÓN



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS

### AMORTIGUADO

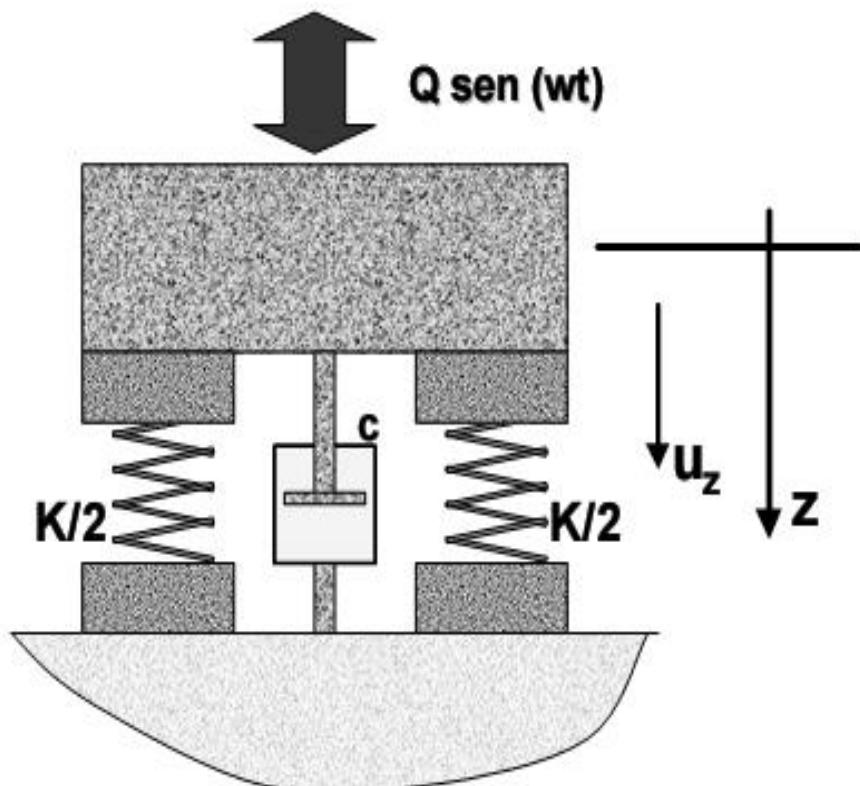
Ecuación de equilibrio

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial u}{\partial z} + ku = Q_o \cdot \operatorname{sen}(wt)$$

Variables derivadas

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

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



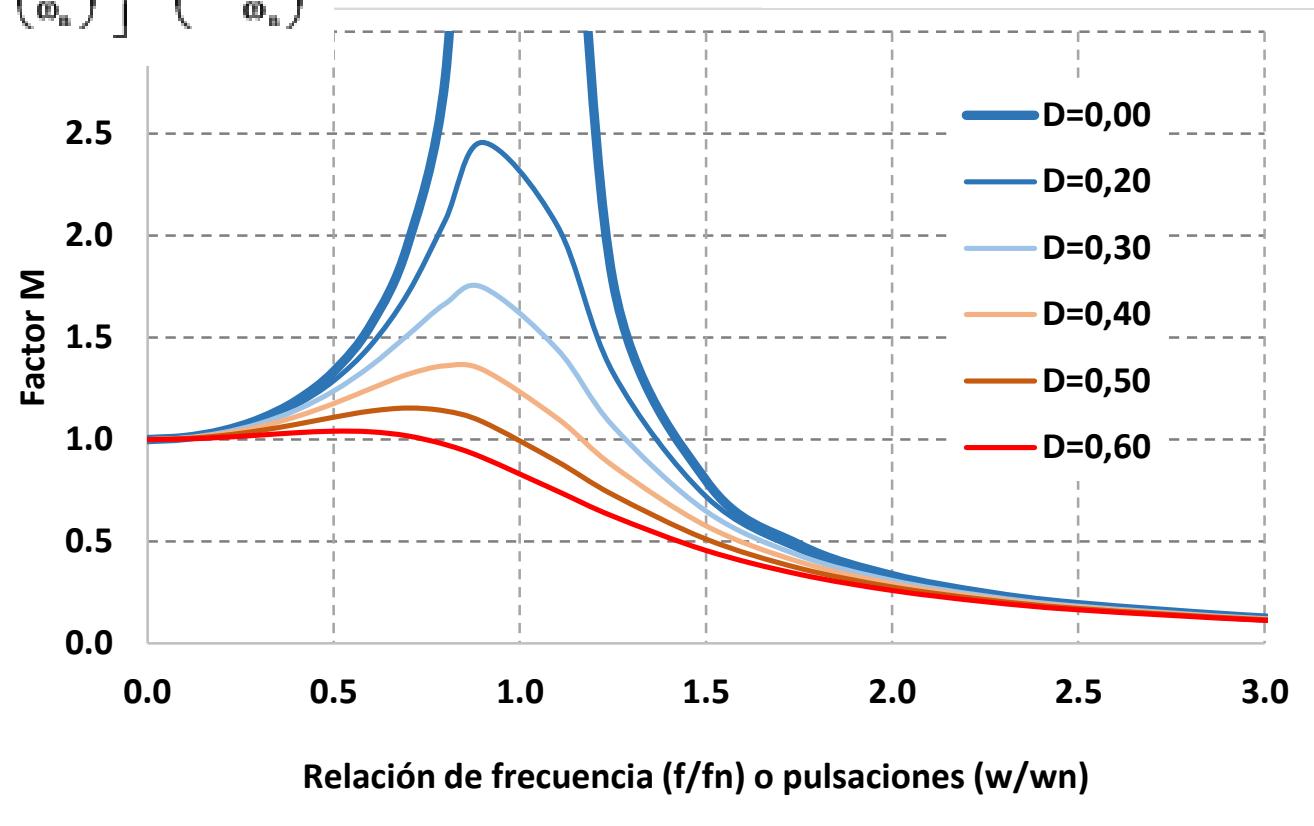
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## 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

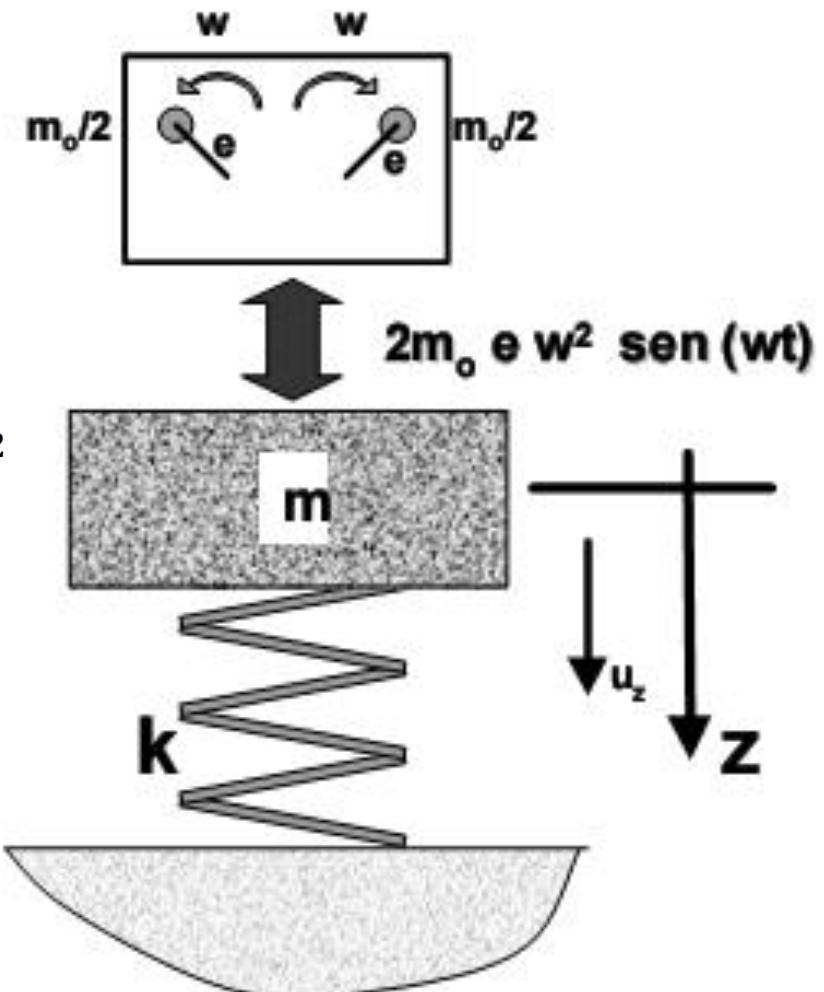
## SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS POR CARGAS EXCENTRICAS Y AMORTIGUADO

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

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

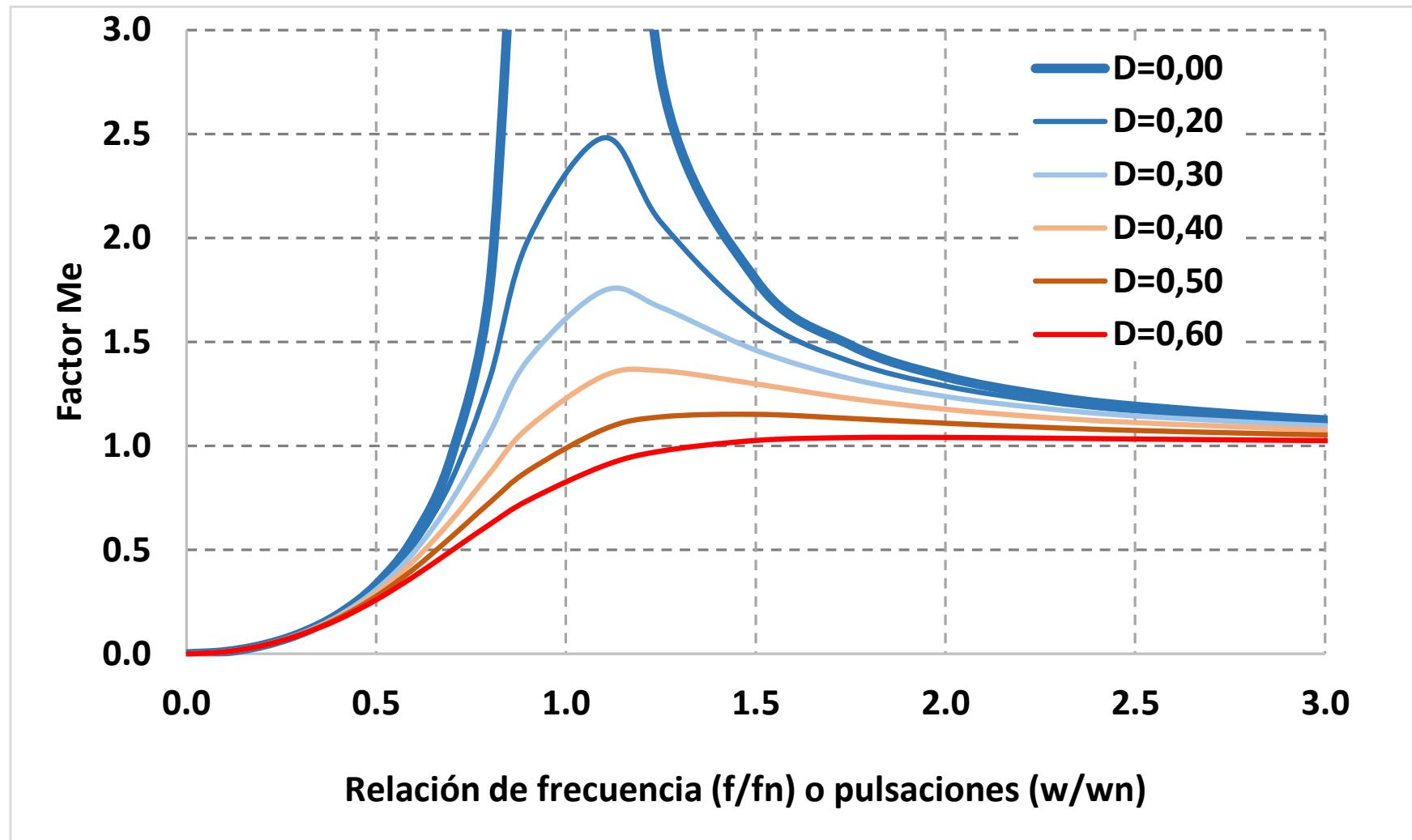
$$M_e = \frac{\Delta_{din}}{\frac{m_e e}{k}} = \frac{\Delta_{din}}{\Delta_{est}} \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 = M \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

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



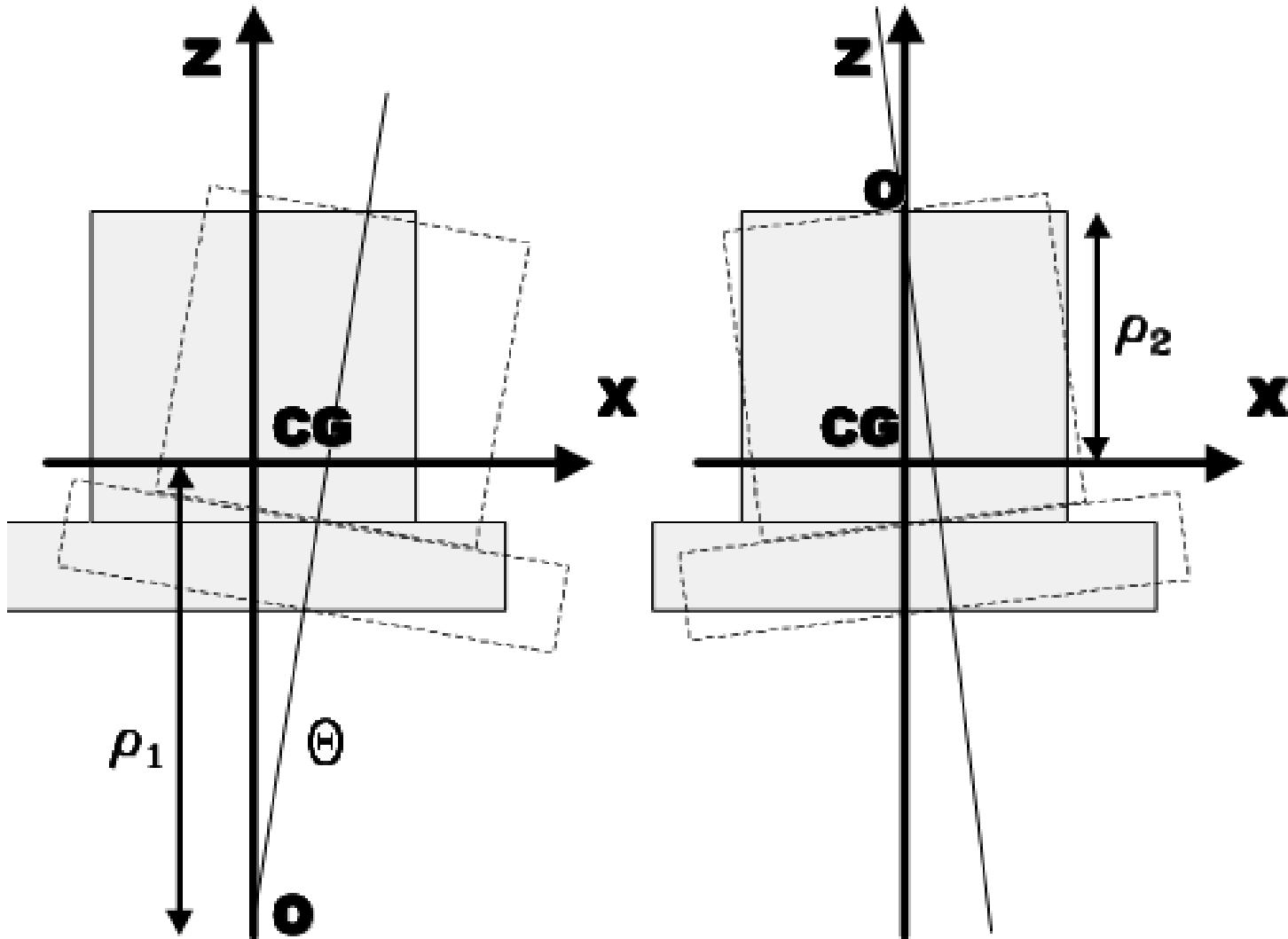
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## SISTEMAS DINAMICOS FORZADOS POR CARGAS EXCENTRICAS Y AMORTIGUADO



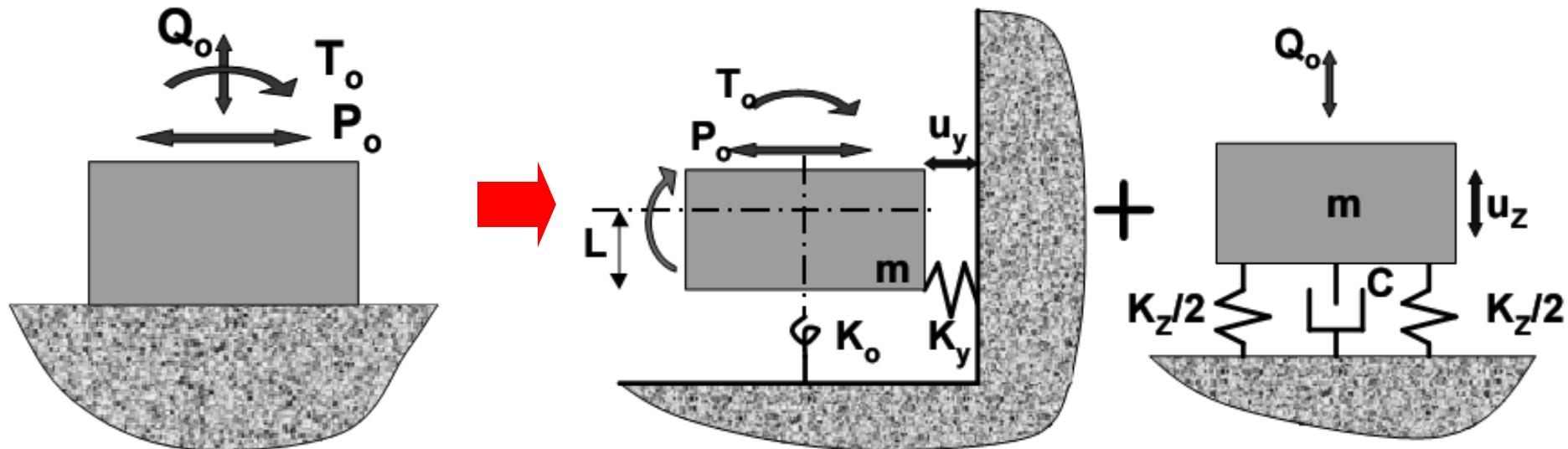
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## COMBINACION DE DESPLAZAMIENTOS



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## COMBINACION DE DESPLAZAMIENTOS



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS



**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**

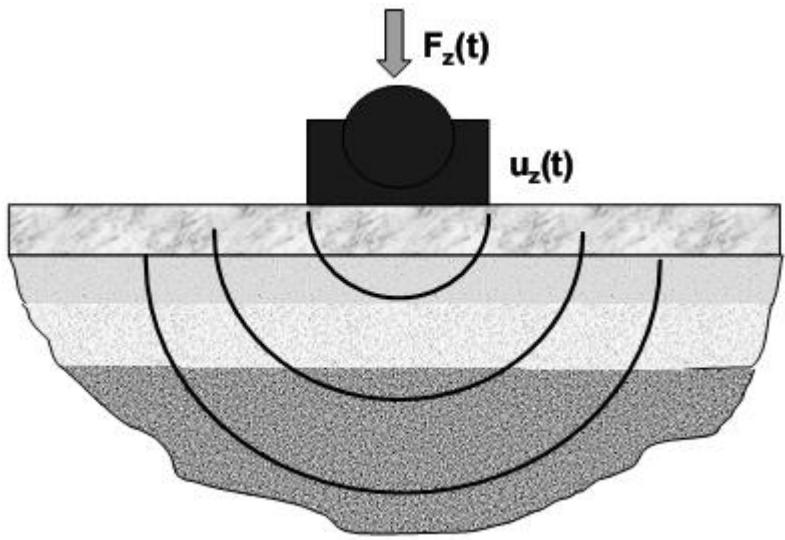
## ENSAYOS DE CARACTERIZACION

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

# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## PROPIEDADES DE LOS SUELOS

### VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA



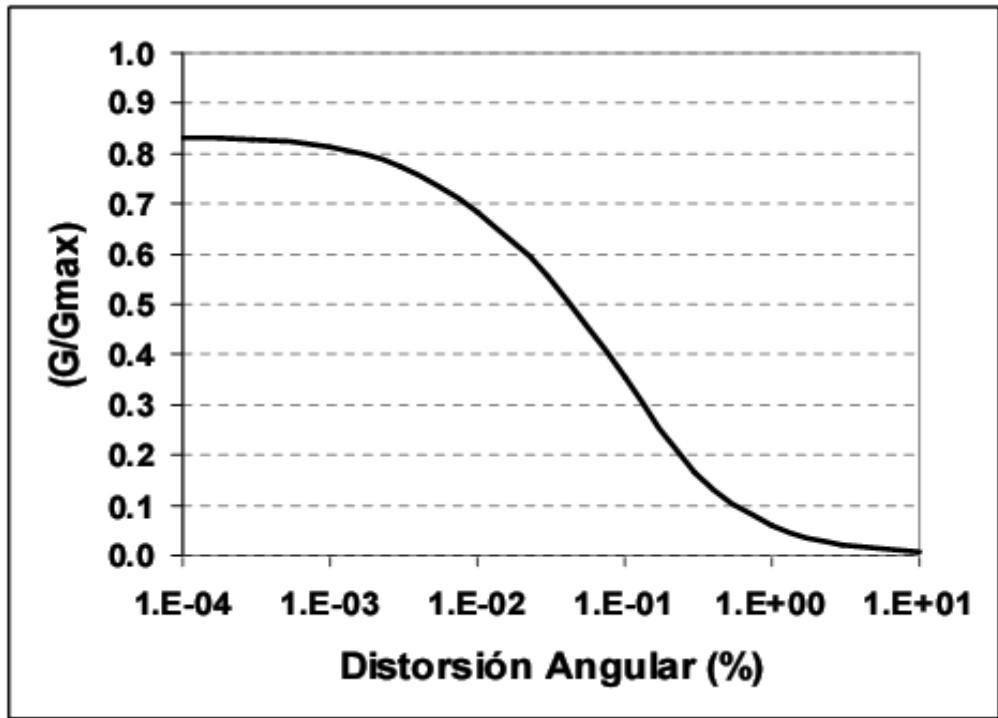
$$v_p = \sqrt{\frac{E_s(1-\mu)}{\rho(1-\mu)(1-2\mu)}}$$

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

# 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

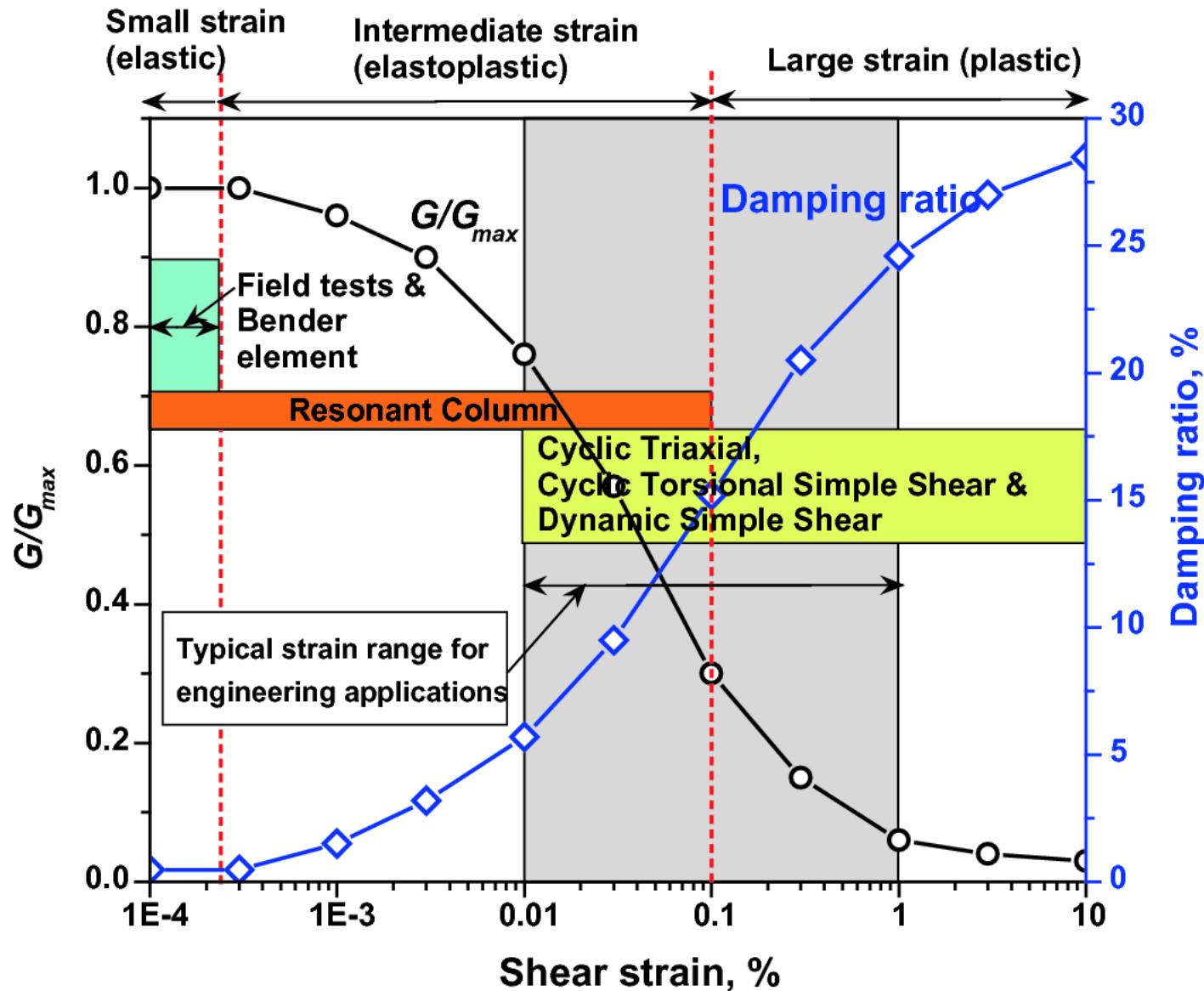
$$G_{max} = 625 \frac{OCR^{\mu^*}}{0,30 + 0,70e^2} \cdot \sqrt{p_a \sigma_o^*}$$

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

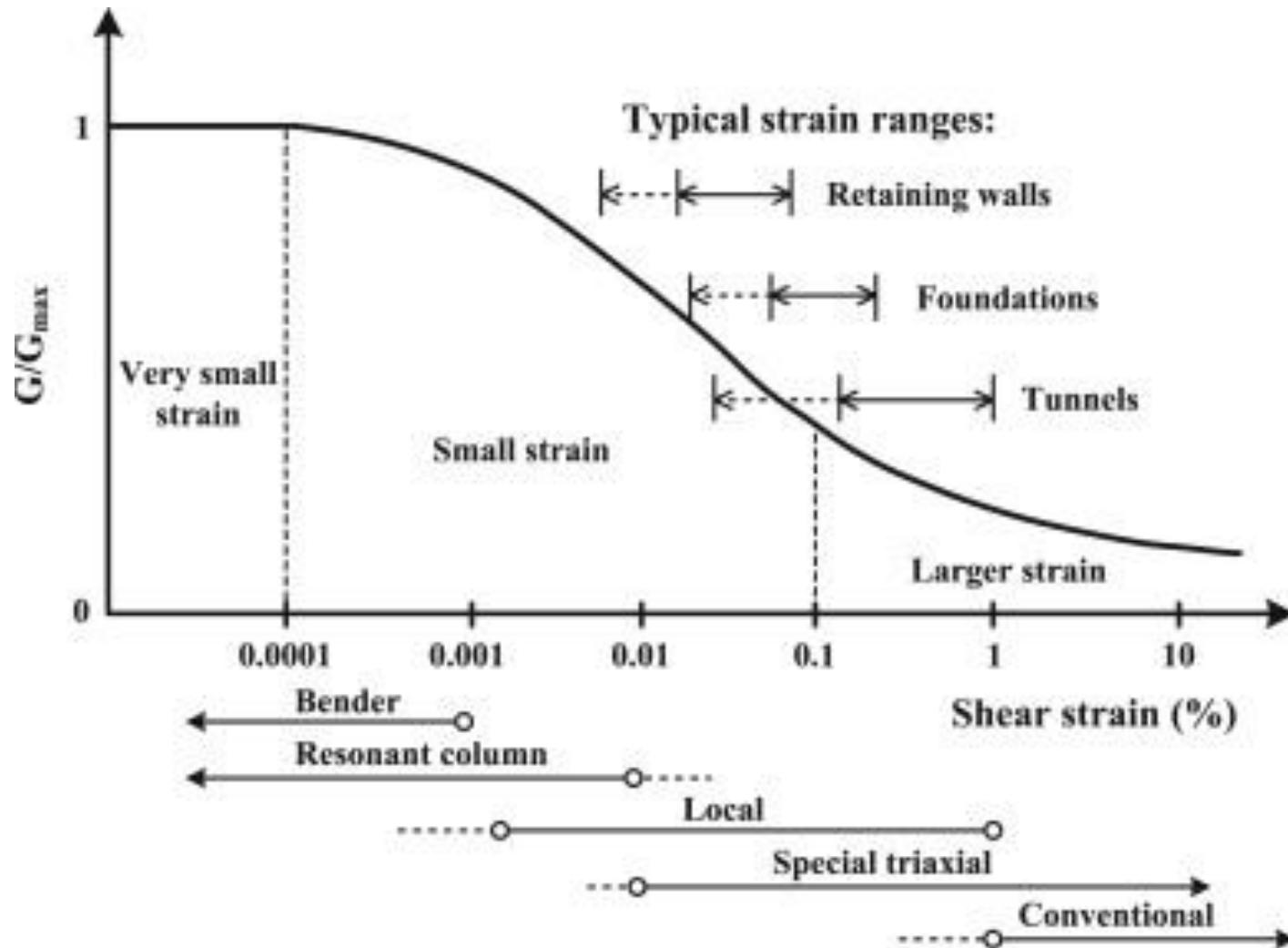




# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## PROPIEDADES DE LOS SUELOS

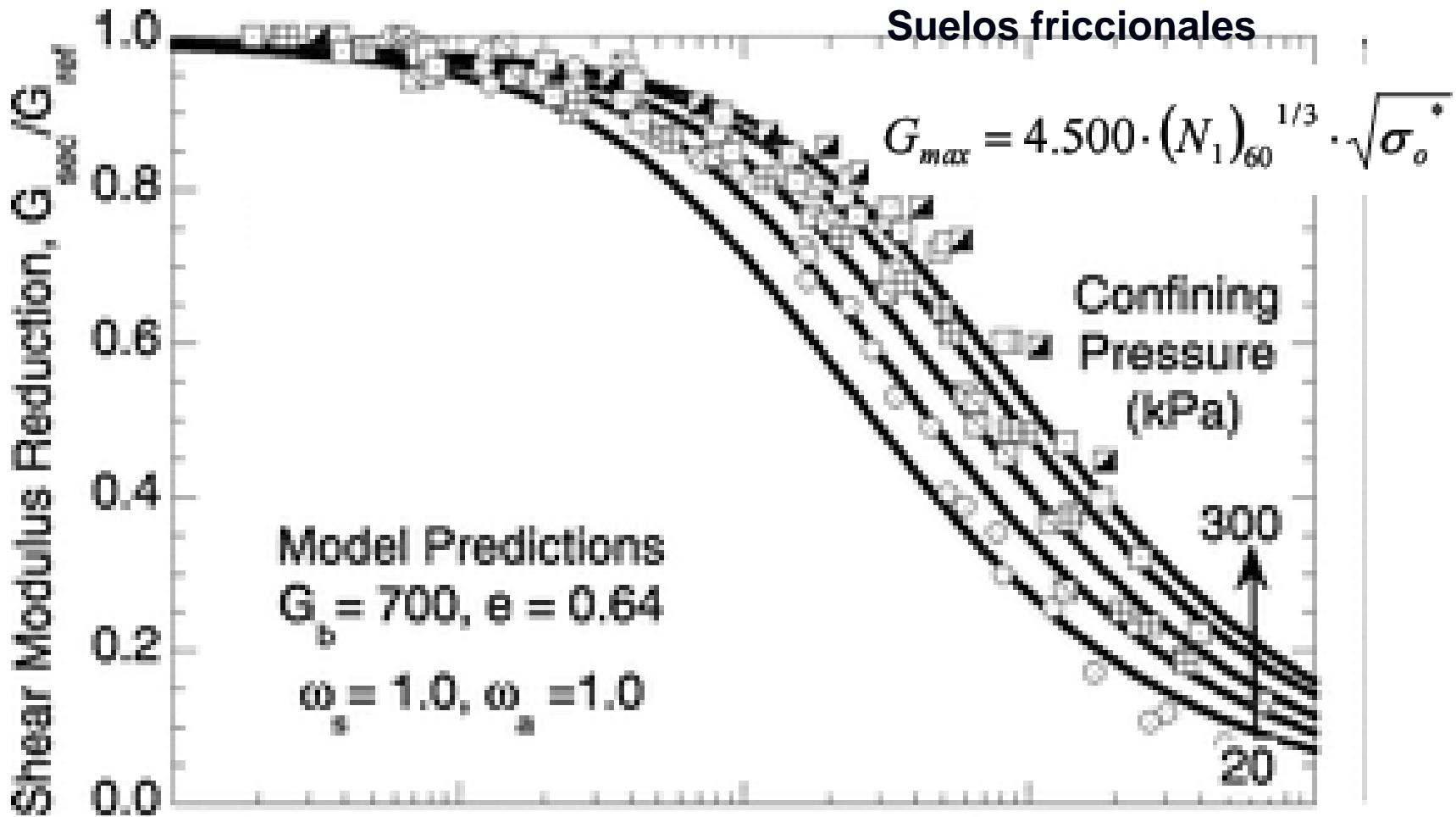
### ENSAYOS Y APLICACIONES



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## PROPIEDADES DE LOS SUELOS

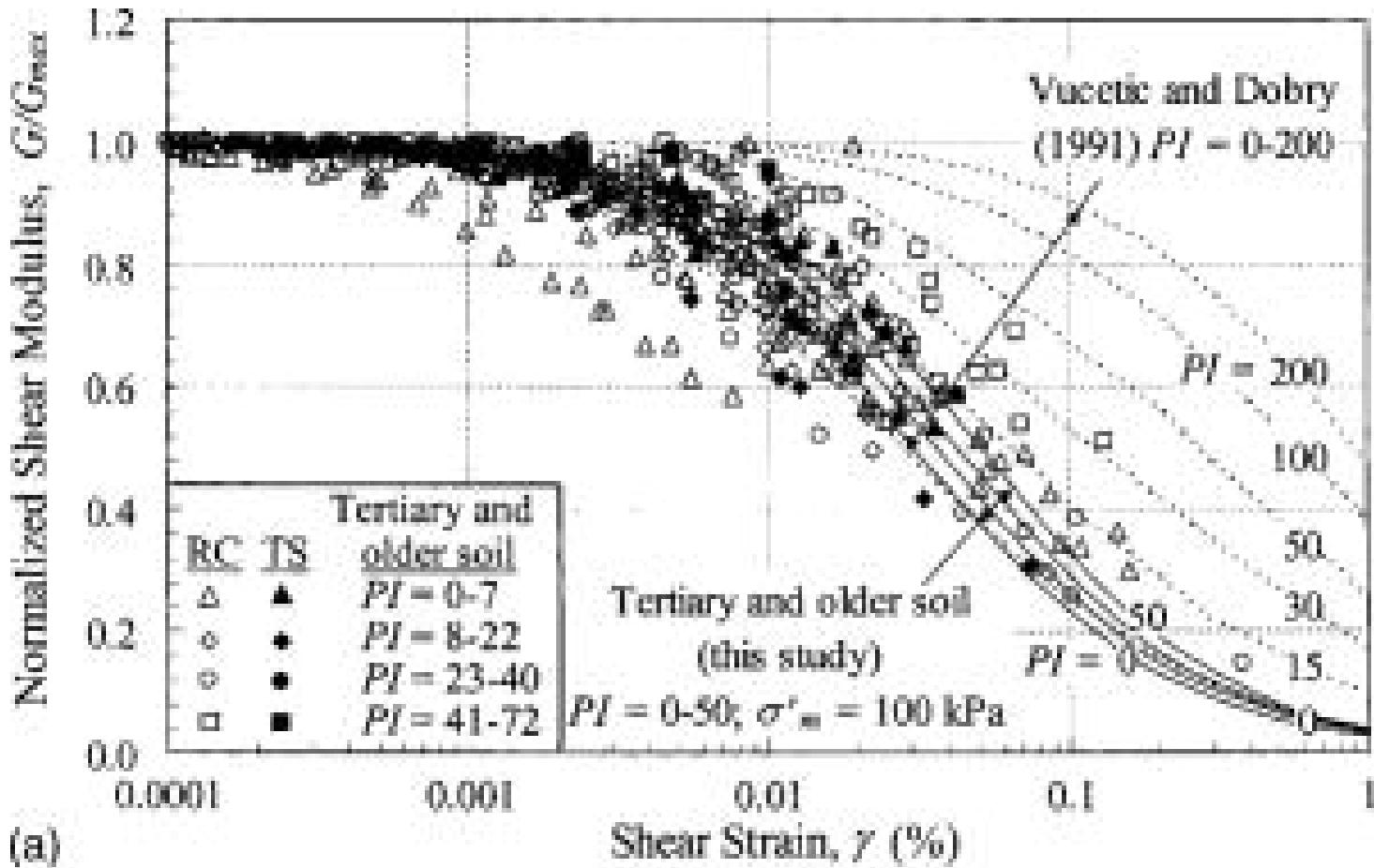
### CARACTERISTICAS ELASTICAS DEL SUELO



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

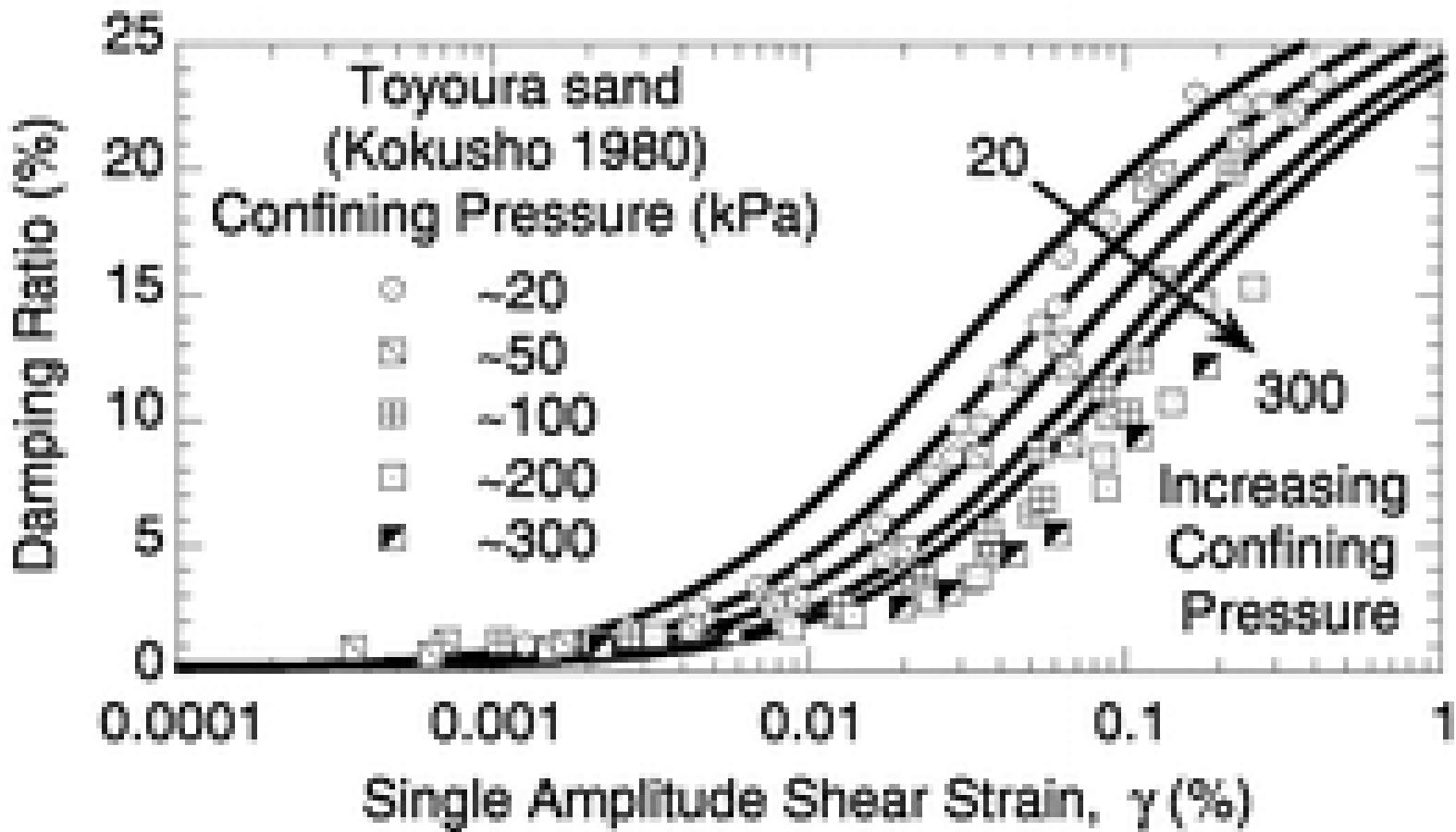
## PROPIEDADES DE LOS SUELOS

### CARACTERISTICAS ELASTICAS DEL SUELO



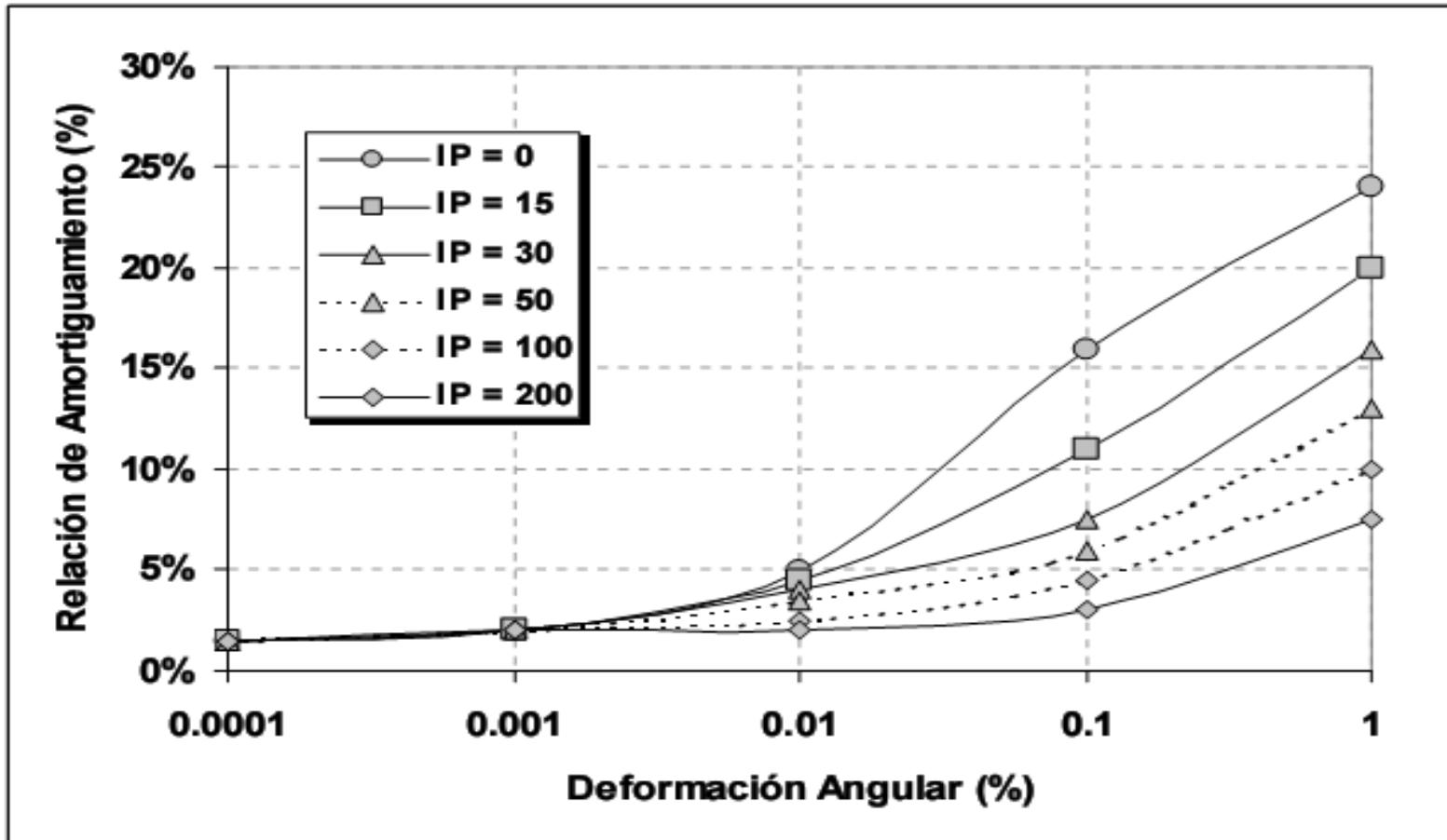
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## 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**

$\mu = 0,25 \text{ a } 0,35$  para suelos sin cohesión  
 $\mu = 0,35 \text{ a } 0,45$  para suelos cohesivos.

**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**

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



## 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,

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

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

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

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

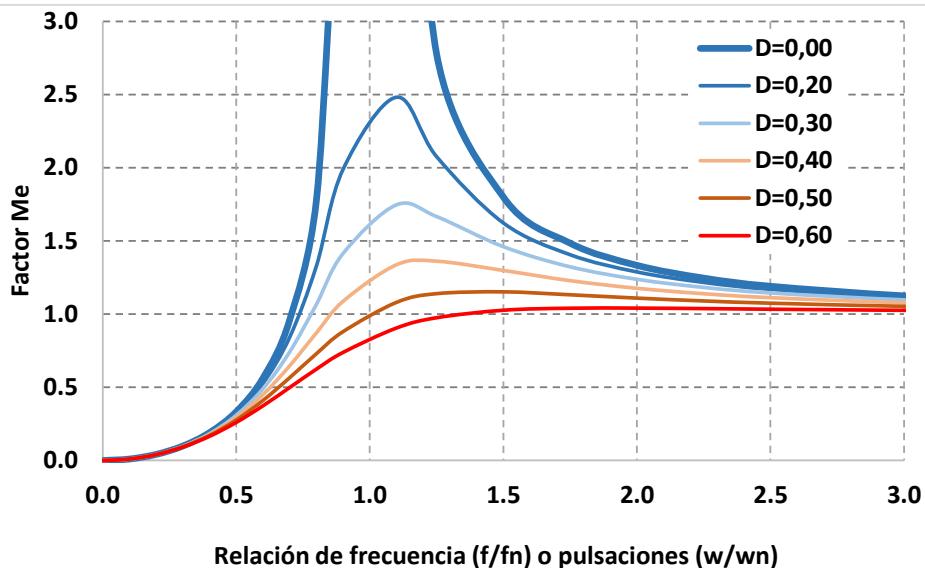
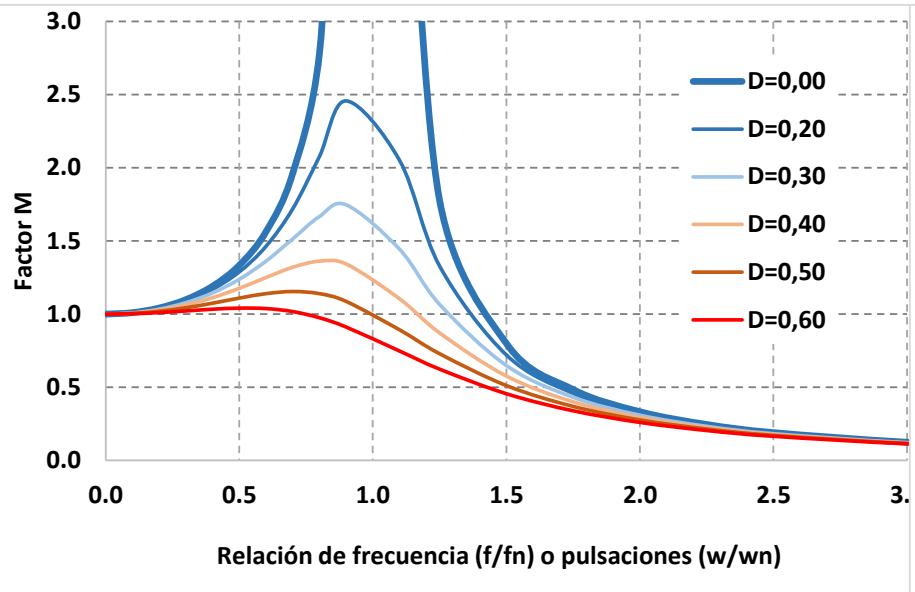


# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## 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

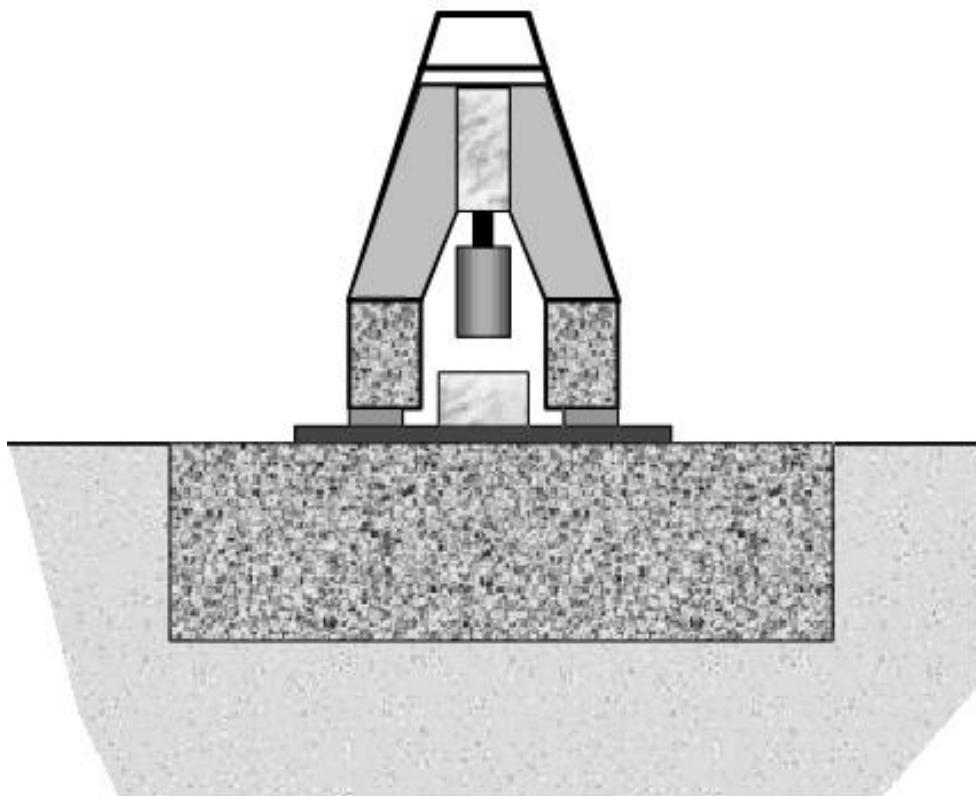
$$A_{din} = A_{est} M$$

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



# 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

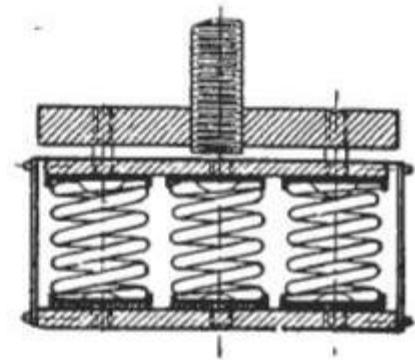
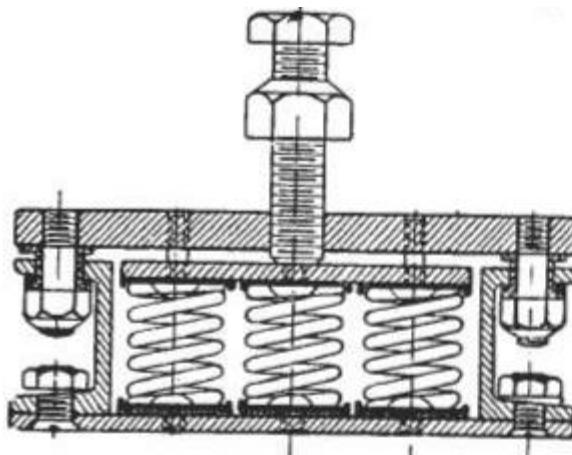
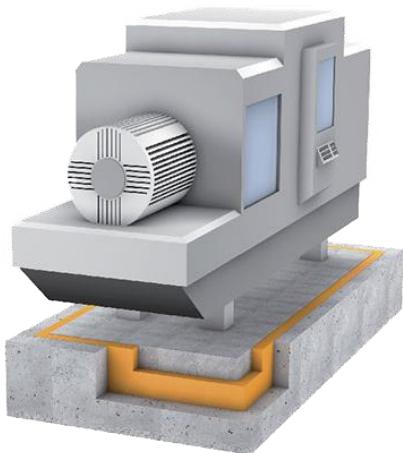
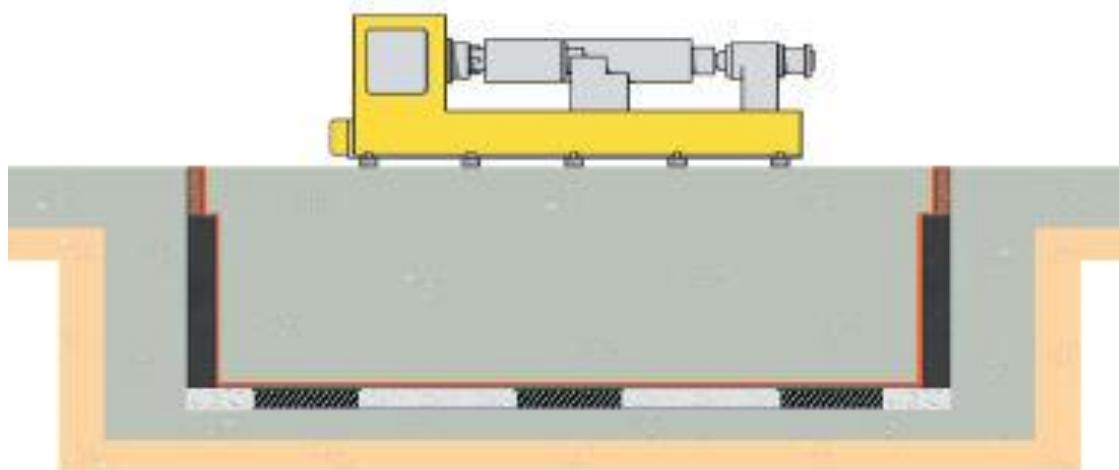
### AISLANTES - AMORTIGUADORES

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.**

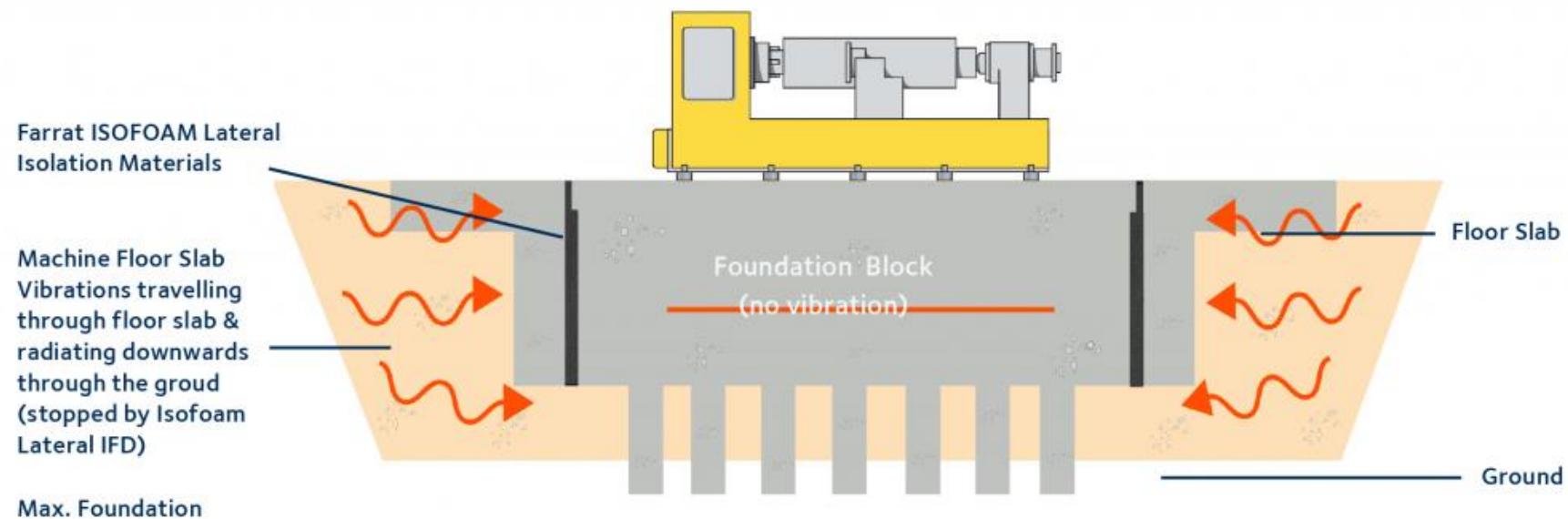
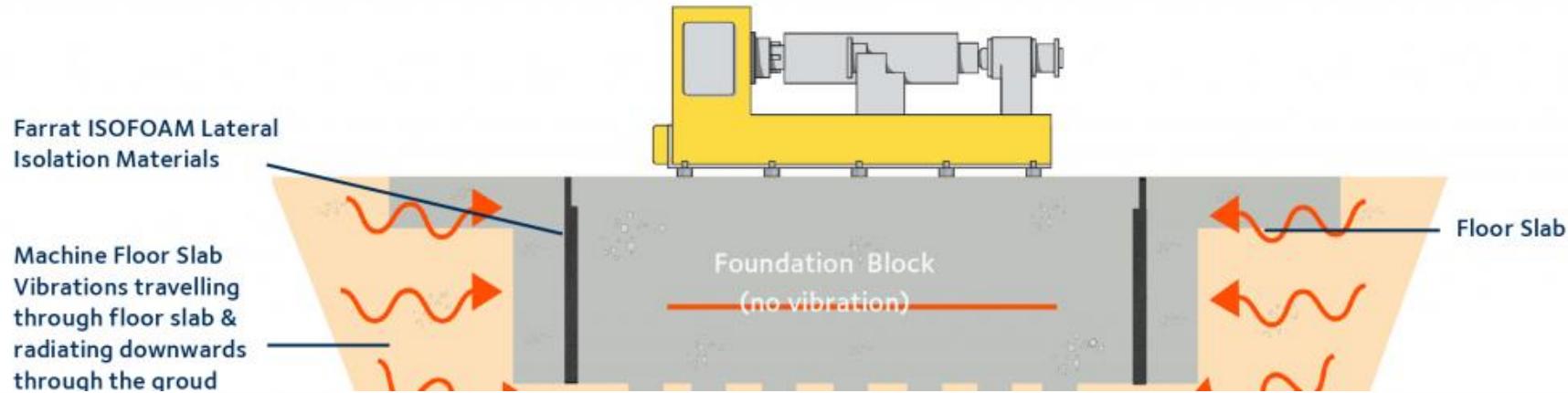
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## AISLANTES - AMORTIGUADORES



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## AISLANTES - AMORTIGUADORES

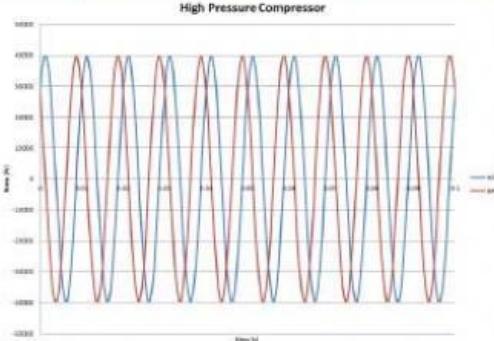
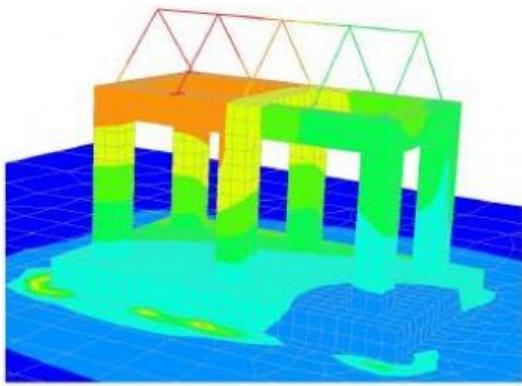




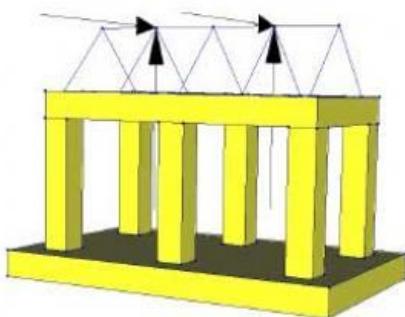
# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

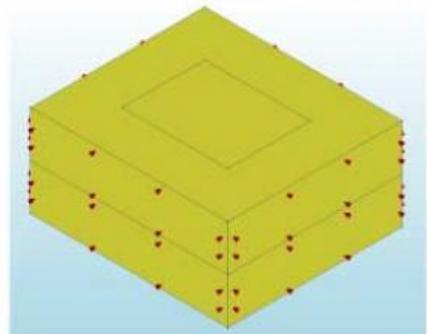
Transient dynamic analysis of a machine foundation



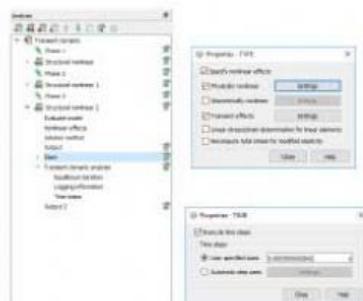
1 - Create geometry of the machine foundation



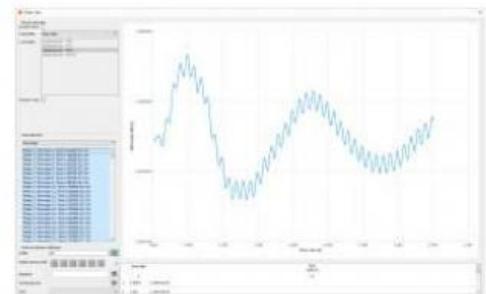
2 - Define the soil and Perfectly Matched Layers



3 - Set up a phased transient dynamic analysis



4 - Check the result amplitudes



# CIMENTACIONES PARA MAQUINAS

## MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

