

# Cálculo de Cimentaciones para Equipos Dinámicos: Estrategias de Diseño para el Control de Vibraciones

## Foundation Analysis for Dynamic Equipment: Design Strategies for Vibration Control

José Antonio BECERRA MOSQUERA<sup>a</sup>, David MARCOS FRAGUELA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. NETO Structure & Heavy Lift Design. Administrador

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. NETO Structure & Heavy Lift Design. Director técnico

### RESUMEN

El diseño estructural de una cimentación para soportar equipos con cargas dinámicas resulta una tarea compleja por la necesidad de modelizar la carga transmitida (generalmente de carácter claramente dinámico) junto con la estructura de cimentación y el terreno soporte. En la práctica, los ingenieros aplican reglas comunes de buena práctica en su diseño pero estas reglas pueden resultar generosamente del lado de la seguridad o directamente no ser de aplicación a determinados problemas.

Hoy en día, estas “reglas” están siendo reemplazadas por sofisticados y precisos métodos de cálculo basados en el Método de Elementos Finitos (MEF) que proporcionan diseños más precisos. Sin embargo, la fiabilidad de los resultados viene influenciada en gran medida por los valores de los parámetros introducidos en el cálculo y que a su vez están relacionados con el comportamiento dinámico del sistema global Equipo – Cimentación - Terreno. Por lo tanto, el ingeniero de diseño debe ser conservador a la hora de evaluar las incertidumbres en los parámetros introducidos en el modelo así como analizar los resultados obtenidos con sentido crítico.

La meta final del análisis global consiste en obtener un diseño de la cimentación que garantice: un adecuado comportamiento estructural de la misma, evitando problemas de resonancia con el equipo que soporta; limitar las vibraciones (amplitudes y aceleraciones) que le transmite la cimentación tanto a los apoyos de la máquina (que podrían condicionar el mantenimiento y la vida útil del equipo) como al resto de estructuras próximas; y además minimizar la percepción de vibraciones que tendrán las personas localizadas directamente sobre la cimentación o próximas al equipo y de este modo garantizar el confort de uso a las mismas. Se resume en el presente artículo y para este tipo de problemas una metodología de diseño y cálculo aplicando el MEF, orientada al control de vibraciones, recomendando los valores a emplear para los parámetros que gobiernan el cálculo.

### ABSTRACT

The structural design of a foundation system supporting dynamic equipment comprises the need to model the load transmitted (Dynamic Load) jointly with the supporting foundation and the soil response. The analysis, based on classical theories derived from Soil Dynamics may be supplemented by the Finite Element Method, bringing more reliability to the calculations. Nevertheless, the FEM may have its results strongly influenced by the parameter values adopted in the simulation hence, the values adopted need to be conservative and must be assessed with critical sense. The final goal of the dynamic analysis is to obtain a proper design for the foundation system ensuring an acceptable structural behavior, avoiding resonance with the supported machine, limiting vibrations (therefore internal loads and stresses) within equipment and surrounding areas and ensuring minimal human perception of vibrations.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema Equipo – Cimentación - Terreno, Carga Dinámica, Impedancias, MEF, Control de Vibraciones, Aislamiento

**KEYWORDS:** Equipment – Foundation – Soil System, Dynamic Load, Impedance, FEM, Vibration Control, Isolation

## 1. Introducción

En el presente Artículo resumimos una posible metodología a llevar a cabo para garantizar un diseño adecuado, tanto en el ámbito del comportamiento resistente del Sistema (Máquina - Cimentación - Terreno) como también en el ámbito funcional, corroborando la validez del mismo frente a los criterios de operatividad de la máquina, percepción humana y transmisión de vibraciones al medio circundante. Se hace fundamental hincapié en los parámetros del terreno adoptados en el cálculo, ya que normalmente son fuente de incertidumbre y condicionan en gran medida los resultados del análisis así como el diseño finalmente resultante. Es fundamental garantizar, durante la etapa de diseño, una colaboración conjunta y fluida entre el fabricante del equipo y la Ingeniería encargada de la definición de la cimentación para garantizar un buen diseño final.

## 2. Definición del Problema

Los equipos mecánicos (máquinas rotativas, reciprocantes, impulsivas, de impacto, ...) generan fuerzas no balanceadas de carácter dinámico que resulta necesario controlar, resistir y transmitir adecuadamente al terreno de cimentación. El problema engloba la definición completa de las características dinámicas del Sistema Conjunto Equipo - Cimentación - Terreno.

### 2.1. Datos del Equipo

Resulta necesario conocer: el peso (masa) de la máquina y equipos auxiliares, centro de

gravedad de los mismos así como tipología, disposición y dimensiones de apoyos y valores de cargas Estáticas y Dinámicas (Fuerzas y Momentos) transmitidas por el conjunto en dichos puntos, y finalmente conocer la/s velocidad/es de operación de la máquina.

### 2.2. Definición de la Cimentación

La definición de las dimensiones iniciales de la cimentación depende de numerosos condicionantes: configuración y disposición de los equipos y elementos auxiliares a disponer, requerimientos de mantenimiento y accesibilidad al equipo, restricciones geométricas existentes in situ... Como reglas iniciales de Predimensionamiento indicamos: 1) Hacer coincidentes sobre la misma vertical, en la medida de lo posible, el centro de gravedad (*cdg*) del equipo, el del conjunto de cimentación y máquina, así como el del conjunto de Apoyos (Rigidez) sobre las que se sustenta el sistema; 2) Aumentar, en la medida de lo posible las dimensiones horizontales de la cimentación (B, L) para soportar adecuadamente las amplitudes máximas de vibración para los modos tipo "*Rocking*" (vibraciones de rotación según los ejes contenidos en el plano horizontal); 3) Adoptar un canto mínimo de 60cm para la cimentación, de manera que se garantice un comportamiento "rígido" de la misma; 4) Bajo cargas estáticas, la presión transmitida al terreno será inferior o igual al 50% de la tensión admisible; y bajo cargas totales (Estáticas y Dinámicas) no se superará el 75% de la misma.

### 2.3. Definición del Terreno de Cimentación

Resulta necesario conocer de partida las diferentes propiedades dinámicas del suelo. Generalmente, estos parámetros se obtendrán a partir de ensayos realizados tanto in situ como en laboratorio procedentes de una adecuada campaña de reconocimiento geotécnico. Los parámetros a considerar son: peso específico ( $\gamma$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), módulo de deformación transversal ( $G$ ) y fracción de amortiguamiento ( $\xi$ ); para este último parámetro resulta fundamental considerar tanto la componente de "Radiación" como la "Histerética" cuyo valor promedio para esta última, puede considerarse, a efectos prácticos, igual al 5%. A efectos de predimensionamiento, existe en la bibliografía técnica [1, 2, 3, 4] numerosas expresiones y correlaciones para poder obtener un orden de magnitud de los mismos.

## 3. Parámetros Dinámicos del Terreno

### 3.1. Sensibilidad de los Resultados

El módulo de deformación transversal del terreno ( $G$ ,  $V_s$ ) es el parámetro más importante a la hora de determinar el comportamiento del Sistema Equipo - Cimentación - Terreno. Dado que estamos tratando de evaluar las propiedades del suelo (medio de naturaleza heterogénea y anisótropa) su valor intrínseco presenta una incertidumbre considerable. Se recomienda, a efectos de diseño, considerar un rango de valores "probables" en torno a un valor promedio:

$$G_{min} = \frac{G_{med}}{\gamma} \quad (1a)$$

$$G_{max} = \gamma G_{med} \quad (1b)$$

$$\gamma \in [1.50, 3.00] \quad (1c)$$

A este respecto, cuando las propiedades dinámicas del terreno:  $G$  o  $V_s$  (velocidad de

propagación de las ondas sísmicas transversales en un suelo, Figura 1) vengan determinadas a partir de ensayos reales in situ o de laboratorio, se recomienda el empleo de valores en el umbral inferior en el rango indicado en la expresión (1c). Sin embargo, cuando los valores se obtengan a partir de tablas y/o correlaciones obtenidas a partir de la literatura técnica, dada la enorme importancia de este parámetro en los cálculos, se recomienda adoptar valores más conservadores próximos al límite superior del rango indicado en la expresión (1c).

$$G = \rho_T V_s^2$$

$G_{max}$  Módulo de rigidez transversal para pequeñas deformaciones de cortante

$\rho_T$  Densidad del suelo

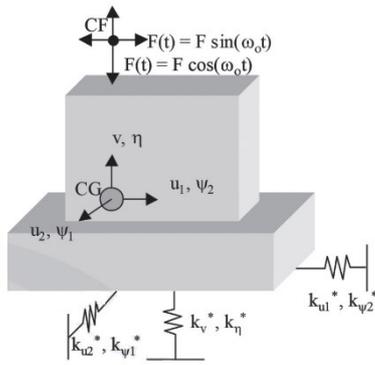
$V_s$  Velocidad de propagación de las ondas sísmicas transversales (ondas S)

### 3.2. Cálculo de Impedancias Dinámicas

La ecuación fundamental que gobierna el problema dinámico [5] resulta:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (2)$$

El término  $F(t)$  viene impuesto por el Equipo, generalmente suele tratarse de una carga armónica senoidal/cosenoidal y es este caso el que presenta solución analítica, recogida en numerosos textos dedicados al Análisis Dinámico de Estructuras [5, 6]; lo que permite resolver el problema, de una manera relativamente sencilla, asimilando el Sistema Equipo - Cimentación - Terreno, a un problema, como máximo, de 6 Grados de Libertad (GDL) independientes entre sí que se pueden resolver de manera "manual" en una Hoja de Cálculo [1, 3, 48].



supone igual al de un sólido rígido apoyado en un medio elástico. Para determinar los parámetros (K, C) existen numerosas formulaciones [7, 8, 1, 3, 4] en las que se asimila el comportamiento del conjunto Cimentación - Terreno, para cada uno de los 6 grados de libertad en el espacio, a un sistema equivalente Masa - Muelle - Amortiguador, evaluando en cada caso su Rigidez y Amortiguamiento, para emplear en la resolución del problema dinámico según (2).

Sin embargo, para cargas de cualquier otra naturaleza (periódica genérica, impulsiva, ...) el problema se complica en gran medida y únicamente podremos obtener una solución mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF).

Pero para poder resolver el problema es necesario obtener además los valores de Rigidez (K) y Amortiguamiento (C) del conjunto Cimentación - Terreno. A dicha pareja (K, C), por analogía, se les denomina Impedancia Dinámica de la Cimentación. Para el cálculo de las Impedancias, el conjunto Cimentación - Terreno, a efectos prácticos y de diseño, se

Comentar en este punto, que la formulación de cálculo de las Impedancias (K, C), sobre todo en lo que respecta al parámetro de amortiguamiento por radiación en el terreno, suele proporcionar valores relativamente elevados (como puede verse en los valores de la Figura 3) a los comprobados de manera empírica en diferentes ensayos llevados a cabo [7, 8, 1, 4]; por lo que a nuestro juicio, conviene reducir convenientemente su valor antes de introducirlo en el Modelo de Cálculo y evitar de este modo soluciones al problema que se encuentren fuera del umbral de seguridad aceptado en la práctica.

6) CÁLCULO DE PARÁMETROS DINÁMICOS MODELO 1GDL (CIMENTACIONES QUASIRECTANGULARES RÍGIDAS):									
* DESPLAZAMIENTO VERTICAL:					* ROTACIÓN HORIZONTAL:				
kZembsta =	1.23	KZembsta =	559432 kN/m	kRXembsta =	1.50	KRXembsta =	2113808 m kN/rad		
kZembdyn =	1.00	KZembdyn =	559200 kN/m	kRXembdyn =	0.92	KRXembdyn =	1944360 m kN/rad		
ENRASADA =	0.99	$v \leq 0.40 !!!$	$\omega z =$	107.0 rad/s	lwce =	0.60 m <sup>4</sup>	$\omega Rx =$	198.9 rad/s	
TOTemb =	1.01		Ciz =	8126 79.8 %	Jws =	6.98 m <sup>4</sup>	CiRx =	7336 50.7 %	
ENRASADA =	1.00	$v \approx 0.50 !!!$	$\Delta Ciz =$	2054 20.2 %	Awshear =	5.04 m <sup>2</sup>	$\Delta CiRx =$	7141 49.3 %	
TOTemb =	0.99			10180 kN s/m	$\Delta i =$	2 m		14477 m kN s/m	
			$\xi_{TOTALMOD0}$	0.974	c1 =	0.79	$\xi_{TOTALMOD0}$	0.740	
* DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL:					* ROTACIÓN HORIZONTAL:				
kYembsta =	1.61	KYembsta =	605209 kN/m	kRYembsta =	1.71	KRYembsta =	2021699 m kN/rad		
kyembdyn =	1.02	KYembdyn =	663806 kN/m	kRYembdyn =	0.88	KRYembdyn =	1778567 m kN/rad		
D / By =	0.58	$\leq 3.0 !!!$	$\omega y =$	116.6 rad/s	lwce =	0.58 m <sup>4</sup>	$\omega Ry =$	185.5 rad/s	
kdemb =	1.07		Ciy =	6670 73.2 %	Jws =	8.01 m <sup>4</sup>	CiRy =	7707 54.1 %	
Awshear =	4.80 m <sup>2</sup>		$\Delta Ciy =$	2438 26.8 %	Awshear =	4.8 m <sup>2</sup>	$\Delta CiRy =$	6532 45.9 %	
Awcomp =	5.04 m <sup>2</sup>			9108 kN s/m	$\Delta i =$	2.1 m		14240 m kN s/m	
			$\xi_{TOTALMOD0}$	0.800	c1 =	0.79	$\xi_{TOTALMOD0}$	0.742	
* DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL:					* ROTACIÓN TORS Z:				
kXembsta =	1.61	KXembsta =	602407 kN/m	kRZembsta =	1.92	KRZembsta =	3967976 m kN/rad		
kxembdyn =	1.00	KXembdyn =	647675 kN/m	kRZembdyn =	0.94	KRZembdyn =	3745318 m kN/rad		
D / Lx =	0.55	$\leq 3.0 !!!$	$\omega x =$	115.1 rad/s	lwce =	13.81 m <sup>4</sup>	$\omega Rz =$	206.6 rad/s	
kdemb =	1.07		Cix =	7254 75.3 %	Awshearx =	5.04 m <sup>2</sup>	CiRz =	7466 35.2 %	
Awshear =	5.04 m <sup>2</sup>		$\Delta Cix =$	2379 24.7 %	$\Delta ix =$	2.00 m	$\Delta CiRz =$	13756 64.8 %	
Awcomp =	4.80 m <sup>2</sup>			9633 kN s/m	Awsheary =	4.80 m <sup>2</sup>		21222 m kN s/m	
			$\xi_{TOTALMOD0}$	0.856	$\Delta iy =$	2.10 m	$\xi_{TOTALMOD0}$	0.585	
					c2 =	0.36			

Figura 3. Amortiguamiento por Radiación (relativa al Crítico) para distintos Modos Fundamentales

## 4. Resolución del Problema y Evaluación de Resultados: Ejemplo de Cálculo

Una vez planteado el problema (ver Apartados 2 y 3) será necesario llevar a cabo un análisis dinámico para resolverlo y obtener resultados, generalmente frecuencias y modos propios de vibración del Sistema, así como amplitudes de vibración, velocidades y aceleraciones máximas en puntos de control clave del Equipo y/o la Cimentación y compararlos con valores límite aceptables

establecidos por el Fabricante del Equipo o bien recogidos en la Bibliografía especializada [4].

A continuación se resume de manera muy sucinta la definición del problema así como los principales resultados obtenidos derivados de un análisis dinámico llevado a cabo para el diseño de una cimentación destinada a soportar una máquina industrial y los criterios de verificación finalmente adoptados para validar el diseño y garantizar un control de vibraciones adecuado.

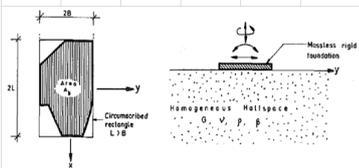
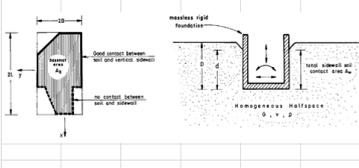
CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL PROBLEMA: FOUNDATION ENGINEERING HANDBOOK - FANG (GAZETAS y DOBRY - 1991):			
<b>1) DEFINICIÓN DE LA ZAPATA RÍGIDA SUPERFICIAL:</b> 		<b>4) CÁLCULO DE PARÁMETROS DINÁMICOS MODELO 1GDL (CIMENTACIONES QUASIRECTANGULARES RÍGIDAS):</b>	
<b>2) PARÁMETROS DEL TERRENO DE CIMENTACIÓN:</b> Gdyn = 39230 kPa ys = 20.85 kN/m <sup>2</sup> v = 0.30 p = 2.13 kN s <sup>2</sup> / m <sup>4</sup> ζ = 0.05 Vs = 135.9 m/s V <sub>LA</sub> = 210.0 m/s	<b>3) PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA:</b> VELmaq = 260 rpm ω = 27.23 rad/s T = 0.231 s f = 4.33 Hz	* DESPLAZAMIENTO VERTICAL: KZsta = 454473 kN/m Sz = 1.93 kz = 1.00 cz = 0.94 ζ TOTALMOD = 0.738	* ROTACIÓN HORIZ X: KRXsta = 1905410 m kN/rad SRX = 2.88 kRX = 0.92 cRX = 0.12 KRXdyn = 1292753 m kN/rad ωRX = 162.2 rad/s CIRX = 946 16.6 % ΔCIRX = 4748 83.4 % m kN s/m = 5694
<b>5) DEFINICIÓN DE LA ZAPATA RÍGIDA EMPOTRADA EN EL TERRENO:</b> 	* DESPLAZAMIENTO HORIZ Y: KYsta = 376612 kN/m Sy = 3.89 ky = 1.00 cy = 0.83 ζ TOTALMOD = 0.515	* DESPLAZAMIENTO HORIZ X: KXsta = 374868 kN/m Sx = 1.00 kx = 1.00 cx = 1.00 KXdyn = 374868 kN/m ωX = 87.6 rad/s Clx = 3656 72.6 % ΔClx = 1377 27.4 % m kN s/m = 5032 ζ TOTALMOD = 0.588	* ROTACIÓN HORIZ Y: KRYsta = 1182188 m kN/rad SRY = 1.00 kRY = 0.88 cRY = 0.14 KRyDyn = 1040038 m kN/rad ωRY = 141.8 rad/s CIRY = 804 17.4 % ΔCIRY = 3820 82.6 % m kN s/m = 4624 ζ TOTALMOD = 0.315
L/B = 1.05 ≤ 5 !!! A/4L <sup>2</sup> = 0.72 ao = 0.48 ≤ 2.0 !!! D = 1.15 m d = 0.60 m Aw = 9.84 m <sup>2</sup> Aw / Acim = 0.78	* DESPLAZAMIENTO HORIZ X: KXembsta = 1.23 kXembdyn = 1.00 ENRASADA = 0.99 v ≤ 0.40 !!! TOTemb = 1.01 ENRASADA = 1.00 TOTemb = 0.99 v ≈ 0.50 !!! L/B = 1.05 ≤ 5 !!! A/4L <sup>2</sup> = 0.72 ao = 0.48 ≤ 2.0 !!! D = 1.15 m d = 0.60 m Aw = 9.84 m <sup>2</sup> Aw / Acim = 0.78	* DESPLAZAMIENTO HORIZ Y: KYembsta = 1.68 kYembdyn = 1.02 D / By = 0.58 ≤ 3.0 !!! kdemb = 1.07 Awshear = 4.80 m <sup>2</sup> Awcomp = 5.04 m <sup>2</sup> KYeembsta = 605209 kN/m KYeembdyn = 663806 kN/m ωY = 116.6 rad/s ClY = 6670 73.2 % ΔClY = 2438 26.8 % m kN s/m = 9108 ζ TOTALMOD = 0.800	* ROTACIÓN HORIZ X: KRXembsta = 1.50 kRXembdyn = 0.92 Inwce = 0.60 m <sup>4</sup> Jws = 6.98 m <sup>4</sup> Awshear = 5.04 m <sup>2</sup> ΔI = 2 m cI = 0.79 KRXembsta = 2113808 m kN/rad KRXembdyn = 1944360 m kN/rad ωRX = 198.9 rad/s CIRX = 7336 40.7 % ΔCIRX = 7141 49.3 % m kN s/m = 14477 ζ TOTALMOD = 0.740
	* ROTACIÓN TORS Z: KRZsta = 2061170 m kN/rad SRZ = 1.00 kRZ = 0.94 cRZ = 0.12 KRZdyn = 1945206 m kN/rad ωRZ = 148.9 rad/s CIRZ = 1029 12.6 % ΔCIRZ = 7146 87.4 % m kN s/m = 8176 ζ TOTALMOD = 0.313	* ROTACIÓN HORIZ Y: KRYembsta = 1.71 kRYembdyn = 0.88 Inwce = 0.58 m <sup>4</sup> Jws = 8.01 m <sup>4</sup> Awshear = 4.8 m <sup>2</sup> ΔI = 2.1 m cI = 0.79 KRYembsta = 2021659 m kN/rad KRYembdyn = 1778567 m kN/rad ωRY = 185.5 rad/s CIRY = 7707 54.1 % ΔCIRY = 6532 45.9 % m kN s/m = 14240 ζ TOTALMOD = 0.742	* ROTACIÓN TORS Z: KRZembsta = 1.92 kRZembdyn = 0.94 Inwce = 13.81 m <sup>4</sup> Awshear = 7.254 m <sup>2</sup> ΔI = 2.00 m Awsheary = 4.80 m <sup>2</sup> Aiy = 2.10 m cZ = 0.36 KRZembsta = 3967976 m kN/rad KRZembdyn = 3795318 m kN/rad ωRZ = 206.6 rad/s CIRZ = 7466 35.2 % ΔCIRZ = 13756 64.8 % m kN s/m = 21222 ζ TOTALMOD = 0.585

Figura 4. Planteamiento del Problema y Cálculo de Impedancias Dinámicas (K, C)

En la Figura anterior se describe el Planteamiento del Problema llevado a cabo para el cálculo de vibraciones de una Zapata enterrada de Planta cuasirectangular de dimensiones máximas 4.00mx4.20m x 1.15m sometida a la acción de una carga harmónica senoidal actuando con una frecuencia igual a 260rpm (4.33Hz). En la figura 4, se muestran los valores de frecuencias y amortiguamiento modal obtenidos para los seis (6) primeros modos fundamentales de vibración de la cimentación (S1GDL equivalente). Estos valores calculados sirven de “Orden de Magnitud” para comparar con los realmente obtenidos mediante el Análisis MEF y poder validar la veracidad del mismo (ver Figura 5).

A partir de aquí se lleva a cabo un Análisis Dinámico (Time History) del Modelo obteniéndose valores de desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas en cada uno de los puntos de la cimentación que serán comparados con los umbrales máximos admisibles recomendados por la Bibliografía especializada [6, 1] o la Normativa Internacional encontrada al respecto [4].

Los valores máximos obtenidos del cálculo, así como las comprobaciones realizadas se muestran en las Figuras 6a y 6b.

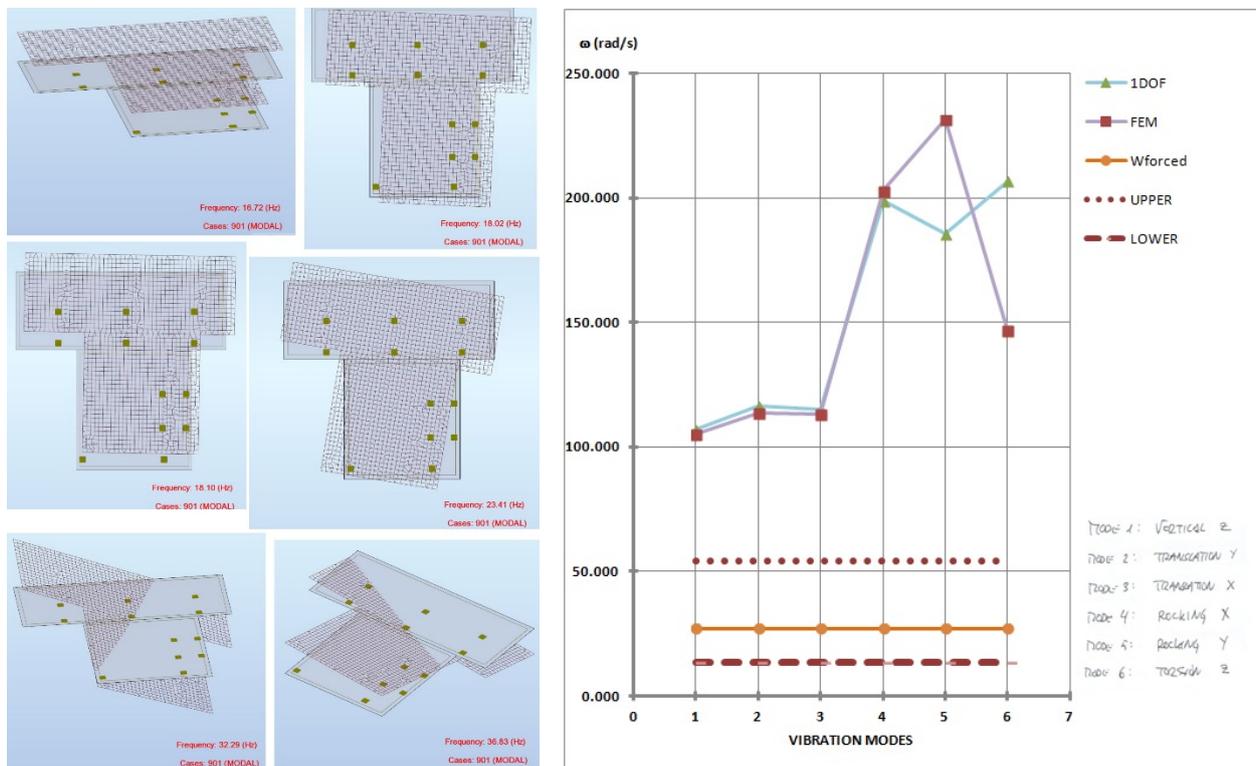


Figura 5. Comparativa resultados de Modos de Vibración Fundamentales MEF / S1GDL

Uno de los resultados fundamentales del análisis consiste en determinar el margen de seguridad existente frente a la aparición del efecto de resonancia (ratio entre la frecuencia de operación de la máquina y los diferentes modos naturales de vibración del Sistema;

comprobando que éste se encuentra suficientemente alejado de la unidad (Resonancia). El margen a adoptar varía [1, 2, 4] aunque puede resultar necesario adoptar valores más conservadores cuando tengamos incertidumbre en la definición de los restantes parámetros que definen el problema.

El propósito final del diseño del Conjunto Equipo - Cimentación - Terreno consiste en determinar que las vibraciones resultantes del funcionamiento del Equipo se mantienen dentro de unos límites aceptables, tanto para garantizar un comportamiento operacional adecuado (evitando daños o desgastes prematuros al equipo o sus componentes) así como asegurar el confort de los operarios que trabajan en las inmediaciones del Equipo y evitar transmitir vibraciones a otras Estructuras o instalaciones próximas. Para ello, hemos de comparar los valores máximos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones obtenidos en el cálculo con los umbrales de diseño adoptados que garanticen tanto un adecuado comportamiento de la máquina como una comodidad para los usuarios de la misma y los trabajadores próximos a su ubicación. En la literatura técnica se proporcionan diferentes criterios de validación mediante umbrales máximos y mínimos que no han de sobrepasarse [1, 4].

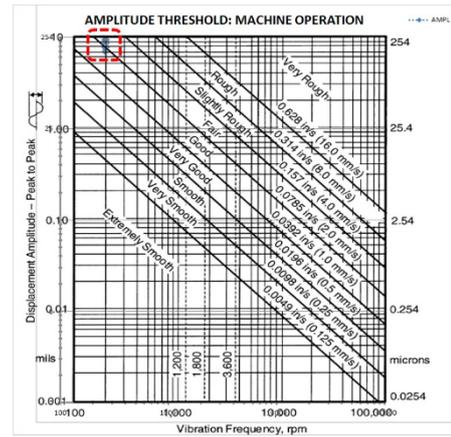


Figura 6b. Funcionalidad del Equipo: Amplitud de Vibraciones Máximas [4]

En última instancia, si los resultados del cálculo arrojan la imposibilidad de encajar la cimentación únicamente mediante la capacidad del terreno para disipar la energía de vibración (fundamentalmente mediante el fenómeno de radiación), o bien necesitamos modificar la rigidez del terreno para incrementar los márgenes de seguridad frente al fenómeno de resonancia (en alguno o varios de los modos fundamentales de vibración del sistema) o queremos evitar transmitir vibraciones al entorno más próximo de la máquina, será necesario emplear dispositivos externos de aislamiento de vibraciones.

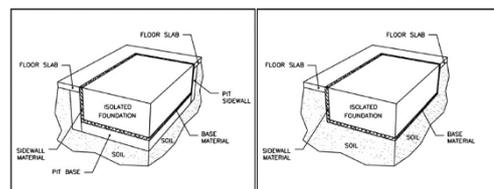


Figura 7. Diferentes Métodos de Aislamiento de Vibraciones en Zapatas [9]

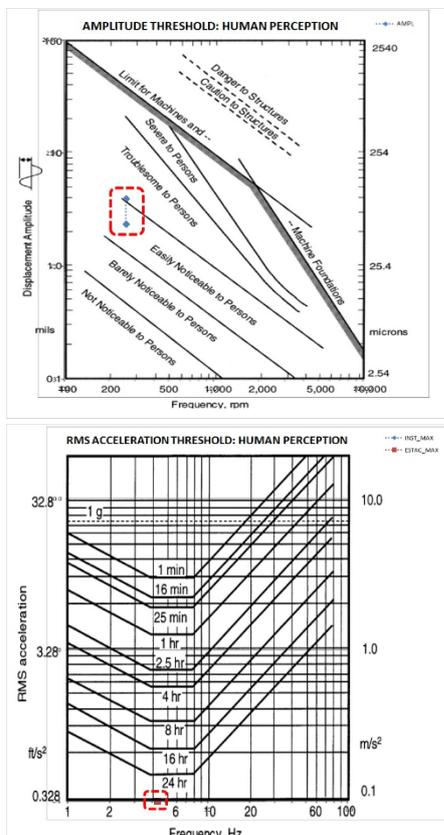


Figura 6a. Confort de los Usuarios: Amplitud de Vibraciones y Aceleraciones Máximas [4]

garanticen un adecuado comportamiento del Sistema Máquina – Cimentación – Terreno.

## 5. Conclusiones

El diseño de una cimentación para soportar cargas dinámicas resulta un problema complejo muy influenciado por los parámetros dinámicos del suelo adoptados en el análisis. En el presente artículo se resume una metodología para analizar el problema teniendo en cuenta, de manera simplificada, la incertidumbre de los parámetros involucrados en su resolución y se proporcionan criterios de comprobación de los resultados obtenidos a modo de validación final del diseño para lograr un control de vibraciones efectivo del Sistema y evitar daños al propio equipo, así como reducir la transmisión de vibraciones a los operarios y máquinas ubicados en las proximidades.

## Referencias

- [1] H.Y. Fang. Foundation Engineering Handbook. Chapman & Hall. 2nd Ed., 1991.
- [2] Joseph E. Bowles. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill. 5th Ed., 1996.
- [3] Braja M. Das. Principles of Soil Dynamics. Cengage Learning. 3rd Ed., 2016.
- [4] ACI 351.3R-18. Foundations for Dynamic Equipment. ACI Committee 351. 2018.
- [5] Anil K. Chopra. Dynamics of Structures. Prentice Hall International. 3rd Ed., 2007.
- [6] Singiresu S. Rao. Mechanical Vibrations. Addison-Wesley. 3rd Ed., 1995.
- [7] George Gazetas. Analysis of machine foundations: State of the art. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol. 2, No. 1.
- [8] George Gazetas. Formulas and Charts for Impedance of Surface and Embedded Foundations. Journal of Geotechnical Engineering, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1991, Vol. 117, No. 9.
- [9] FABREEKA. Foundation Isolation Solutions for Equipment and Machines. [www.fabreeka.com](http://www.fabreeka.com)
- [10] [www.mecanocaucho.com](http://www.mecanocaucho.com)