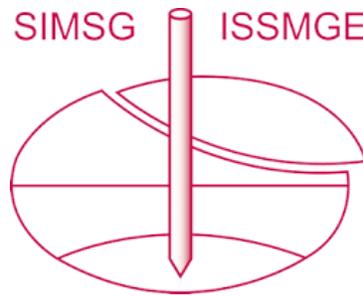


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Análisis dinámico de la cimentación de compresor reciprocante

Adrián LÓPEZ-FLORES<sup>a,1</sup>, Antonio RUVALCABA-GONZÁLEZ<sup>b</sup>, Ismael ALDAMA-BARRERA<sup>c</sup> y Ricardo RODRÍGUEZ-SEGURA<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Profesor ESIAZ-IPN y UPAEP

<sup>b</sup>Especialista en Geotecnia

<sup>c</sup>Especialista Estructural. ICA FLUOR ([ismael.aldama@icafluor.com](mailto:ismael.aldama@icafluor.com))

<sup>d</sup>Profesor ESIAZ-IPN

**Resumen.** Se describe brevemente aspectos geotécnicos del proyecto y construcción de cimentaciones profundas para un grupo de equipos vibratorios (5.7 MN), apoyados en un depósito de suelo aluvial donde se ubica una planta de energía. Las cimentaciones consistieron de losas de cimentación (mat) y pilas de concreto reforzado coladas in situ, que se instalaron a profundidades suficientes para desempeñarse apropiadamente con base en los criterios técnicos del proyecto. Se incluyen elementos estratégicos que fungen como una guía a considerar para la formulación de los protocolos de análisis, diseño y construcción, así como aspectos prácticos para la modelación computacional del funcionamiento de las cimentaciones ante las acciones de diseño. Finalmente, se incluyen las conclusiones y recomendaciones derivadas de su aplicación a 2 estudios de caso.

**Palabras Clave.** Cimentación, maquinaria, modelación, resonancia, diseño.

## 1. Introducción

El proyecto de cimentaciones para estructuras industriales que alojan maquinaria vibratoria, particularmente del tipo reciprocante como lo son los compresores, implica el desarrollo de las etapas de análisis y diseño enmarcadas por normativas, criterios técnicos en función de los datos y especificaciones operativas del fabricante de la maquinaria, así como de las re-evaluaciones sucesivas del desempeño conjunto del sistema suelo-cimentación-maquinaria, comúnmente basadas en la filosofía de los estados límite, sean de falla, de servicio, o de estabilidad dinámica, que cada caso amerite, para los aspectos geotécnicos y estructurales. En este contexto, aspectos como la caracterización geotécnica de las condiciones y parámetros del subsuelo, la caracterización de las acciones y sus combinaciones para arreglos individuales o múltiples de la estructura soporte del equipo, así como los datos técnicos que el fabricante del equipo proporciona, deben conducir a un diseño con características constructivas y de funcionamiento específicas; esto representa un papel esencial en la elección del tipo de cimentación, en la modelación del sistema suelo-cimentación-maquinaria y en la revisión del desempeño óptimo.

---

<sup>1</sup> Autor de correspondencia, Geotecnia ESIA Zacatenco IPN, CP 07340 CDMX México [correoadi@yahoo.com](mailto:correoadi@yahoo.com).

Considerando la experiencia desarrollada en México a partir del proyecto de casos diversos de cimentaciones para maquinaria industrial, así como el cúmulo de los conocimientos específicos requeridos para el análisis racional de las cimentaciones, particularmente los que utilizan los enfoques numéricos basados en el método del elemento finito y similares, surge entonces como conveniente, establecer elementos esenciales del proceso de análisis, que permitan guiar el diseño del sistema en los aspectos geotécnico y estructural, procurando optimarlo.

A continuación se describen las fases de análisis, diseño geotécnico y estructural de la cimentación de grupos de compresores industriales en 2 sitios, en subsuelo consistente en depósitos aluviales dominados por suelos finos, destacando el papel de la caracterización de los parámetros del suelo, la selección y validación del modelo de análisis dinámico del sistema suelo-cimentación-maquinaria, para la identificación de los patrones de comportamiento que puedan afectar el dimensionamiento geotécnico de la cimentación y su eventual desempeño estructural, considerando las diferentes combinaciones de carga de diseño.

## **2. Cimentaciones y estructuras de apoyo comunes para compresores industriales**

Se busca que la forma de decidir el apoyo de las estructuras para compresores vibratorios, se base en el conocimiento, el aprovechamiento de las propiedades y el comportamiento cíclico del terreno en que se distribuyen los esfuerzos y deformaciones, de tal forma de preservar razonablemente la estabilidad, seguridad y funcionalidad del sistema conjunto suelo-cimentación-maquinaria ante las acciones de funcionamiento real, de acuerdo con la filosofía de diseño elegida para el proyecto, incluyendo normas, tolerancias y restricciones. Particularmente, el funcionamiento del sistema suelo-cimentación se prefiere sea hiperestático y frecuentemente conduce a la combinación de pilotes o pilas con losa de cimentación para maquinaria pesada; mientras que el acoplamiento con la maquinaria suele preferirse con un arreglo monolítico. En la Figura 1 se esquematizan cimentaciones comunes por superficie o a profundidad para maquinaria vibratoria [1, 2].

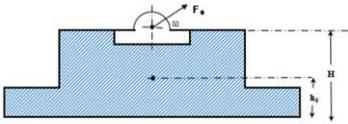
## **3. Acciones de diseño, requisitos y restricciones**

Los requisitos de funcionamiento del sistema suelo-cimentación-maquinaria se basan inicialmente en cumplir con la estabilidad y funcionalidad del sistema ante las diferentes combinaciones de las acciones de diseño, así como en la eventual sobre-posición de condiciones contextuales de restricción de espacios o cercanía con otras cimentaciones, sea en forma previa o reconfiguración posterior del proyecto, por lo que el planteamiento del criterio de diseño a utilizar debe prever racionalmente el escenario de funcionamiento cotidiano y suficiente.

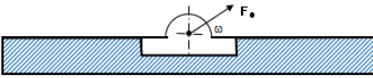
Conviene conocer primeramente las propiedades de vibración natural del sitio de proyecto, dominadas por el primer modo, ya que serán la condición de escenario previo de manifestación de las acciones. Las combinaciones factibles entre carga muerta, carga viva, carga de operación (dinámicas) y carga accidental, frecuentemente se racionalizan, sea en términos probabilistas y/o deterministas. Es común iniciar con un pre-dimensionamiento propuesto de cimentación superficial y la revisión de su funcionamiento, a partir de pesos propios disponibles, ante los estados límite que debe cumplir; en caso de insuficiencia, se recurre entonces a considerar alternativas, entre ellas

el uso de una cimentación profunda, también con una estimación inicial de su peso propio y su pre-dimensionamiento, ajustando dimensiones hasta lograr el desempeño requerido. En la Figura 2 se ilustra una guía a considerar para definir el proyecto de cimentación:

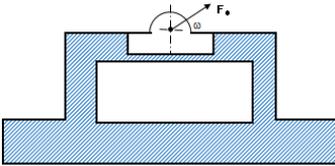
- Acciones: las cargas muertas incluyen al peso propio cimentación-estructura-maquinaria, las fuerzas dinámicas por funcionamiento de la maquinaria, las fuerzas accidentales y las variaciones del NAF del subsuelo.
- Requisitos: frecuencia de vibración del sistema suelo-cimentación-maquinaria, Factores de seguridad mínimos para las combinaciones de acciones,
- Restricciones y tolerancias: máxima amplitud de desplazamiento vibratorio, frecuencias de las cargas cíclicas, excentricidad de cargas y centros de reacción, relación de inercias (longitudinales y angulares), a la propia cimentación o a las alledañas.



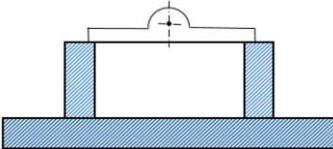
Maquinaria Soportada por Cimentación  
Tipo-Bloque



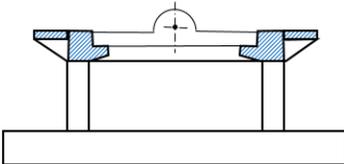
Maquinaria Soportada por Cimentación  
Tipo-Losa



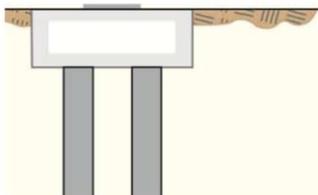
Maquinaria Soportada por Cimentación  
Tipo-Cajón



Maquinaria Soportada por Cimentación  
Tipo-Muro



Maquinaria Soportada por Cimentación  
Tipo-Marco



Maquinaria soportada por losa (MAT) y  
pilotes o pilas de cimentación

**Figura 1.** Formas comunes de cimentaciones para maquinaria vibratoria.

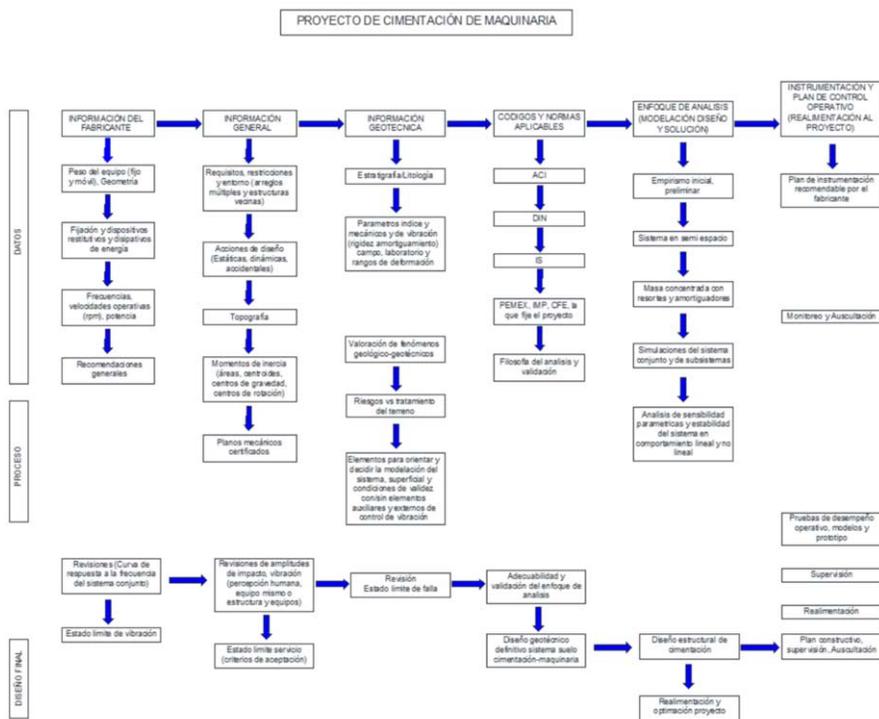


Figura 2. Diagrama de bloques que puede guiar el diseño de cimentación de maquinaria.

#### 4. Validación de la modelación y del análisis del sistema dinámico suelo-cimentación-maquinaria

Los métodos analíticos del desempeño geotécnico del sistema suelo-cimentación-maquinaria necesariamente implican idealizaciones basadas en hipótesis o simplificaciones del comportamiento esfuerzo-deformación y esfuerzo-deformación-tiempo de los diferentes materiales y masas de los que consta, así como de las condiciones de apoyo, de anclaje maquinaria-cimentación y de frontera, por lo que dependiendo del grado de cumplimiento entre estas simplificaciones y las características resultantes del sistema ya operando será en consecuencia la representatividad del comportamiento previsto en un modelo de análisis con respecto al sistema real. Sin embargo, si algún fenómeno geotécnico es factible de ocurrir en el suelo de apoyo (por ejemplo, inestabilidad dinámica durante el ciclaje de carga, erosión, agrietamiento, subsidencia, entre otros), entonces es posible que los resultados del análisis deban ser corregidos para tomarlos en cuenta. Es así que la caracterización de estos fenómenos de inestabilidad factibles de ocurrir, también es motivo de estudio para valorar el grado de afectación en la respuesta del sistema, y por tanto en la validación del modelo de comportamiento utilizado.

Así, la validación del uso del modelo y del enfoque de análisis debe tomar en cuenta, a priori:

1. Cumplimiento con el que las hipótesis del modelo utilizado sean comprobadas durante la construcción y fijación de la cimentación,

2. Resultados de simulaciones a priori de comportamiento conjunto del sistema suelo-cimentación-maquinaria (sea en equipos con cimentación individual o en arreglo de múltiples equipos); durante el funcionamiento,
3. Resultados de mediciones de la instrumentación en puntos estratégicos y representativos del comportamiento de los subsistemas del conjunto (tomando en cuenta que la instrumentación suele ser en el dominio del tiempo, no de la frecuencia).

La validación del enfoque de análisis se ha planteado como el resultado de tres etapas:

1. Simulación computacional del comportamiento del sistema suelo-cimentación-maquinaria (previa a la construcción),
2. Instrumentación y auscultación del comportamiento vibratorio a partir de la observación de la respuesta de puntos y partes específicas del sistema conjunto (ya construido y en la etapa de pruebas iniciales de desempeño),
3. Ajustes y realimentación que el sistema amerite a efecto de comparar el valor de variables de control específicas medidas directamente con el que se obtiene de las simulaciones, incluso a partir de análisis de sensibilidad paramétrica en el modelo global.

Para los casos de aplicación descritos a continuación, es necesario indicar que tomando en cuenta los suelos encontrados en cada sitio, así como las descargas del compresor recíprocante, se determinó solucionar estas cimentaciones mediante pilas coladas en sitio de concreto, apoyados a una profundidad variable entre 15 y 20 m, dependiendo de las características particulares de cada estructura, así como las variaciones locales de la estratigrafía.

### 5. Caso historia 1

#### 5.1. Información del fabricante del compresor recíprocante

- Peso estático, incluye cimentación y maquinaria es de 5.70 MN
- Velocidad de operación primaria (fm): 360 rpm, (6 Hz)
- Fuerzas de inercia desequilibradas y momentos en la base del compresor, ver Figura 3.

Operación	$F_H$ kN	$M_{H(Y-Y)}$ kN-m	$M_{H(X-X)}$ kN-m	$M_{V(X-X)}$ kN-m
Primaria	52.56	390.60	-	131.72
Secundaria	818	-	39.46	-

$F_H$  =Máxima Fuerza horizontal;  $M_H$ =Máximo Momento horizontal;  
 $M_V$ =Máximo Momento vertical

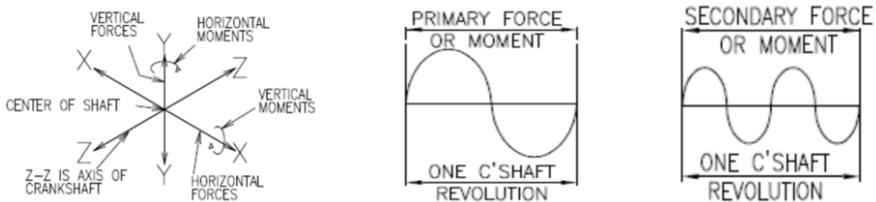


Figura 3. Sistema de fuerzas y momentos dinámicas.

### 5.2. Información general de la maquinaria

- a) Tipo de maquinaria: Compresor recíprocante.
- b) La maquinaria se compone de dos partes: motor y compresor, por las características particulares de la maquinaria requiere de una losa de concreto de 9.1 m de ancho por 10.6 m de largo y un espesor de losa de 50 cm apoyado sobre un arreglo de 16 pilas de 0.80 m de diámetro y longitud de 18.5 m de concreto coladas en sitio [3], espaciadas a cada 2.4 m, mostradas en la Figura 4.

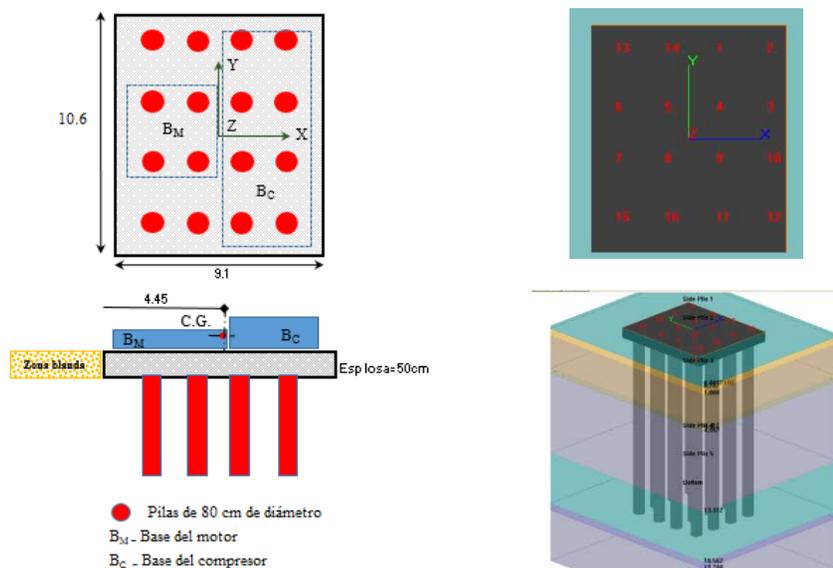


Figura 4. Arreglo general de cimentación y pilas para el compresor recíprocante.

El centro de gravedad (C.G.) del sistema cimentación-maquinaria está localizada a 1.50 m a partir del desplante de cimentación.

### 5.3. Información geotécnica.

Condiciones de suelo para el sitio 1, sus unidades geológicas predominantes en la zona son de origen sedimentario arcillosa-arenosos y areno-calcareos, detectándose superficialmente un relleno no controlado y debajo de ésta arcillas de alta plasticidad de consistencia de muy blanda a blanda, en seguida de una arcilla de baja plasticidad de consistencia muy blanda, posteriormente y hasta la máxima profundidad explorada, se encuentra una arena-arcillosa de compacidad densa a muy densa, ver Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del suelo del sitio 1.

Profundidad m	Tipo de suelo	Vs m/s	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
0.00 - 0.95	GP	225	19.60
0.95 - 2.65	SC	269	15.70
2.65 - 9.85	CH	145	16.00
9.85 - 11.20	CL / SC	255	19.20
11.20 - 17.05	SC	343	18.60
17.05 - 18.45	SC	430	19.60

Período fundamental del suelo  $T_s = 0.2920$  segundos  
 Nivel de Aguas Freáticas a 1.40 m del nivel de piso terminado

5.4. Análisis y resultados utilizando el programa Dynan [4]

Se asume para este análisis que la cimentación es de tipo-bloque y se desplazara como un elemento rígido, bajo la influencia de fuerzas y momentos superpuestos.

Tabla 2. Constante de rigidez y de amortiguamiento, para de sitio 1.

CONSTANTE DE RIGIDEZ, (K)	DYNAN			Unidades
	Núm. De modo	Condición		
		1. En modo de vibrar máximo	2. En Operación (6Hz)	
HORIZONTAL TRANSLATION (KXX) ..	1	1,302,070	1,488,000	kN/m
HORIZONTAL TRANSLATION (KYY) ..	2	1,415,810	1,478,720	kN/m
VERTICAL TRANSLATION (KWW) ...	3	68,464,900	4,364,410	kN/m
ROTATION (KPPX)	4	577,433,000	201,944,000	kN-m/rad
ROTATION (KPPY)	5	631,052,000	181,129,000	kN-m/rad
TORSION (KZT)	6	38,070,800	42,630,800	kN-m/rad

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO, (C)

HORIZONTAL TRANSLATION (CXX) ..	1	17,128	16,673	kN/m/s
HORIZONTAL TRANSLATION (CYY) ..	2	16,699	16,538	kN/m/s
VERTICAL TRANSLATION (CWW) ...	3	78,180	76,188	kN/m/s
ROTATION (CPPX)	4	454,952	433,617	kN-m/rad/s
ROTATION (CPPY)	5	573,613	372,938	kN-m/rad/s
TORSION (CZT)	6	201,970	189,782	kN-m/rad/s

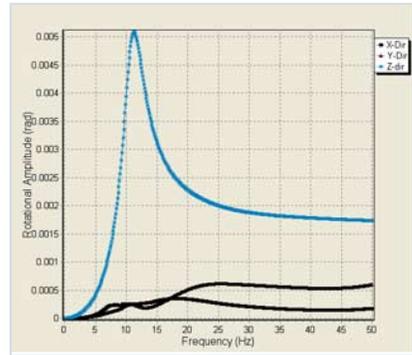
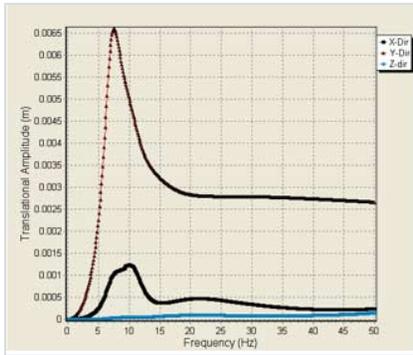


Figura 5. Serie de Amplitudes en el tiempo de las frecuencias, que resultan del programa Dynan.

Los resultados de la contaste de rigidez y de amortiguamiento, ver Tabla 3 y 2, fueron determinadas asumiendo un sistema no lineal suelo-pila, es decir, las capas de suelos estratificadas y considerando un  $G_i/G_0 = 25\%$  en la zona blanda (relleno de la cimentación).

Tabla 3. Resumen de rigidez y amortiguamiento para pila de cimentación ( $f= 6.0\text{Hz}$ ).

$K_{HX}$	$K_{HY}$	$K_{VZ}$	$C_{HX}$	$C_{HY}$	$C_{VZ}$
$1.488 \times 10^6$	$1.478 \times 10^6$	$4.364 \times 10^6$	$1.663 \times 10^4$	$1.654 \times 10^4$	$7.619 \times 10^4$

Rigidez [K], en kN/m/s, Amortiguamiento [C], en kN-m/rad/s

Como puede apreciarse en la Tabla 4 y Figura 5, comparando los efectos de resonancia que arroja el programa Dynan, vemos que no hay resonancia, la relación de frecuencia de la maquina ( $f_m$ ) a la frecuencia del sistema máquina-cimentación-suelo ( $f_o$ ) no están dentro de los límites 0.8 a 1.3.

**Tabla 4.** Revisión de efecto de resonancia en operación.

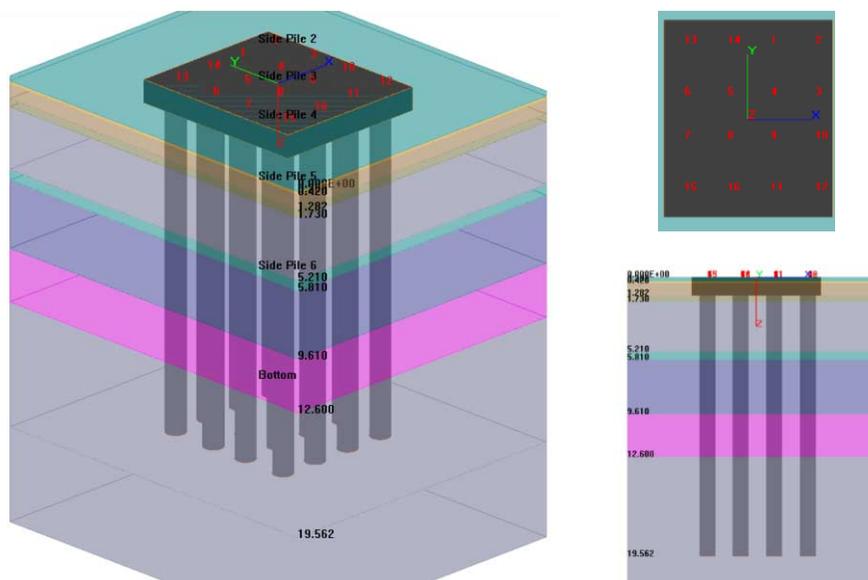
Modos de vibrar	Frecuencia Maquinaria	Frecuencia del sistema, ( $f_o$ )	Revisión de resonancia <sup>[5]</sup>
	Hz	Hz	$f_o / f_m$
Horizontal X ( $K_{HX}$ )	6	10.0	0.60
Horizontal Y ( $K_{HY}$ )	6	7.6	0.79
Vertical Z ( $K_{VZ}$ )	6	59.0	0.10
Cabeceo X ( $K_x$ )	6	78.6	0.08
Cabeceo Y ( $K_y$ )	6	62.4	0.10
Torsional Z ( $K_z$ )	6	11.2	0.54

## 6. Caso historia 2.

### 6.1. Información del fabricante del compresor recíprocante

Las características de la maquinaria son las mismas del punto 5.1

- Tipo de maquinaria: Compresor recíprocante.
- La maquinaria se compone de dos partes: motor y compresor, por las características particulares de la maquinaria requiere de una losa de 9.1 m de ancho por 10.6 m de largo y un espesor de losa de 50 cm apoyado sobre un arreglo de 16 pilas de longitud de 12.6 m de concreto coladas in situ, espaciadas a cada 2.4 m, mostradas en la Figura 6.



**Figura 6.** Planta y corte de la cimentación del modelo Dynan.

El Centro de gravedad (C.G.) del sistema cimentación-maquinaria está localizada a 1.50 m a partir del desplante de cimentación

6.2. Información geotécnica

Condiciones de suelo para el sitio 2, se encuentra asentada sobre un aluvión estratificado, constituido principalmente por suelos granulares, predominando las arenas arcillosas de compacidad media a muy densas, así como intercalaciones lentes de suelos finos arcilla de baja y alta plasticidad de consistencia que van de muy blandas a medias, el cual le subyace una roca ígnea intrusiva tipo granítica, la cual se considera el basamento geológico del sitio, ver Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del suelo del sitio 2.

Profundidad m	Tipo de suelo	Vs m/s	γ kN/m <sup>3</sup>
0.00 - 0.42	SC	128	21.20
0.42 - 1.73	SC	292	21.20
1.73 - 5.21	CL	292	19.00
5.21 - 5.81	SM	217	18.75
5.81 - 9.61	MH	288	14.20
9.61 - 12.60	SC	403	18.85

Período fundamental del suelo Ts = 0.1896 segundos  
 Nivel de Aguas Freáticas a 1.70 m del nivel de terreno natural

6.3. Análisis y resultados utilizando el programa Dynan

Se asume para este análisis que la cimentación es de tipo-bloque y se desplazara como un elemento rígido, bajo la influencia de fuerzas y momentos superpuestos.

Tabla 6. Constante de rigidez y de amortiguamiento, para de sitio 2.

CONSTANTE DE RIGIDEZ, (K)	DYNAN			Unidades
	Condición			
	Núm. De modo	1. En modo de vibrar máximo	2. En Operación (6Hz)	
HORIZONTAL TRANSLATION (KXX) ..	1	3,888,340	4,563,500	kN/m
HORIZONTAL TRANSLATION (KYY) ..	2	4,173,230	4,534,530	kN/m
VERTICAL TRANSLATION (KWW) ...	3	92,805,900	7,064,080	kN/m
ROTATION (KPPX)	4	1,047,720,000	334,673,000	kN-m/rad
ROTATION (KPPY)	5	1,001,650,000	299,329,000	kN-m/rad
TORSION (KZT)	6	99,359,500	118,371,000	kN-m/rad

CONSTANTE DE AMORTIGUAMIENTO, (C)

HORIZONTAL TRANSLATION (CXX) ..	1	33,079	31,423	kN/m/s
HORIZONTAL TRANSLATION (CYY) ..	2	32,155	31,197	kN/m/s
VERTICAL TRANSLATION (CWW) ...	3	111,162	88,797	kN/m/s
ROTATION (CPPX)	4	565,619	583,536	kN-m/rad/s
ROTATION (CPPY)	5	745,478	512,494	kN-m/rad/s
TORSION (CZT)	6	336,593	285,532	kN-m/rad/s

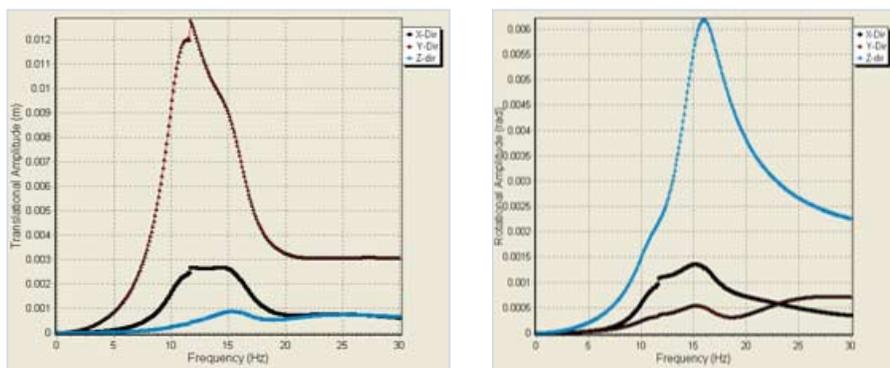


Figura 7. Serie de Amplitudes en el tiempo de las frecuencias, que resultan del programa Dynan.

Los resultados de la constaste de rigidez y de amortiguamiento, ver Tabla 6 y 7, fueron determinadas asumiendo un sistema no lineal suelo-pila, es decir, las capas de suelos estratificadas y considerando un  $G_i/G_0 = 25\%$  en la zona blanda (relleno de la cimentación).

Tabla 7. Resumen de rigidez y amortiguamiento para pila de cimentación ( $f = 6.0\text{Hz}$ ).

$K_{HX}$	$K_{HY}$	$K_{VZ}$	$C_{HX}$	$C_{HY}$	$C_{VZ}$
$4.564 \times 10^6$	$4535 \times 10^6$	$7.064 \times 10^6$	$3.142 \times 10^4$	$3.120 \times 10^4$	$8.880 \times 10^4$

Rigidez [K], en kN/m/s, Amortiguamiento [C], en kN-m/rad/s

Como puede apreciarse en la Tabla 8 y Figura 7, comparando los efectos de resonancia que arroja el programa Dynan, vemos que no hay resonancia, ya que la relación de frecuencia de la maquina ( $f_m$ ) a la frecuencia del sistema máquina-cimentación-suelo ( $f_o$ ) no están dentro de los límites de 0.8 a 1.3, como lo indica la normatividad vigente.

Tabla 8. Revisión de efecto de resonancia en operación.

Modos de vibrar	Frecuencia Maquinaria Hz	Frecuencia del sistema, ( $f_o$ ) Hz	Revisión de resonancia <sup>[5]</sup> $f_o / f_m$
Horizontal X ( $K_{HX}$ )	6	16.2	0.37
Horizontal Y ( $K_{HY}$ )	6	12.4	0.48
Vertical Z ( $K_{VZ}$ )	6	73.2	0.08
Cabeceo X ( $K_x$ )	6	101.6	0.06
Cabeceo Y ( $K_y$ )	6	80.8	0.07
Torsional Z ( $K_z$ )	6	18.0	0.33

### 7. Conclusiones

El proceso de diseño de cimentaciones de maquinaria del tipo compresores reciprocantes debe cumplir con la filosofía de diseño puesta en términos de requisitos de funcionamiento (del fabricante y del usuario) Figuras 8 y 9, restricciones y tolerancias específicos, así como la evaluación racional de las acciones a ocurrir durante cualquier etapa de la vida útil del equipo; es decir, con uno u otro enfoque, enmarcada en los estados límite de falla, los estados límite de servicio y los estados límite de comportamiento dinámico.

Las modelaciones del comportamiento del sistema suelo-cimentación-maquinaria se deben dirigir a la revisión del cumplimiento de los estados límite, sea en los aspectos geotécnico, como en los estructurales a partir de las normativas y bases de diseño, ya que ellos son la ingeniería conceptual del proyecto.

En este contexto se reconoce la importancia que tiene la validación de las idealizaciones y modelaciones requeridas, con el funcionamiento del sistema, como real y finalmente quedó construido en su contexto operativo, por lo que es útil revisar la compatibilidad entre las condiciones de frontera a-priori y a-posteriori de proyecto, el planteamiento de la instrumentación y monitoreo en las condiciones de funcionamiento y la preferente realimentación, vía análisis de sensibilidad con los parámetros medidos, de los resultados con las observaciones del desempeño a efecto de verificar lo adecuado de la ingeniería conceptual del proyecto. La Tabla 1 puede ser guía auxiliar en este proceso.

En los casos historia presentados, se aseguró: a) evitar la condición de resonancia del sistema suelo-cimentación-maquinaria para el primer modo de vibración del subsuelo y las frecuencias operativas de la maquinaria (la relación de frecuencia de la maquina ( $f_m$ ) a la frecuencia del sistema máquina-cimentación-suelo ( $f_o$ ) no están dentro de los límites 0.8 a 1.3); b) el cumplimiento de las restricciones a la amplitud de la vibración operativa, dados por el fabricante de los compresores y la de los códigos técnicos adoptados (se logró menos de 1 mm de amplitud de vibración), c) verificar, por supervisión, la compatibilidad de la ingeniería de proyecto con la construcción y fijación de la maquinaria a la estructura de soporte, Figura 10 y 11. Se reconoce que, posterior a esta etapa, continúa la realimentación de la ingeniería de proyecto para optimarla.



**Figura 8.** Compresor recién instalado.



**Figura 9.** Compresor y accesorios.



**Figura 10.** Contexto operativo del compresor.



**Figura 11.** Compresor y estructuras aledañas.

## Referencias

- [1] Gazetas, G. (1991). "Foundation Vibrations", in *Foundation Engineering Handbook*, (H.Y. Fang, ed.). Van Nostrand Reinhold, New York, NY, pp 553-593.
- [2] Novak, M. (1987). "A State of the Art in Analysis and Desing of Machine Foundations", *Soil-Structure Interaction*, Elsevier/CML Publ., New York, NY, pp 171-192.
- [3] Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1980). "Pile Foundations Analysis and Design", *Jonh Wiley and Sons*.
- [4] Lymon C.Reese, Shin Tower Wang, Jose A. Arellaga y Luis Vasques. (2012). "A Program for Dynamic Analysis of Both Shallow and Deep Foundation Under Harmonic, Transient and Radom Loading Using Imroved Novak´s method", *DYNAN V3.0*, Ensoft, Inc.
- [5] Suresh C. A, Michael W. O. and George P. (1984). "Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines", *Gulf Publishing Company. Book Division. Houston, London, Paris, Tokyo*.