

## PROYECTO ITER – ANÁLISIS DE VIBRACIÓN DE LOS COMPRESORES EN EL EDIFICIO DE CRIOGENIZACIÓN (CRYOPLANT)

### María José MARTÍN FERNANDEZ

Ingeniero de caminos, canales y puertos  
Ferrovia Agroman SA  
Coordinadora de diseño  
[mjmartin@ferrovial.com](mailto:mjmartin@ferrovial.com)

### Ramón MARGALET DE ZABALO

Ingeniero de caminos, canales y puertos  
Ferrovia Agroman SA  
Ingeniero de proyecto  
[rmargalet@ferrovial.com](mailto:rmargalet@ferrovial.com)

### Román MARTÍN

Ingeniero de caminos, canales y puertos  
Ingeciber  
Jefe de equipo  
[r.martin@ingeciber.com](mailto:r.martin@ingeciber.com)

### Mariano SERRANO DE LA ASUNCIÓN

Ingeniero industrial  
Ingeciber  
Ingeniero de proyecto  
[m.serrano@ferrovial.com](mailto:m.serrano@ferrovial.com)

## RESUMEN

El edificio 51 del complejo industrial Iter, denominado Cryoplant Compressor Building, alojará los compresores para el sistema de generación de frío (Cryoplant system) del reactor (Tokamak), el más grande del mundo. El sistema de generación de frío consiste en 23 compresores, los cuales generan y pueden transmitir altas vibraciones al terreno de cimentación. Como consecuencia, se plantea necesario realizar un análisis de vibraciones con el objetivo de determinar el impacto que estos equipos pueden generar a la estructura del edificio que los aloja, cuando éstos están en funcionamiento.

## ABSTRACT

The Building 51 of the Iter Project, named Cryoplant Compressor Building, will house the compressors for the cold generation system (Cryoplant system) of the reactor (Tokamak), the world biggest one. The Cryoplant system consist of 23 compressors, which generate and transmit high vibrations in the supports where they rest. So that, it is necessary to carry out a vibration analysis to determine the impact that these compressors can generate to the structure of the building that houses them, when the compressors are in operation.

**PALABRAS CLAVE:** Vibraciones, análisis dinámico, cimentaciones, resonancia, frecuencia.

**KEYWORDS:** Vibrations, dynamic analysis, foundations, resonance, frequency.

## 1. Introducción y objetivo

El edificio 51 del complejo industrial Iter, denominado Cryoplant Compressor Building, alojará los compresores para el sistema de generación de frío (Cryoplant system) del reactor (Tokamak), el más grande del mundo.

El sistema de generación de frío consiste en 23 compresores, los cuales generan y pueden transmitir altas vibraciones al terreno de cimentación. Como consecuencia, el objetivo de este análisis de vibraciones es determinar el impacto de dichos equipos que pueden generar a la estructura del edificio que los aloja.

## 2. Descripción del edificio de criogenización 51 – Cryoplant Compressor Building 51

### 2.1. Descripción general del edificio 51

El edificio 51 alberga y soporta los compresores del sistema de criogenización del complejo ITER para la regularización de la temperatura en el reactor (Tokamak), controlando los procesos de enfriamiento y calentamiento del mismo.

Las dimensiones del edificio son 76.5 m de largo x 46.5 m. de ancho y 19 m. de alto.

**El esquema estructural consiste en cerchas metálicas en cubierta que reposan en columnas de hormigón armado, que a su vez descansan en zapatas aisladas. Estas zapatas están apoyadas en el terreno a distintos niveles debido a la existencia de galerías subterráneas donde se alojan las tuberías del sistema de criogenización. Además, se dispone una losa de cimentación de hormigón a cota 0.00 para el apoyo de equipos.** Bloques de cimentación para los compresores

Los compresores se apoyan en bloques de hormigón armado totalmente independientes de la losa de cimentación y el resto de la estructura.

Existen cinco tipos de compresores de distintas dimensiones – Tipos A, B, C, D y E:

Tipo compresor	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Masa (t)
A	3400	6000	5600	24
B	3400	6000	5600	24
C	8000	7800	2000	11
D	16500	8500	2500	25
E	8200	3800	2000	107

**Tabla 1. Tipos y características de los compresores**



**Figura 1. Localización de los compresores**

### 3. Datos de partida y modelización

Para realizar el análisis se utilizó el software comercial de elementos finitos ANSYS APDL v14.5.7 propiedad de la empresa Ansys Inc. y CivilFEM v14.5.7.

#### 3.1. Terreno

El terreno es modelado como elementos sólidos (Solid) considerando cuatro estratos diferentes: relleno, suelo existente, 5m de roca caliza fracturada y a partir de una determinada profundidad, roca caliza.

Estrato	Espesor de la capa	Módulo de Young dinámico	Módulo de cortante dinámico	Coefficiente de Poisson dinámico
Relleno compactado	315.2 – 314.8	0.2	0.075	0.38
Suelo existente	314.8 – 313.6	0.2	0.075	0.38
Roca caliza fracturada	313.6 – 308.6	1.5	0.55	0.35
Roca caliza	308.6 – inf.	12.0 – 15.5	4.5 – 6.0	0.35

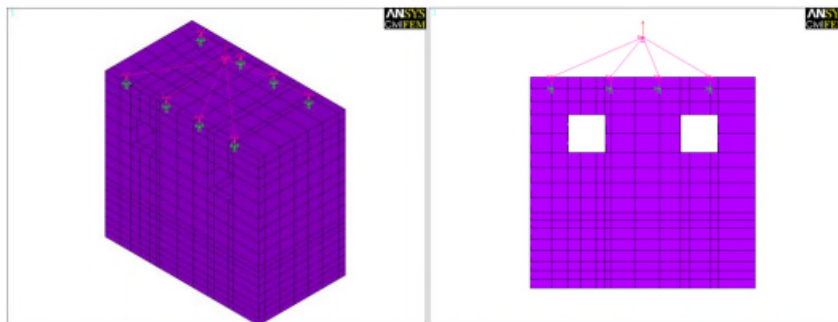
**Tabla 3. Parámetros del terreno**

### 3.2. Geometría general del edificio

En términos generales, los bloques de hormigón para los compresores y los pilares de hormigón armado se han modelado como elementos sólidos (Solid), las cerchas metálicas de cubierta como elementos viga (Beam), y galerías y losa de cimentación como elementos de superficie (Shell).

### 3.3. Bloques de hormigón para compresores

Los compresores se modelizan con su centro de masas y colocando un anclaje rígido en las fijaciones del compresor al bloque de hormigón



**Figura 2. Ejemplo de modelización de un bloque de hormigón y compresor**

Es importante analizar el contacto lateral entre los bloques de hormigón y el terreno existente a su alrededor, ya que a través de éste se produce la transmisión de vibraciones.

Como el comportamiento real entre estas dos superficies es desconocido, se realizan las siguientes comprobaciones extremas:

- 1- Contacto entre bloque de hormigón-terreno (no hay junta vertical). En esta situación la transmisión de vibraciones es máxima y las deformaciones verticales mínimas.)
- 2- No contacto entre bloque de hormigón-terreno (hay junta vertical). En esta situación la transmisión de vibraciones es mínima y las deformaciones verticales máximas.

Se considera que la situación real será una situación intermedia de las dos anteriores.

Además, por motivos constructivos, se hacen dos comprobaciones adicionales considerando que el terreno que rodea a los bloques de hormigón es material de relleno u hormigón en masa.

Se realizan cuatro modelos de cálculo:

- a) Contacto bloque de hormigón-terreno (suelo compactado).
- b) Junta entre bloque de hormigón-terreno (suelo compactado).
- c) Contacto bloque de hormigón-terreno (hormigón en masa).
- d) Junta entre bloque de hormigón-terreno (hormigón en masa).

### 3.4. Propiedades de los materiales

Los parámetros que se han considerado son los siguientes:

Hormigón:

Tipología del hormigón	C30/37
$f_{ck}$ (Resistencia característica)	30 MPa
Resistencia para cargas dinámicas o cargas de corta duración.	33000 MPa

**Tabla 2. Características del hormigón**

### 3.5. Cargas consideradas

Los análisis armónicos se utilizan para determinar la respuesta en estado estacionario de una estructura lineal sometida a cargas que varían sinusoidalmente (armónicamente) con el tiempo, permitiendo así verificar si la configuración estructural del edificio superará con éxito la resonancia y otros efectos dañinos procedentes de las vibraciones forzadas.

En este análisis, todas las cargas, así como la respuesta de la estructura, varían sinusoidalmente a la misma frecuencia. Por lo tanto, sólo se utilizarán las cargas sinusoidales que se transmiten desde los compresores al bloque de cimentación a través de la ubicación de sus anclajes.

### 3.6. Análisis de vibraciones

Se han desarrollado dos análisis diferentes:

- 1-Análisis modal. Este análisis tiene como objetivo determinar las formas modales que son susceptibles de sufrir, así como los puntos de control del modelo donde podría ocurrir la respuesta máxima.
- 2-Análisis armónico. El objetivo es determinar las frecuencias más desfavorables para la estructura, así como determinar la máxima respuesta según el rango de frecuencias de funcionamiento del compresor. Es decir, se realizará un barrido de frecuencia para las cargas armónicas de entrada y se obtendrán los espectros de respuesta máxima (desplazamientos, velocidad y/o aceleración). El barrido de frecuencia se llevará a cabo en el rango de frecuencias de funcionamiento del compresor, por lo tanto las frecuencias en las que pueden presentarse problemas de resonancia pueden identificarse con los valores máximos de los espectros.

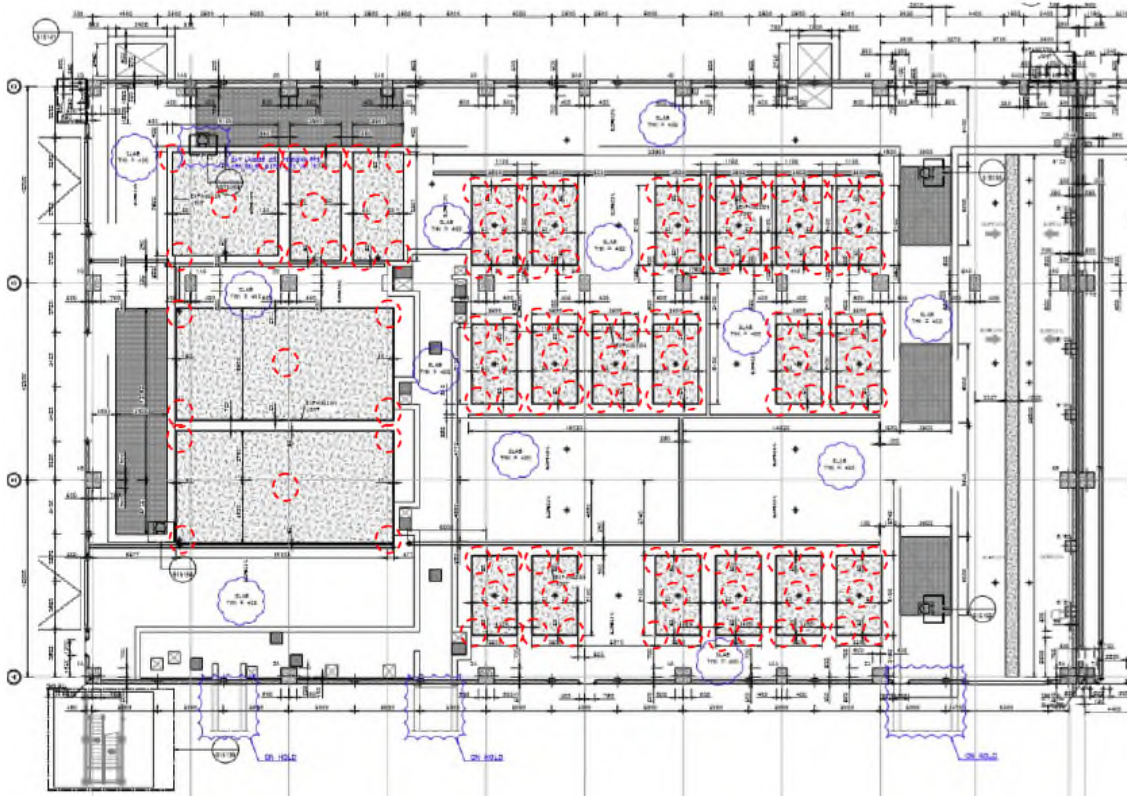
## 4. Puntos de control

Los resultados obtenidos del modelo son las aceleraciones, velocidades y desplazamientos en cada punto de control según la cada la frecuencia. Estos puntos de control (nodos del modelo) deberán corresponder a puntos característicos del edificio y de la cimentación donde la vibración está limitada.

Por tanto, se definen dos tipos de puntos de control según su origen.

### 4.1. Puntos de control de los compresores

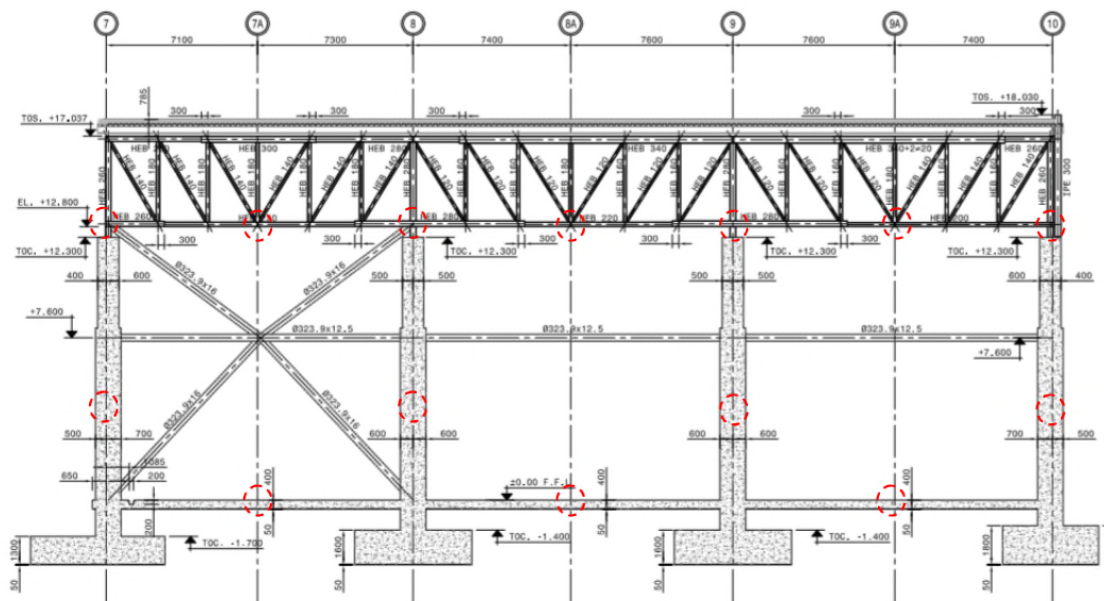
Se define un primer conjunto de 135 puntos de control que se distribuye de la siguiente manera, cinco en cada máquina rotativa - bloque de cimentación, cuatro en las esquinas y uno en el centro de gravedad de la máquina. El desplazamiento relativo entre estos puntos de control permitirá calcular el balanceo y los desplazamientos torsionales de la cimentación.



**Figura 3. Puntos de control de los compresores. Planta**

**4.2. Puntos de control del edificio**

El segundo conjunto de puntos de control corresponde a los puntos característicos del edificio, tales como el punto mitad de vano de las losas de cimentación o posiciones de otros equipos, así como otros puntos de control del edificio donde el análisis modal muestra una respuesta máxima y son susceptibles a sufrir resonancia. De acuerdo con la "BS 7385-1: 1990 / ISO 4866: 1990 Evaluation and measurement for vibration in Buildings", el segundo conjunto de puntos de control se distribuirá a lo largo de la losa del edificio, los pilares y el techo, y su ubicación exacta dependerá de las formas de los modos normales de vibración.



**Figura 4. Puntos de control del edificio 51. Alzado**

### 5. Resultados obtenidos y conclusiones

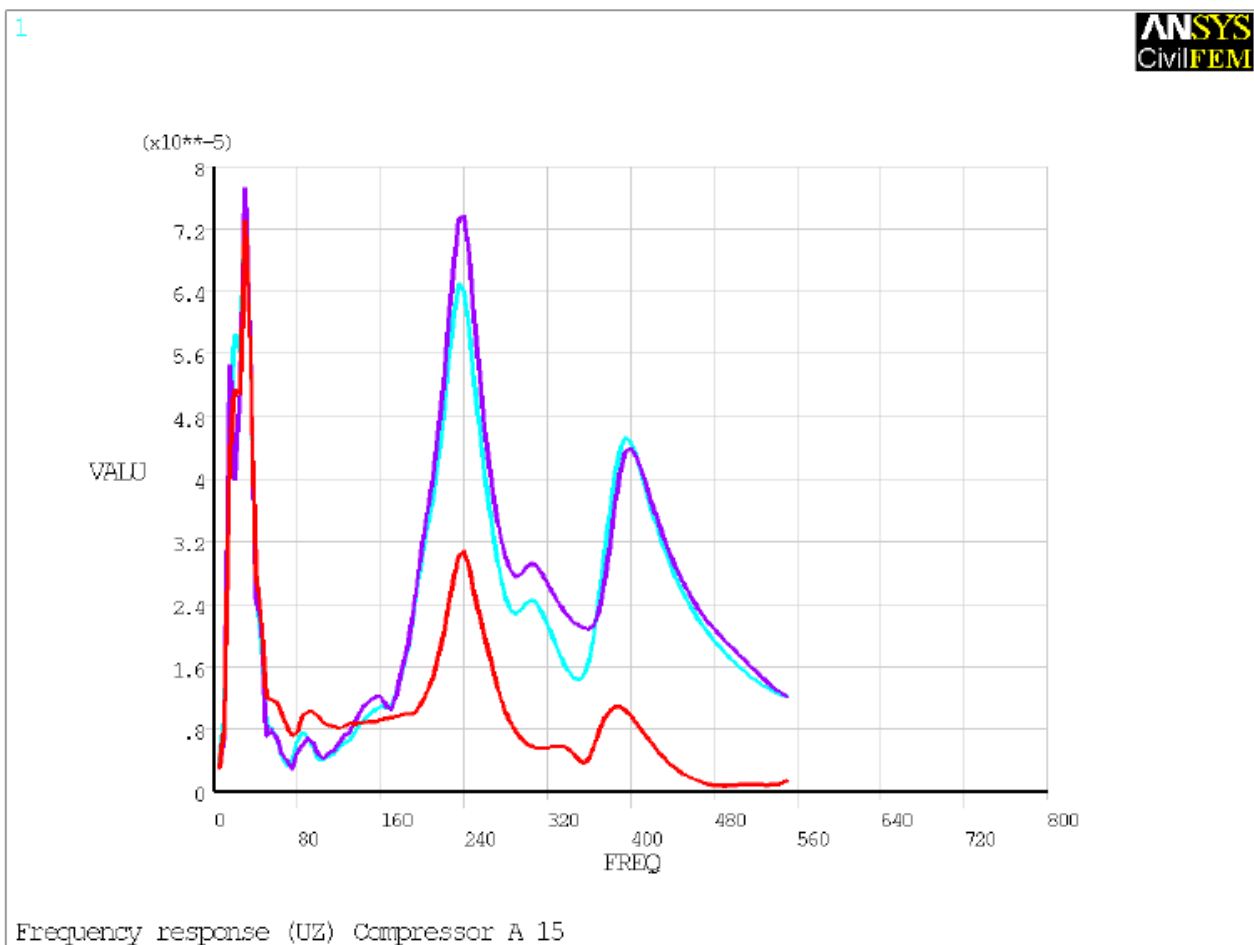
Los límites permisibles de vibración se especifican en la norma “CP 2012-1: 1974 Foundations for machinery”. Estos límites de vibración son especificados para evitar daños en la maquinaria y elementos (estructuras o equipos) cercanos, para controlar el asentamiento del suelo debajo de la cimentación, así como garantizar el confort de las personas que pueden trabajar alrededor de los compresores.

Además, a continuación se muestran los límites de vibración de los compresores:

Id compresor	Tipo compresor	Límite de vibración (mm/s)
101-106 / 201-206 / 301-306	A / B	8
520	C	1.5
710 / 720	D	1.5
610 / 620	E	1.5

**Tabla 2. Límites de vibración de los compresores**

En la siguiente gráfica se muestra un ejemplo del comportamiento a deformación en distintos puntos del bloque de cimentación del compresor, es decir, teniendo en cuenta la masa del compresor (en azul), cara inferior del bloque de cimentación (en rojo) y los anclajes (en violeta).



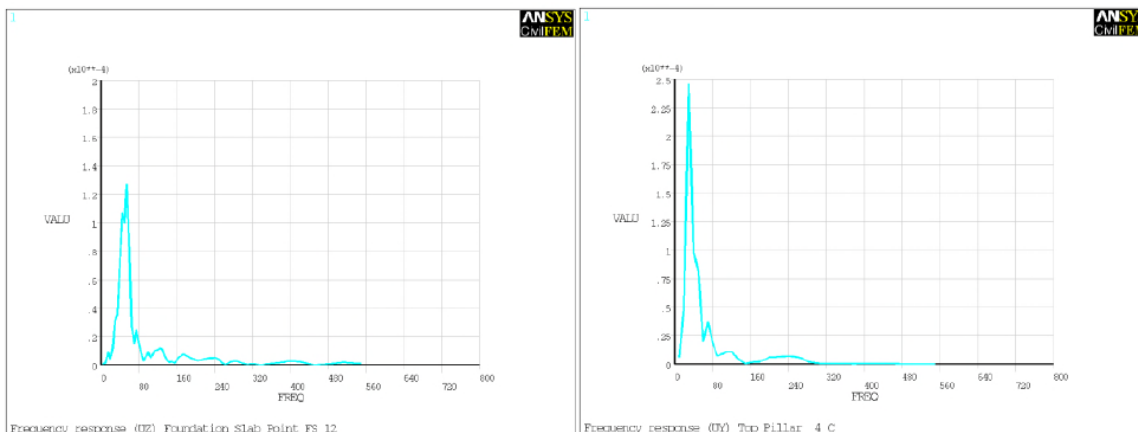
**Figura 5. Gráfica Frecuencia de respuesta (Hz) – Desplazamientos verticales (mm) de un bloque de hormigón (azul), anclajes (violeta) y cara inferior del bloque (rojo). Ejemplo para bloque de hormigón A15**

En el primer pico (30Hz), la deformación en los tres puntos es prácticamente la misma, por lo que todos los elementos se mueven solidariamente como un único cuerpo. Además, para este rango de frecuencias la respuesta es sensible al tipo de material de relleno.

En el último pico (400Hz), la base del bloque de hormigón experimenta una respuesta menor, mientras que el compresor sigue en movimiento. Esto es debido a que la deformación está localizada en los anclajes, por lo que en este rango de frecuencia las vibraciones no se transmiten al resto de la estructura, siendo absorbidas por los anclajes del compresor.

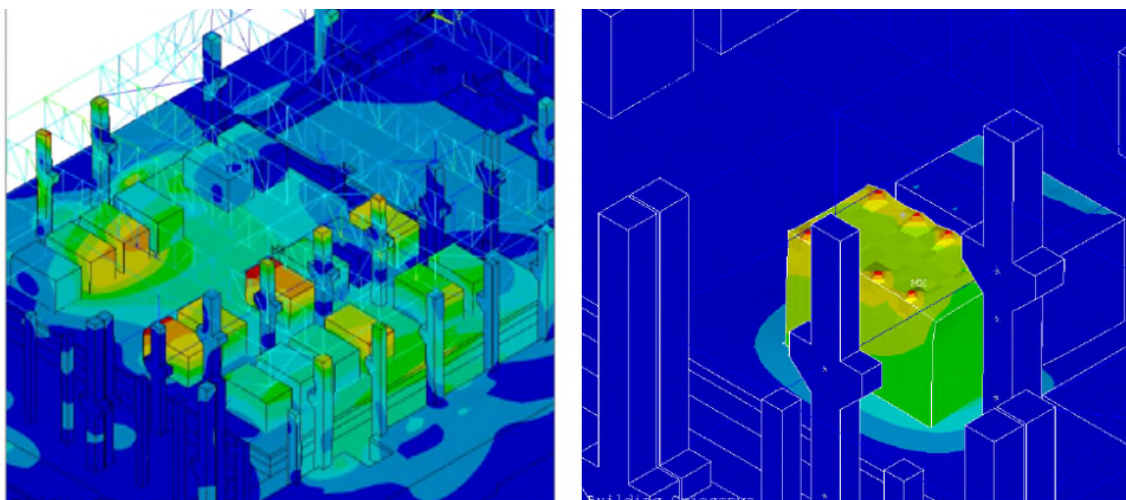
En cuanto al pico intermedio (240Hz), representa un comportamiento intermedio entre ambos picos. En la gráfica se puede ver como la deformación en la base del bloque de hormigón es la mitad ( $0.031\mu\text{m}$ ) respecto la deformación en los anclajes y el compresor ( $0.071\mu\text{m}$ ). En este caso, tampoco se transmiten vibraciones al resto de la estructura.

En el resto de la estructura, losa de cimentación, pilares y cerchas metálicas, se observa un único pico a bajas frecuencias. Tal como se ha comentado en los párrafos anteriores, las vibraciones no se transmiten cuando las altas frecuencias actúan.



**Figura 6. Gráfica Frecuencia de respuesta (Hz) – Desplazamientos verticales (mm) en dos puntos de control en la estructura del edificio 51**

Como consecuencia, se extrae que debe realizarse un diseño apropiado del mecanismo de anclajes de compresor, ya que a intermedias y altas frecuencias las vibraciones son absorbidas por los anclajes.

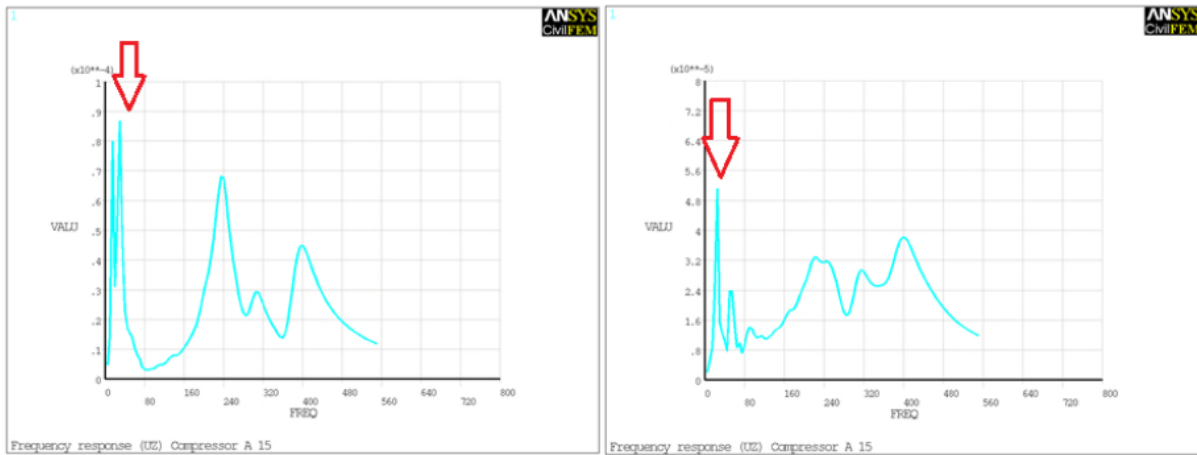


**Figura 7. La imagen de la izquierda muestra la respuesta a bajas frecuencias, mientras que la imagen de la derecha muestra la respuesta a altas frecuencias**



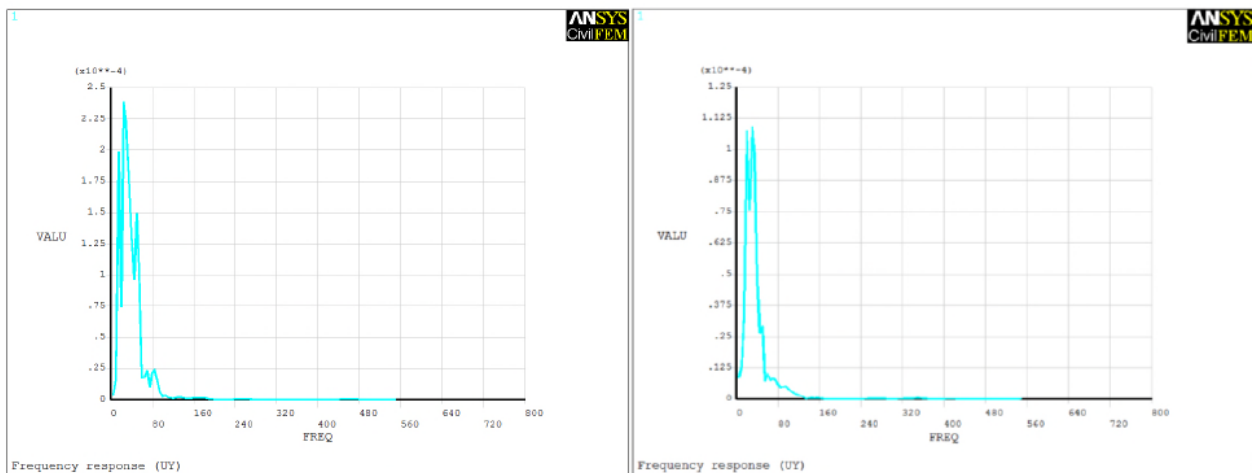
Tal como se ha observado en el modelo y las gráficas anteriores, toda la estructura del edificio se resiente cuando se somete a vibraciones, por lo que, el tipo de material de relleno (suelo compactado o el hormigón en masa), influye en la respuesta del edificio.

En los bloques de cimentación de los compresores, el hormigón en masa transmite una respuesta menor que con el suelo compactado, tal como se puede interpretar en la siguiente gráfica:



**Figura 8. Gráfica Frecuencia (Hz) – Desplazamiento vertical (mm). La gráfica de la izquierda muestra la respuesta para un relleno de suelo compactado, mientras que la gráfica de la derecha muestra la respuesta para un relleno de hormigón en masa.**

Sin embargo, en el resto del edificio (losa de cimentación, pilares y cerchas metálicas), la respuesta es mayor con el hormigón en masa que en con el suelo compactado. Por ejemplo, en los pilares se observan grandes diferencias, siendo en algunos casos la deformación horizontal el triple dependiendo del tipo de relleno a utilizar.



**Figura 9. Gráfica Frecuencia (Hz) – Desplazamiento horizontal (mm). La gráfica de la izquierda muestra la respuesta para un relleno de suelo compactado, mientras que la gráfica de la derecha muestra la respuesta para un relleno de hormigón en masa.**

## 6. Reportaje fotográfico de los bloques de hormigón para los compresores



*Figura 10. Estado actual de los bloques*



*Figura 11. Vista actual de los bloques*