

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA TORRE DE HORMIGÓN

Javier Rodríguez Soler¹, Joaquín Martí¹ y José Serna²

1: Principia
Velázquez 94, 28006 Madrid
javier.rodriguez@principia.es

2: Esteyco
Jardins d'Atlanta 3, 08005 Barcelona

Palabras clave: aerogenerador, hormigón, fisuración, frecuencia natural

Resumen. *Esteyco proyectó una torre de 80 m, constituida por dovelas prefabricadas de hormigón simplemente armado como soporte para un aerogenerador. Se construyó un prototipo que fue cuidadosamente instrumentado, prototipo que fue sometido a una prueba de carga en la que se alcanzó el 80% de la carga máxima de proyecto. El prototipo y su instrumentación se han mantenido operativos desde 2006. Se han realizado cálculos detallados de la fisuración inducida en el hormigón y sus efectos sobre las frecuencias de resonancia de la torre, que los datos de la instrumentación hace posible contrastar. Como resultado se concluye en primer lugar que los modelos permiten predecir la respuesta e interpretar las observaciones; y que una torre de hormigón armado bien proyectada no tiene por qué experimentar una migración de su frecuencia fundamental hacia la de la excitación que resulte en amplificaciones preocupantes de la respuesta.*

1. INTRODUCCIÓN

Los últimos años han sido testigos de un fuerte desarrollo de la generación eólica en España y, como consecuencia, han generado una tendencia hacia mayores alturas de fuste, diámetros de rotor y potencias de generación. Casi todos los aerogeneradores instalados se apoyan en fustes metálicos, que se fabrican en taller en tres tramos, se transportan al emplazamiento y se ensamblan en la ubicación definitiva. Pero a partir de cierto tamaño, esto deja de resultar viable pues los diámetros y longitudes de las piezas entran en conflicto con las limitaciones del transporte de superficie. Aunque el fuste metálico podría descomponerse en más piezas, la fiabilidad y durabilidad se comprometen al crecer el número de conexiones.

Una alternativa es abandonar el acero y emplear hormigón, prefabricado o in-situ, para construir todo o parte del fuste, hormigón que puede simplemente armarse o también pretensarse. Hay cierta tendencia a desconfiar del hormigón armado, en base a que su fisuración progresiva podría degradar la rigidez, acercando así la frecuencia propia de la torre a la de giro del rotor y aumentando con ello la amplificación dinámica de la respuesta a las sollicitaciones cíclicas.

Esteyco desarrolló varios proyectos de torres de diversas alturas, constituidas por dovelas

prefabricadas de hormigón, armadas y sin ningún tipo de pretensado. El presente artículo se centra en una torre de 80 m que soporta un aerogenerador AW-77 de 1,5 MW. Un prototipo de esta torre se construyó en Aibar (Navarra), se instrumentó y fue sometido a un ensayo de carga que produjo momentos en la base equivalentes al 80% del máximo de proyecto. El aerogenerador se mantiene en operación, con la instrumentación activa, lo que permite investigar los efectos de haber sufrido una carga tan elevada. Tres años tras el ensayo, es ya poco probable que la torre depare sorpresas.

Conviene notar que las torres de hormigón no son infrecuentes, especialmente para alturas elevadas. Por ejemplo, Enercon ha desarrollado torres de 135 m con aerogeneradores de 6 MW y GE Wind Energy ha construido torres de 100 m de los que los 70 m inferiores son de hormigón [1], etc.; también se han publicado orientaciones para el diseño de las torres de hormigón por parte de la Germanischer Lloyd Wind Energy [2] y otras instancias [3]. Sin embargo, toda esta información se refiere a torres pretensadas, dejando el hormigón armado sólo para las cimentaciones. En este sentido, las torres proyectadas por Esteyco deben considerarse novedosas.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TORRE

Como se dijo, se trata de una torre de hormigón armado, construida con elementos prefabricados. En altura, la torre se divide en 4 tramos, con diámetros que decrecen desde 6,3 m en la base a 2,7 m a la altura de 78,2 m. Los tramos se transportan divididos en 2–4 sectores en función del diámetro (Figura 1). El hormigón es C50/60 con resistencias características a compresión $f_{ck} = 50$ MPa y a tracción $f_{ct,k} = 5,33$ MPa; las armaduras son de acero S500 con un límite elástico $f_{yk} = 500$ MPa. La zapata de cimentación se apoya en un terreno rocoso, compuesto por una combinación variable de argilitas y areniscas, con rigidez y resistencia elevadas. La Figura 2 muestra una foto del prototipo construido en Aibar.

Si la rigidez de la torre disminuyera debido a la fisuración, su frecuencia natural se vería lógicamente afectada. El efecto es anisótropo, pues depende de las orientaciones en que se haya producido fisuración y de que las cargas aplicadas sean o no suficientes para descomprimir las fisuras creadas. Ya se comentó que la preocupación por la frecuencia de la torre proviene de que, al aproximarse a las frecuencias de la sollicitación, crece la amplificación dinámica de la respuesta. Las sollicitaciones se ejercen en dos frecuencias principales: la frecuencia P correspondiente al giro del rotor y la frecuencia 3P con que las palas pasan frente al fuste.

En el aerogenerador AW-77 la velocidad de giro del rotor varía con la velocidad del viento. Como muestra la Figura 3, el aerogenerador no opera con vientos por debajo de 3 m/s; a partir de esta velocidad el rotor gira a 11,6 rpm, velocidad que se mantiene hasta que el viento alcanza los 5 m/s. A partir de 9 m/s, la velocidad de giro es 16,7 rpm. Para velocidades entre 5 y 9 m/s, la velocidad de giro crece linealmente con la velocidad del viento.

Las máximas sollicitaciones estáticas contempladas en el proyecto de la torre, expresadas en términos del momento flector en la base, fueron:

- a) En operación, con vientos inferiores a 25 m/s, carga sostenida de 10 MNm y pico de

carga de 20 MNm

b) En parada, con vientos superiores a 25 m/s, carga máxima de 40 MNm

Entre las cargas dinámicas pueden citarse la acción sísmica, que no es la dominante en esta estructura, y las asociadas a la variabilidad y turbulencia del viento, que tampoco son aquí objeto de estudio. El interés se centra en las sollicitaciones con frecuencias P y 3P, frecuencias que como se ha mencionado varían en función de la velocidad del viento.

3. ENSAYO DE CARGA Y DATOS DE AUSCULTACIÓN

Para observar los efectos de la fisuración en el comportamiento de la torre, se optó por generar la fisuración aplicando cargas elevadas a la cabecera de la torre por medio de un cable. En el ensayo, realizado el 6 de octubre de 2006, se impusieron fuerzas hasta 550 kN, correspondientes a momentos de 30 MNm en la base de la torre; alcanzado este valor se disminuyó la fuerza hasta cero, tras lo que se llevó a cabo una recarga a 367 kN y una descarga final.

La Figura 4 muestra las fuerzas aplicadas y los desplazamientos en la cabeza de la torre. La pendiente de la relación fuerza-desplazamiento evidencia la pérdida de rigidez experimentada por las secciones de hormigón armado a medida que progresa la fisuración inducida por las cargas.

La torre se instrumentó con diversos sensores, que registran movimientos y esfuerzos en puntos relevantes de la estructura; la Figura 5 muestra la ubicación en planta de algunos de ellos. También se tomaban otros datos, como la velocidad y dirección del viento y la velocidad de giro del rotor. La frecuencia de muestreo era 50 Hz, lo que da una resolución temporal de 0,02 s.

Las investigaciones iniciales se basaron en 25 series de datos, cada una de 10 minutos, obtenidas en diversos momentos entre los días 11 de agosto y 24 de octubre de 2006. De las 25 series, 11 preceden al ensayo de carga y las otras 14 son posteriores. La Tabla 1 presenta las fechas y horas de estos registros, así como los valores medios de la velocidad y orientación del viento y la velocidad de giro del rotor durante los 10 minutos de duración del registro.

Para determinar la frecuencia natural de la torre se obtuvieron los espectros de Fourier de todas las secuencias temporales disponibles. Debido a que la velocidad del rotor depende de la velocidad del viento, las frecuencias P y 3P varían sobre los rangos indicados en la Tabla 2. Los espectros reflejarán las características frecuenciales de la excitación junto con las intrínsecas de la torre.

Se generó un modelo de elementos finitos de la torre (Figura 6) para analizar su comportamiento con el programa ABAQUS [4]. Los dos primeros modos de vibración de la torre sin fisurar aparecen en la Figura 7.

Los resultados del análisis de Fourier se resumen en la Tabla 3, que indica las frecuencias a las que aparece el pico espectral en el rango 0,4-0,6 Hz en cada serie de datos. Los sensores seleccionados para preparar la tabla son los tres situados en la base de la torre y los tres situados en la primera junta. Los primeros indican los momentos máximos, mientras los segundos permiten confirmar el modo de vibración que se trata.

Las dos últimas columnas listan las frecuencias de vibración observadas en base a sensores especialmente sensibles a oscilaciones N-S y E-O respectivamente. Cuando no figuran datos, significa que la combinación de los picos espectrales asociados a la excitación 3P (del orden de 0,58 Hz para bajas velocidades de viento) y la frecuencia natural de la torre (unos 0,52 Hz cuando está sin fisurar o las demandas son pequeñas) no son distinguibles como para extraer conclusiones. La línea horizontal gruesa indica la prueba de carga, que produjo las máximas tracciones en la generatriz orientada 281° respecto al norte. La tabla indica que:

- a) Para velocidades de viento bajas, con independencia de su orientación, la frecuencia natural de la torre se mantiene en el rango 0,50-0,52 Hz, ya que las cargas de viento no bastan para descomprimir las fisuras existentes.
- b) Para velocidades de viento altas, con viento de una dirección lejana a 281°, se nota cierta pérdida de rigidez de la torre: por ejemplo, las series de los días 12/10 y 17/10 indican frecuencias de 0,47-0,49 Hz, que representan una disminución del 5-6%.
- c) Para velocidades de viento altas y orientación próxima a 281°, la carga estática del viento abre las fisuras causadas por el ensayo y las oscilaciones respecto a esta situación activan el módulo tangente. Es el caso de las dos series del día 11/10, que muestran frecuencias de 0,42-0,43 Hz en los sensores especialmente sensibles a las vibraciones E-O, aunque el efecto no es perceptible en los sensibles a las oscilaciones N-S.

Las dos últimas series se caracterizan por tener una velocidad de viento intermedia, pero orientada en la dirección más desfavorable respecto a la fisuración; las frecuencias resultan ser intermedias entre las anteriores, confirmando así las explicaciones precedentes. Por otra parte, las frecuencias más bajas detectadas son coherentes con los resultados del ensayo de carga. La Figura 8 muestra la rigidez correspondiente a una frecuencia de 0,42 Hz dibujada sobre el ciclo de recarga experimental.

En la simulación del ensayo de carga se ha considerado el modelo de hormigón con plasticidad y daño continuo disponible en ABAQUS. Se trata de un modelo de plasticidad tanto a tracción como a compresión, combinado con un modelo de daño continuo isótropo con una variable de daño a tracción y otra a compresión.

La simulación produjo la relación fuerza-desplazamiento que aparece en la Figura 9, que se ajusta muy razonablemente a las medidas experimentales. Ese mismo modelo permite obtener la frecuencia propia de la torre en distintos estados de carga. Esto es representativo de la frecuencia propia de la torre “intacta”, es decir, cuando no ha conocido fuerzas mayores en esa dirección y por tanto la fisuración que tiene es la correspondiente al estado de carga actual. La Figura 10 muestra el deterioro progresivo de la frecuencia en función del tamaño de las cargas aplicadas, cuantificadas a través del momento en la base de la torre.

A efectos de verificación, en la Figura 11 se comparan las ramas noales frecuencia-momento en la base obtenidas con el modelo anteriormente descrito y con un modelo de vigas independiente que también incorpora las armaduras y el comportamiento inelástico del hormigón.

4. IMPLICACIONES PARA LA OPERACIÓN

4.1. Torre sin fisurar

Las torres que no han sufrido aún cargas de viento elevadas y no están fisuradas mantienen su rigidez y frecuencia de oscilación originales. La primera frecuencia es de unos 0,52 Hz y, tratándose esencialmente de una ménsula, la del segundo modo es muy superior. La amplificación dinámica depende de la proximidad entre las frecuencias de excitación y natural de la torre, y del amortiguamiento.

Para una torre sin fisurar, la máxima amplificación dinámica será la que acompañe a las velocidades de giro más bajas. Cuando el viento sopla con velocidades de 3-5 m/s, el rotor gira a 11,6 rpm y la frecuencia de paso de las palas es 0,58 Hz. En ausencia de amortiguamiento, la respuesta dinámica a cargas oscilatorias con esa frecuencia es 4,1 veces la respuesta estática.

El amortiguamiento depende del nivel de esfuerzos generados. Si son pequeños, también lo es el amortiguamiento; pero el caso es de poco interés pues no amenaza la integridad de la torre. Si los esfuerzos llegaran a ser grandes, entonces el amortiguamiento esperable sería del orden del 5-7% del crítico; en esa situación el factor de amplificación sería de 3,8.

4.2. Torre fisurada

La aplicación de fuerzas a la torre suficientes para llegar a momentos flectores de 30 MNm en su base produce fisuración del hormigón en varias zonas de la torre. Las fisuras tienen poco efecto en la rigidez mientras se mantengan comprimidas; pero si llegan a descomprimirse, las perturbaciones ocurrirán con rigidez menor, lo que se manifestará en las frecuencias de vibración.

La descompresión de las fisuras requiere que la fuerza impuesta por el viento sea suficientemente grande para compensar la compresión producida por el peso; además, si la fisuración no es isótropa (como en el caso del ensayo de carga), la fuerza debe estar adecuadamente orientada para abrir las fisuras preexistentes.

Los efectos anteriores se resumen en la Figura 12 que presenta una vez más las frecuencias para una torre intacta, ahora con una segunda curva que corresponde a una torre que tras sufrir demandas de 30 MNm se ve solicitada en esa misma dirección. La curva correspondiente a la torre intacta indica la degradación de la frecuencia si, para que haya fisuras, la fuerza aplicada debe ser capaz de crearlas; la otra curva representa el caso en que la fuerza sólo necesita descomprimir las fisuras previamente creadas, en este caso para las demandas de 30 MNm.

Para direcciones de la fuerza no coincidentes con la que produjo la fisuración previa, pueden esperarse efectos intermedios entre las dos curvas de la figura. Y si el ángulo excede de 90°, la fisuración previa no jugaría ningún papel ya que la fuerza aplicada no produciría tracciones en las fisuras preexistentes.

La figura se centraba en el caso de la fuerza correspondiente a un momento de 30 MNm pues ésta era la impuesta en el ensayo real. Para otros niveles de fisuración previa, las curvas serían las que se presentan en la Figura 13. Al empezar a descomprimirse las fisuras existentes, la

frecuencia comienza a diferir de la de la torre intacta, cuya curva se recuperaría cuando las demandas aplicadas vuelvan a superar las que crearon la fisuración preexistente.

Como confirmación, la Figura 14 muestra datos de frecuencias correspondientes a series temporales registradas a lo largo de los tres años transcurridos desde el ensayo de carga. Puede verse que la situación se mantiene estable y que hay muy buena consistencia entre los resultados teóricos propuestos y las medidas experimentales.

4.3. Amplificación de la respuesta

Ya se ha mencionado anteriormente que el tamaño de las demandas es lo que puede producir problemas en la torre. La proximidad de frecuencias influye en la amplificación dinámica de los efectos de las cargas cíclicas, que es por lo que resulta de interés conocer la posible evolución de la frecuencia de la torre.

La amplificación dinámica aparece en la Figura 15. Se toma como frecuencia de la excitación los 0,28 Hz correspondientes a la frecuencia P para velocidades de viento elevadas. La figura contiene dos curvas, correspondientes a distintas fracciones de amortiguamiento. El valor más razonable de este parámetro estaría en el orden del 6%; aunque evidentemente son posibles amortiguamientos más bajos, no lo serían en el rango en que los efectos pueden ser preocupantes, sino para demandas muy inferiores. En cualquier caso puede verse que las curvas se diferencian poco en el rango de frecuencias de interés.

La torre amplifica los efectos de las cargas cíclicas ejercidas con frecuencia P (respecto a la respuesta estática) por un factor de 1,41, asociado a la proximidad entre la frecuencia de la excitación P (0,28 Hz) y la natural de la torre intacta (0,52 Hz). Para una torre con la fisuración generada por la carga que produce un momento de 30 MNm en la base, la amplificación dinámica de los efectos puede crecer hasta 1,80, este es el factor asociado a la proximidad entre la frecuencia P y la natural de una torre que ya sufrió demandas de 30 MNm en la misma dirección (0,42 Hz). Es claro que ese orden de amplificaciones, experimentadas únicamente por la carga cíclica aplicada con frecuencia P, son de importancia muy limitada.

5. CONCLUSIONES

Se ha analizado el comportamiento dinámico de una torre prefabricada de hormigón armado de 80 m de altura. Para ello se han utilizado modelos de elementos finitos, así como la información generada por el prototipo construido y actualmente en operación en Aibar (Navarra); esta información incluye tanto registros dinámicos producidos por los sensores instalados en la torre como las observaciones producidas en una prueba de carga. De todo ello se desprende:

- a) La existencia de fisuras abiertas durante procesos de carga cíclica afecta a la rigidez y frecuencia propia de la torre. Si no hay fisuras o permanecen comprimidas mientras se aplican las cargas, el efecto anterior apenas será perceptible. La metodologías aquí empleadas han resultado adecuadas para cuantificar esos efectos.
- b) La torre prototipo mantuvo prácticamente inalterada su frecuencia de vibración hasta la prueba de carga, frecuencia que ha seguido manteniéndose después si las demandas son

pequeñas o si, siendo mayores, su tamaño y orientación es tal que no llegan a descomprimirse las fisuras existentes. Los máximos efectos se perciben cuando las demandas son grandes y su orientación coincide con la de la prueba de carga, en cuyo caso la frecuencia puede bajar hasta 0,42-0,43 Hz.

- c) La amplificación dinámica de la respuesta en condiciones pésimas (con frecuencia de 0,42 Hz) no pasa de 1,8. Dado que la carga máxima sostenida en operación produce 10 MNm en la base y que la torre está diseñada para 40 MNm, esa amplificación sería asumible incluso si actuara sobre las demandas sostenidas, no sólo sobre las cíclicas.
- d) Para empezar a degradar la frecuencia natural de la torre intacta, las cargas deben producir momentos en la base superiores a 20 MNm; con este nivel de cargas, sólo esperable para los máximos picos en operación, la torre empieza a fisurarse. Una vez fisurada la torre, la frecuencia comenzaría a deteriorarse con 6 MNm, al empezar a descomprimirse las fisuras creadas.

REFERENCIAS

- [1] M. Seidel (2003) “*Experiences with Two of the World’s Largest Wind Turbine Towers*”, 2003 EWEC European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, 16-19 junio.
- [2] M. Klose (sin fecha) “*Design of Concrete Structures for Offshore Wind Turbines*”, artículo disponible de Risø National Laboratory, Wind Energy Department, Technical University of Denmark.
- [3] A.N. Singh (2007) “*Concrete Construction for Wind Energy Towers*”, The Indian Concrete Journal, agosto, pp. 43-49.
- [4] Abaqus Inc. (2006) “*ABAQUS/Standard User’s Manual, Version 6.6-3*”, Rhode Island.

Caso	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Velocidad del rotor (rpm)
11.08.2006-04:30	19,0	13	16,7
14.08.2006-15:50	4,2	9	13,2
17.08.2006-02:00	4,6	280	13,0
17.08.2006-19:30	4,9	269	13,4
10.09.2006-18:40	3,9	195	11,6
11.09.2006-07:40	3,4	193	11,7
17.09.2006-15:30	5,2	9	12,0
22.09.2006-04:10	20,4	202	16,6
22.09.2006-04:20	20,0	195	16,7
03.10.2006-06:20	15,2	251	16,6
03.10.2006-06:30	14,7	256	16,6
07.10.2006-10:30	5,0	319	11,7
07.10.2006-12:20	5,3	318	11,7
07.10.2006-21:30	7,7	10	14,8
07.10.2006-21:40	7,9	12	15,0
08.10.2006-19:40	3,4	179	11,6
09.10.2006-13:20	5,4	190	11,8
11.10.2006-17:20	15,6	295	15,3
11.10.2006-17:50	17,5	311	16,6
12.10.2006-11:10	15,7	10	16,6
12.10.2006-17:20	16,7	16	16,7
17.10.2006-14:10	12,7	153	16,7
17.10.2006-15:30	12,9	153	16,6
24.10.2006-03:20	9,9	272	16,5
24.10.2006-03:30	10,0	266	16,6

Tabla 1 Secuencias de datos consideradas

Velocidad del viento (m/s)	Giro del rotor (rpm)	Frecuencia P de giro (Hz)	Frecuencia 3P de paso de palas (Hz)
3-5	11,6	0,19	0,58
5-9	11,6-16,7	0,19-0,28	0,58-0,83
9-25	16,7	0,28	0,83

Tabla 2 Frecuencias de excitación en función del viento

Caso	Veloc. (m/s)	Dir. (°)	Revol. (rpm)	Frec. de excit. (Hz)		Frec. inferidas (Hz)	
				P	3P	N-S	E-O
11.08.2006-04:30	19,0	13	16,7	0,28	0,83	0,52	0,50
14.08.2006-15:50	4,2	9	13,2	0,22	0,66	0,53	0,51
17.08.2006-02:00	4,6	280	13,0	0,2	0,65	-	0,53
17.08.2006-19:30	4,9	269	13,4	0,22	0,67	-	0,52
10.09.2006-18:40	3,9	195	11,6	0,19	0,58	-	-
11.09.2006-07:40	3,4	193	11,7	0,19	0,58	-	-
17.09.2006-15:30	5,2	9	12,0	0,20	0,60	-	0,52
22.09.2006-04:10	20,4	202	16,6	0,28	0,83	0,51	0,51
22.09.2006-04:20	20,0	195	16,7	0,28	0,83	0,51	0,51
03.10.2006-06:20	15,2	251	16,6	0,28	0,83	0,50	0,50
03.10.2006-06:30	14,7	256	16,6	0,28	0,83	0,51	0,50
07.10.2006-10:30	5,0	319	11,7	0,19	0,58	-	0,51
07.10.2006-12:20	5,3	318	11,7	0,19	0,58	0,51	-
07.10.2006-21:30	7,7	10	14,8	0,25	0,74	0,51	0,50
07.10.2006-21:40	7,9	12	15,0	0,25	0,75	0,51	0,49
08.10.2006-19:40	3,4	179	11,6	0,19	0,58	-	-
09.10.2006-13:20	5,4	190	11,8	0,20	0,59	-	0,51
11.10.2006-17:20	15,6	295	15,3	0,25	0,76	0,47	0,42
11.10.2006-17:50	17,5	311	16,6	0,28	0,83	0,47	0,43
12.10.2006-11:10	15,7	10	16,6	0,28	0,83	0,47	0,49
12.10.2006-17:20	16,7	16	16,7	0,28	0,83	0,47	0,47
17.10.2006-14:10	12,7	153	16,7	0,28	0,83	0,48	0,48
17.10.2006-15:30	12,9	153	16,6	0,28	0,83	0,49	0,49
24.10.2006-03:20	9,9	272	16,5	0,27	0,82	0,46	0,44
24.10.2006-03:30	10,0	266	17	0,28	0,83	0,48	0,46

Tabla 3 Frecuencias detectadas

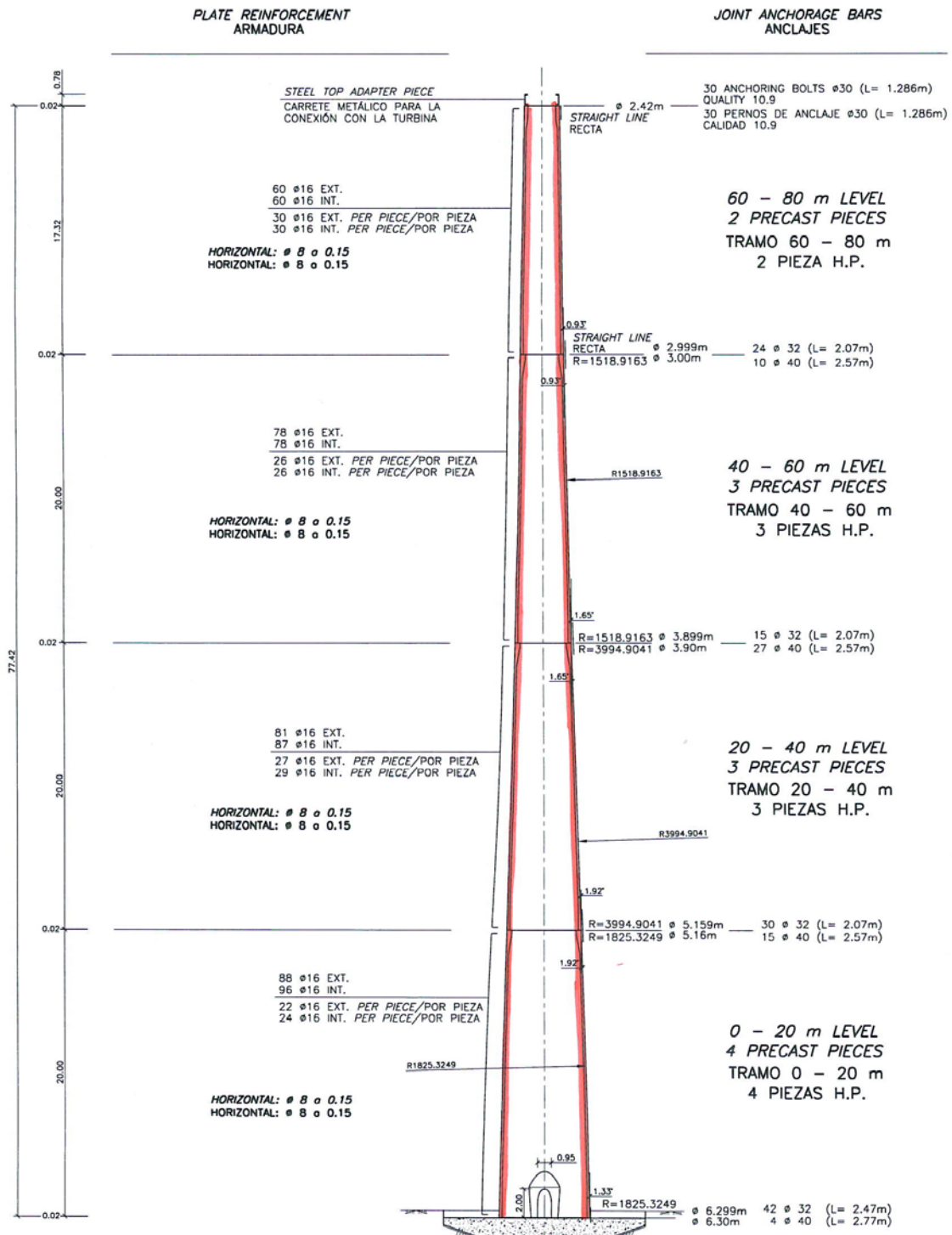


Figura 1 Esquema de la torre



Figura 2 Prototipo construido en Aibar

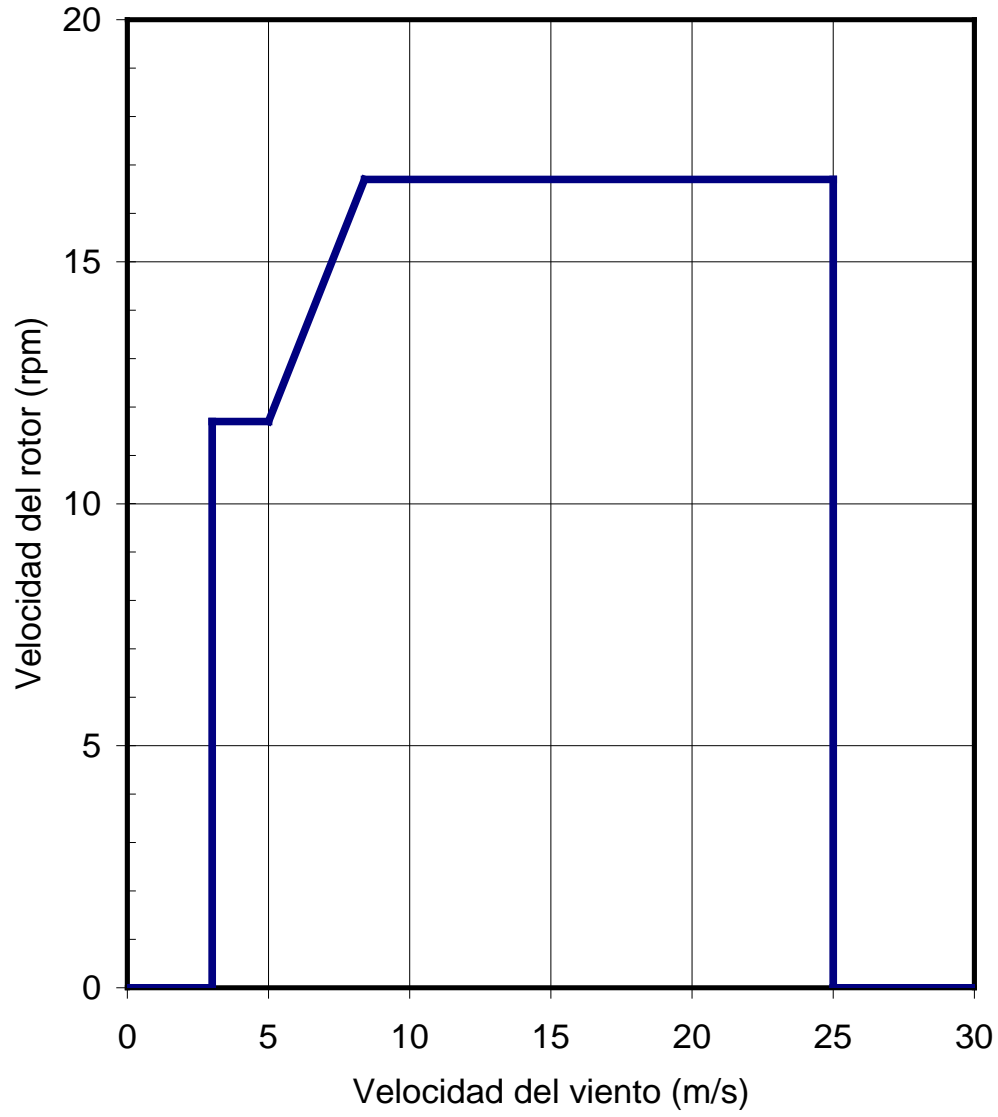


Figura 3 Revoluciones del rotor en función de la velocidad del viento

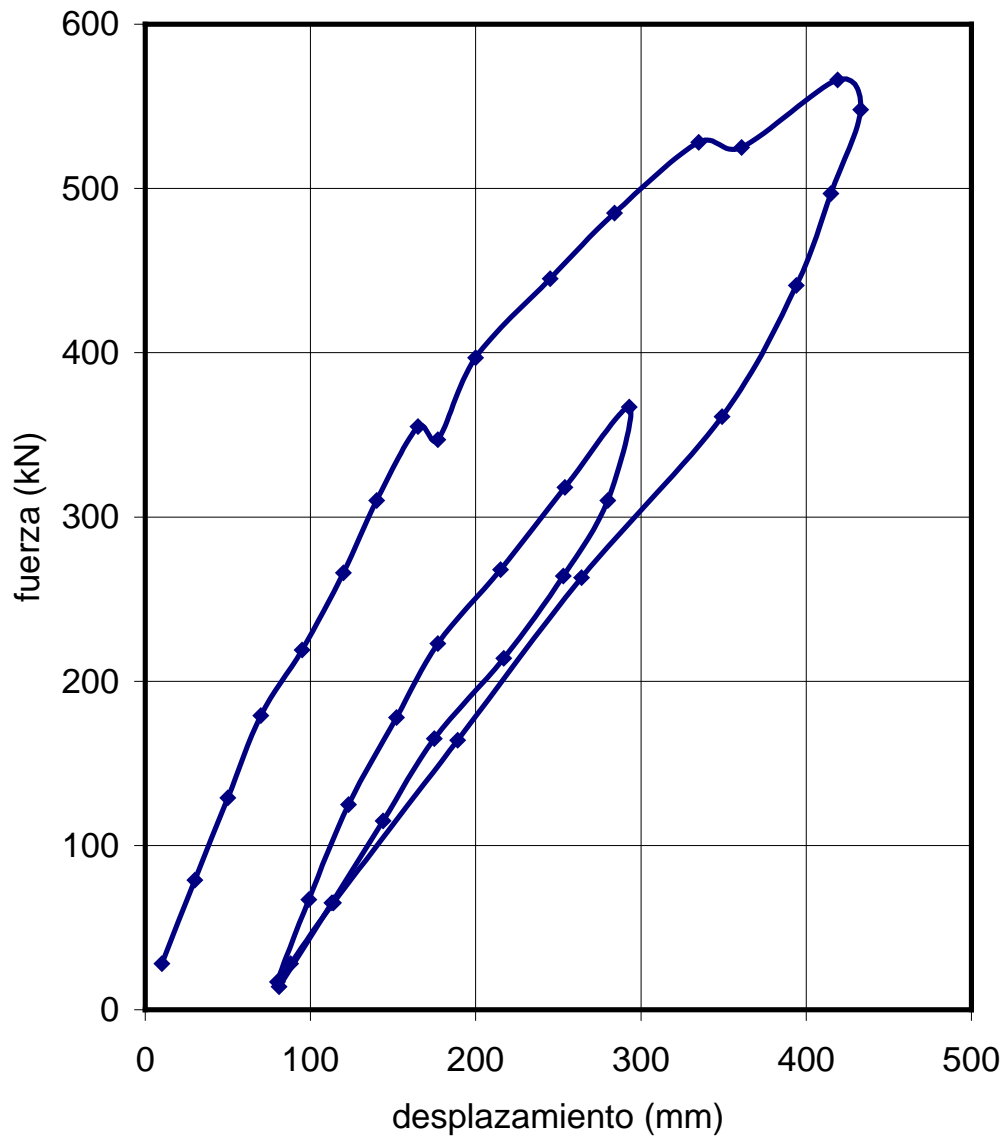
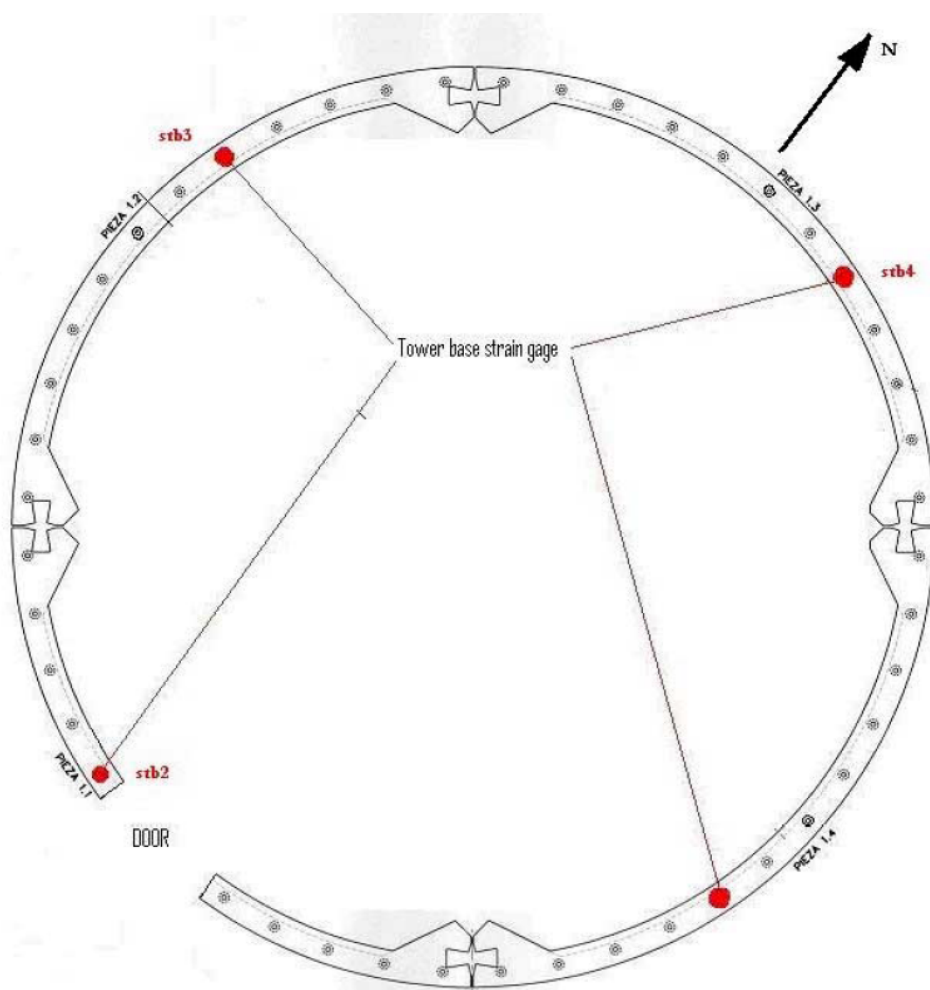


Figura 4 Fuerza-desplazamiento en el ensayo de carga



Strain Gage	Orientation
stb2	191.25°
stb3	281.25°
stb4	11.25°

Figura 5 Ubicación de la instrumentación

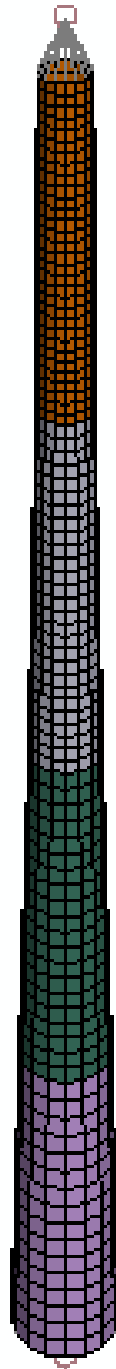
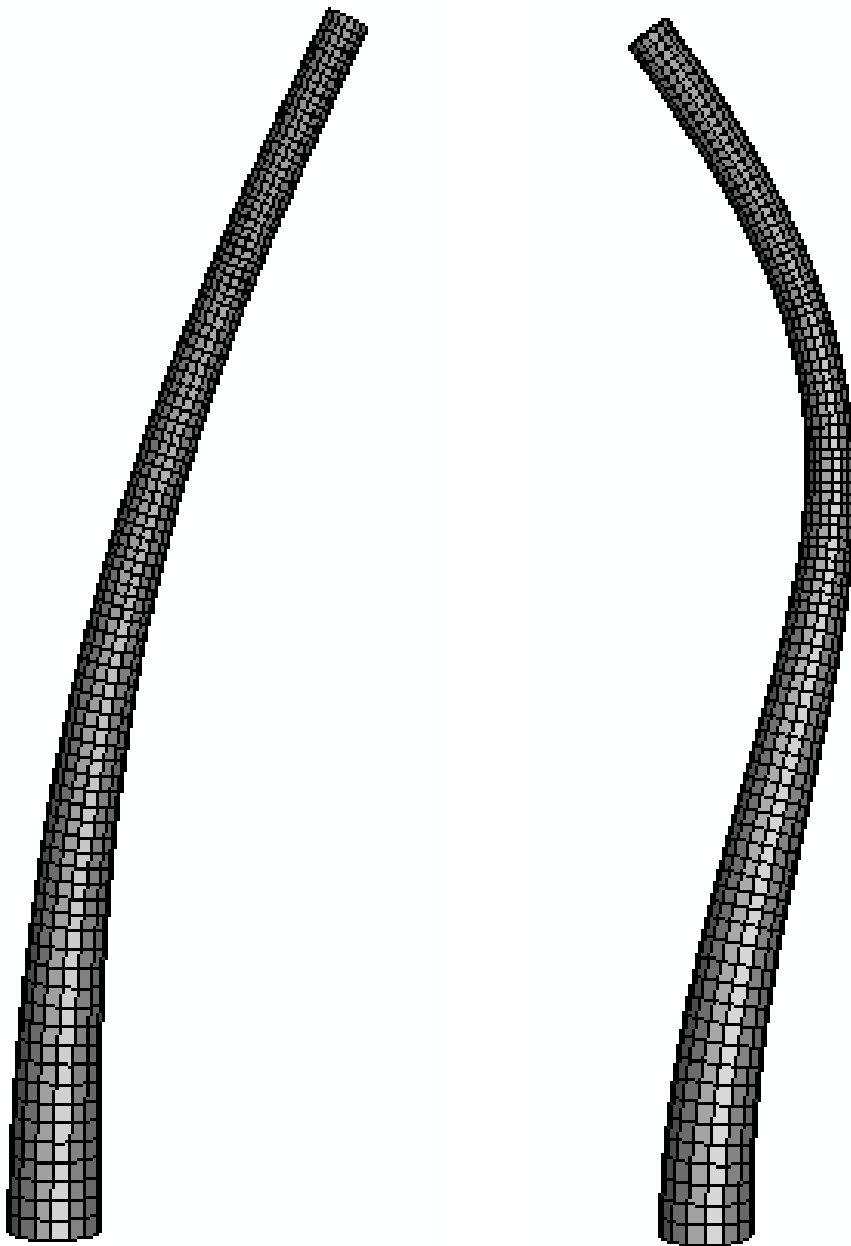


Figura 6 Modelo de la torre



Frecuencia 0,54 Hz

Frecuencia 2,53 Hz

Figura 7 Los dos primeros modos de la torre intacta

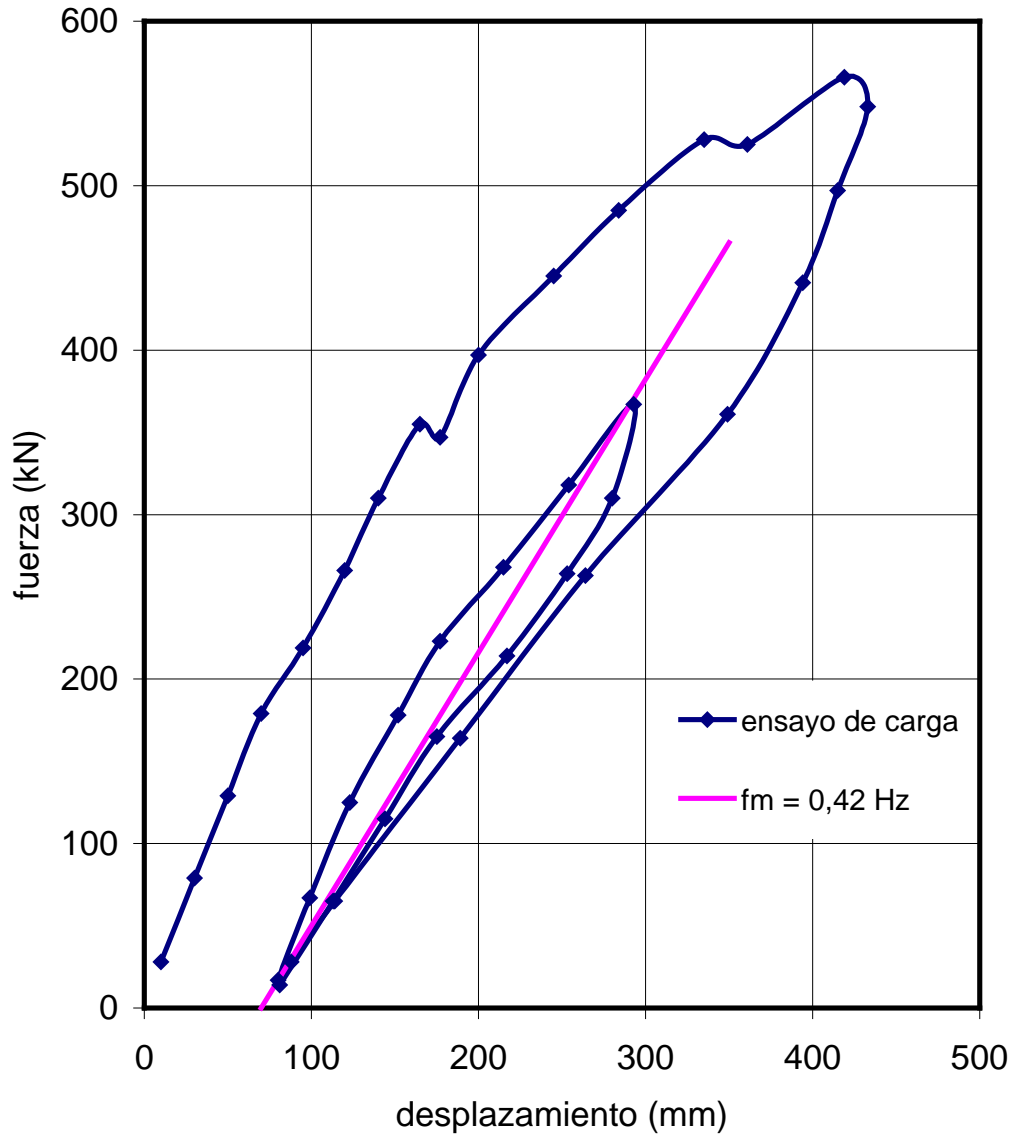


Figura 8 Rigidez equivalente para $f = 0,42$ Hz

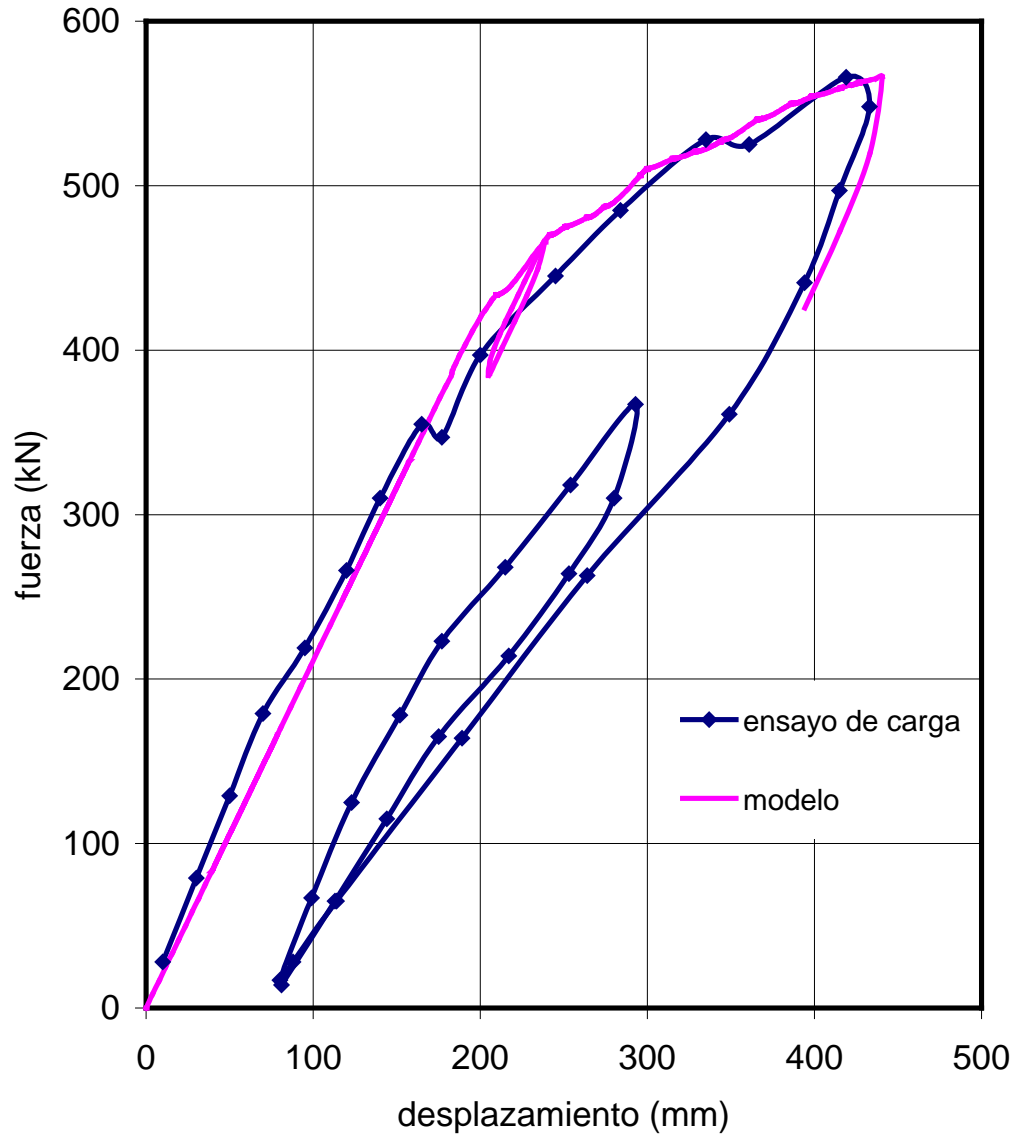


Figura 9 Fuerza-desplazamiento experimental y calculada

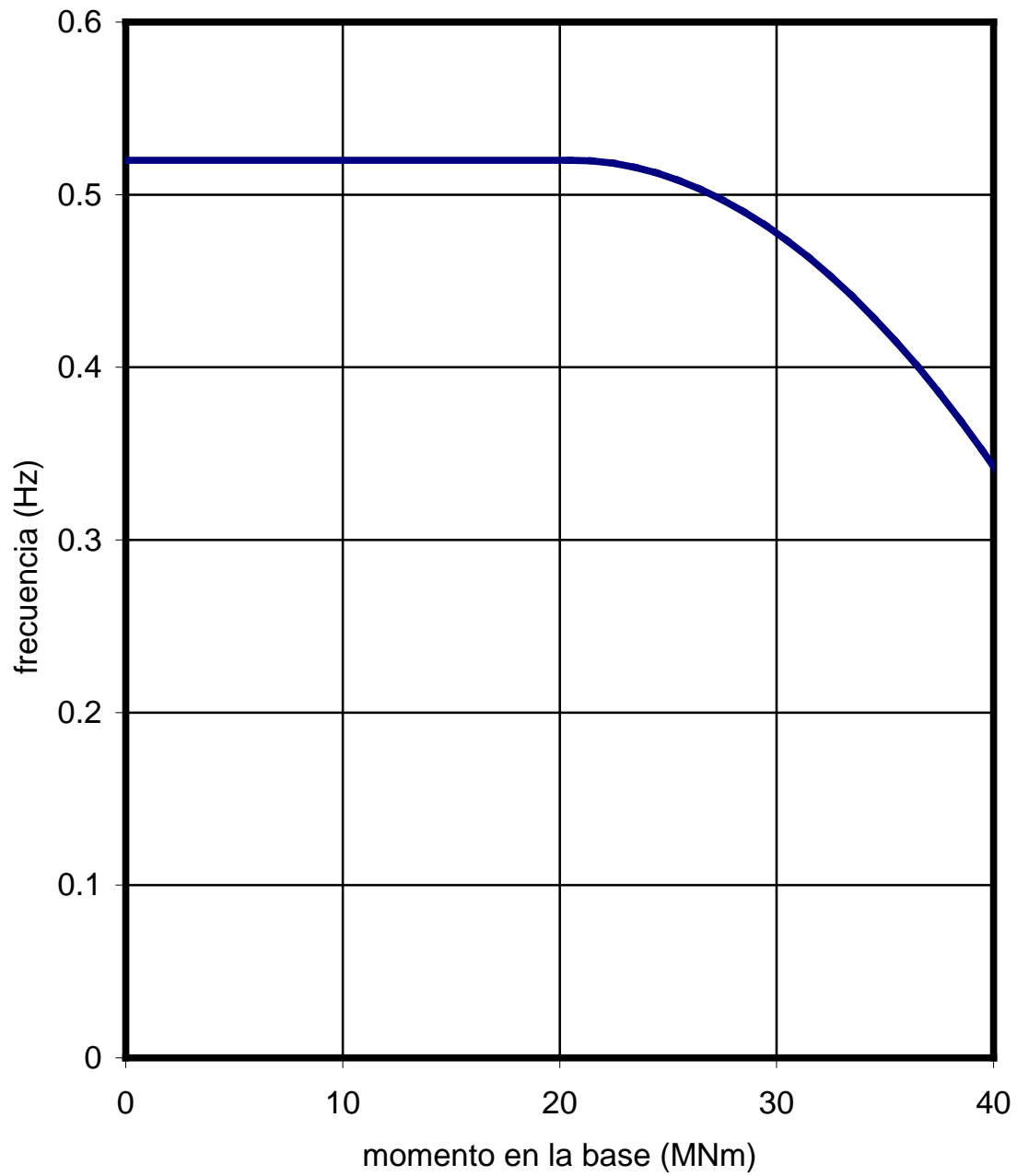


Figura 10 Disminución de la frecuencia al aumentar la carga en torre intacta

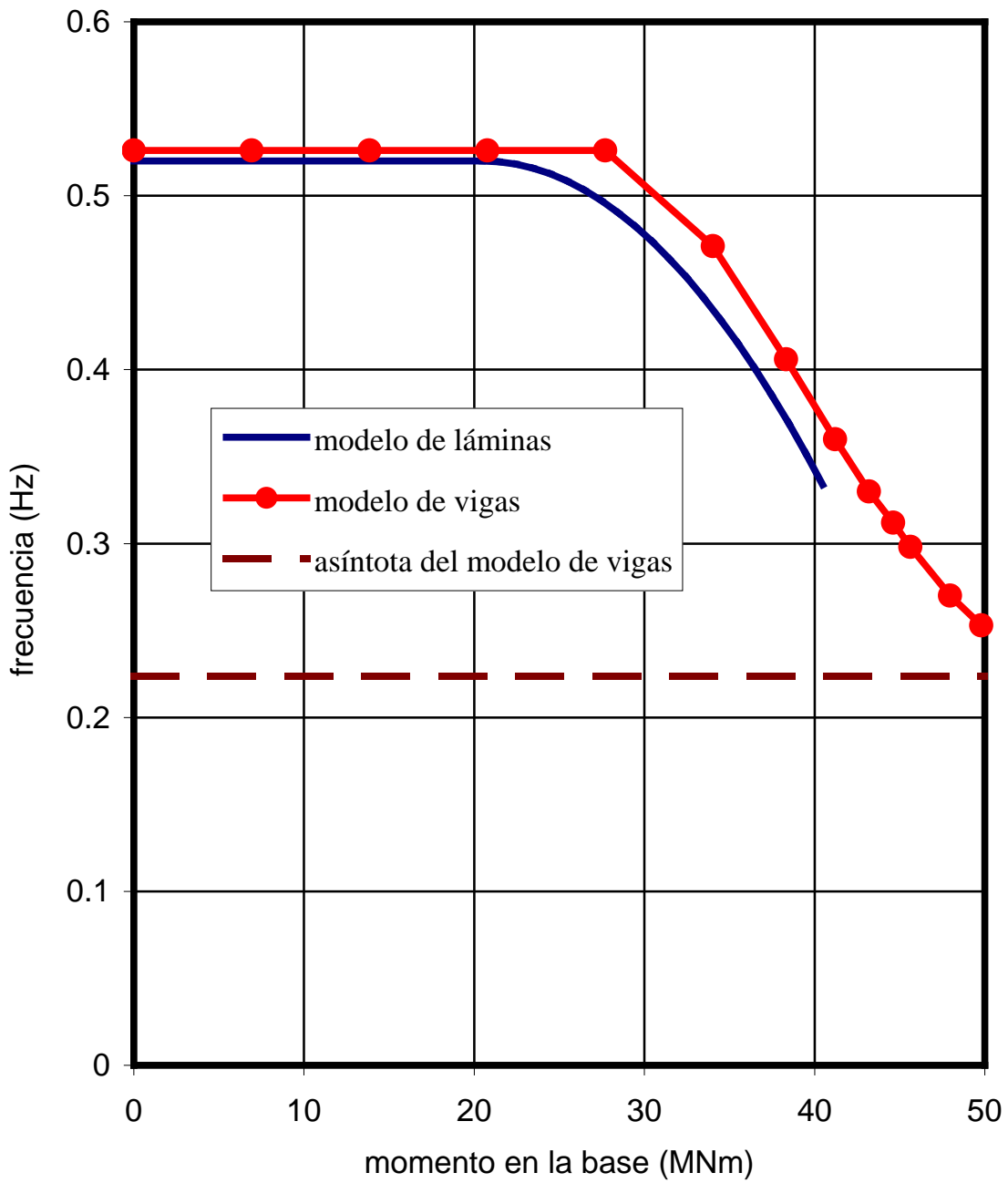


Figura 11 Comparación de modelos de láminas y de vigas

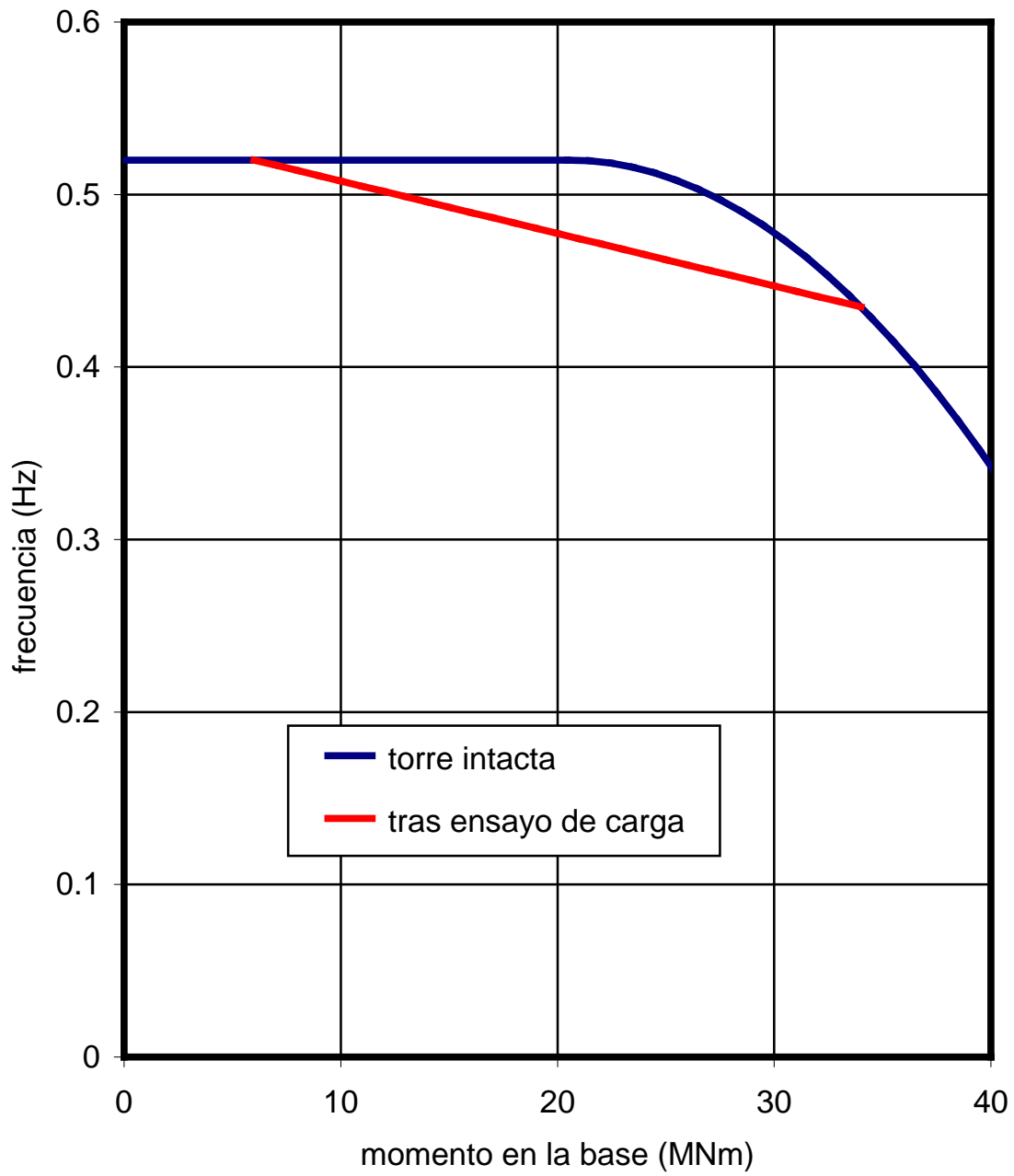


Figura 12 Frecuencias con y sin fisuración previa

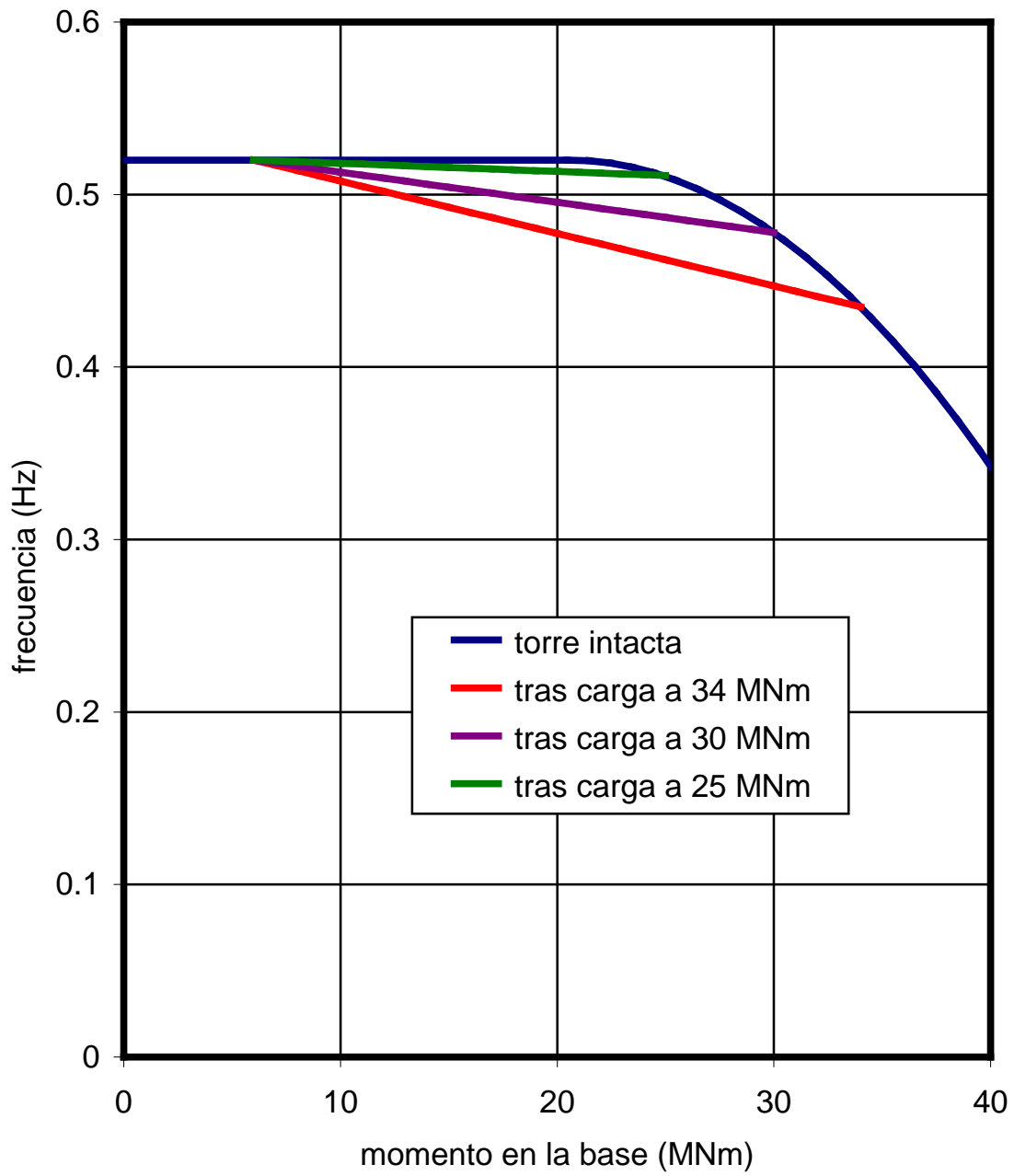


Figura 13 Frecuencias con distintos grados de fisuración

Figura 14 Frecuencias correspondientes a series temporales registradas

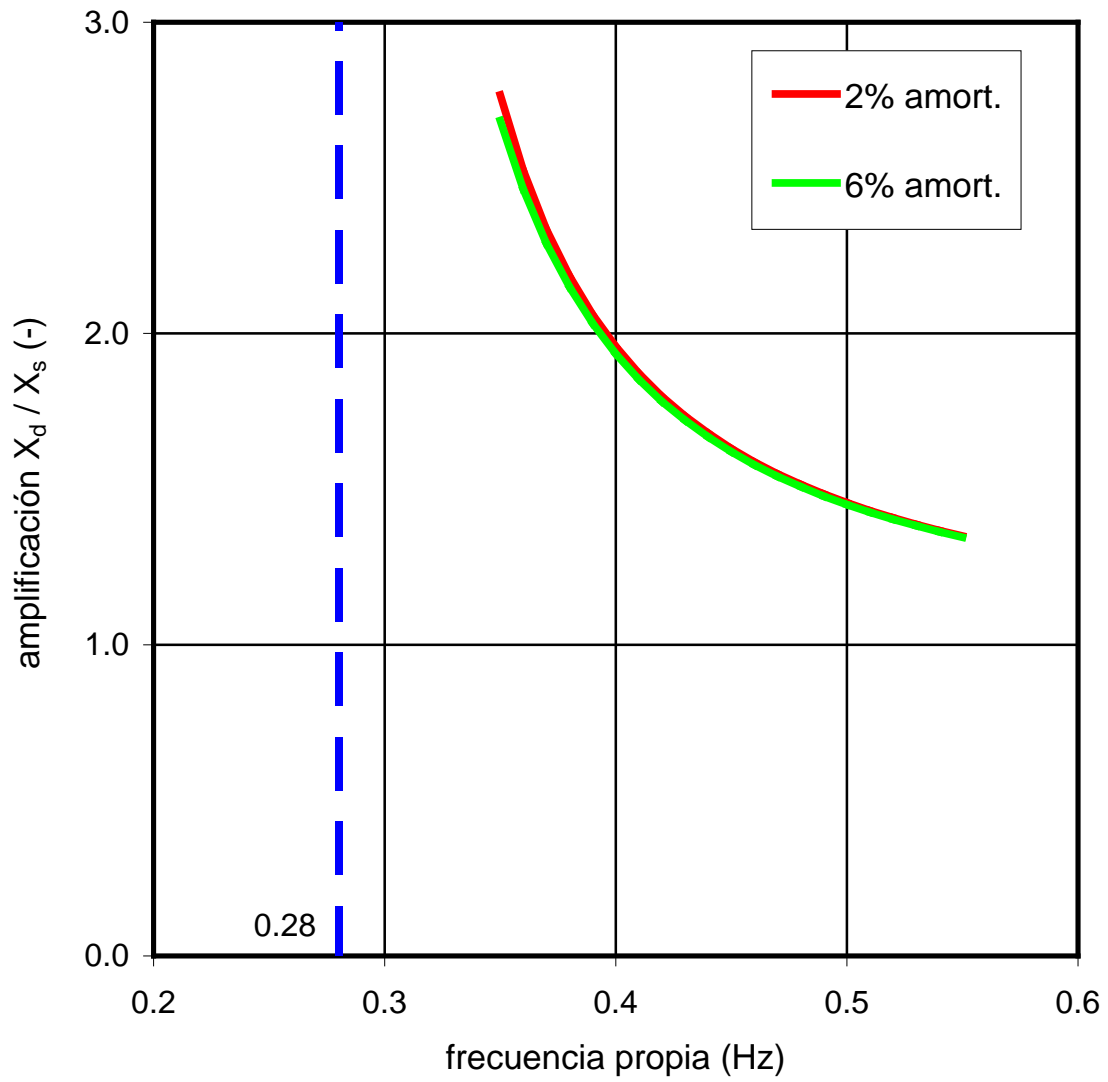


Figura 15 Amplificación de la carga cíclica en función de la frecuencia