

Modelo de elementos finitos y medidas experimentales para el análisis estructural y vibracional de una torre de refrigeración

Finite element model and experimental measurements for structural and vibrational analysis of a cooling tower

Jesús Otero Yugat Ph.D.^{1*}, Juan Carlos Rodríguez²

¹Centro de Ensayos y Análisis, Guipúzcoa, España

²Consultoría Técnica de Ingeniería, A Coruña, España

joteroyugat@gmail.com

Resumen— En el presente artículo se resume el estudio realizado sobre la torre de refrigeración de una central termoeléctrica a raíz de fisuras halladas tras una inspección de mantenimiento. A través de un análisis estructural y vibracional se han hallado las causas que han originado las lesiones en el sistema examinado. El estudio se ha llevado a cabo mediante un modelo de elementos finitos, alimentado con datos medidos de forma experimental, que permite calcular los modos propios de vibración y estimar la influencia de parámetros externos como el impacto del viento. Mediante el trabajo realizado se han diseñado metodologías de reparación destinadas al correcto funcionamiento de la torre de refrigeración.

Palabras clave— Análisis estructural y vibracional, impacto del viento, modelo de elementos finitos, modos propios de vibración.

Abstract— The present paper summarizes the study of a cooling tower from a thermal power station following fissures found after a maintenance inspection. Through structural and vibrational analysis causes of damage on the evaluated system have been determined. The study has been done by means of a finite element model, fed with experimentally measured data, in order to calculate modes of vibration and to estimate the influence of external parameters such as wind impact. Through this work repair methodologies aimed to the proper functioning of the cooling tower have been designed.

Key Word — Finite element model, modes of vibration, structural and vibrational analysis, wind impact.

I. INTRODUCCIÓN.

Una central termoeléctrica emplea la combustión de carbón, gas natural o fuelóleo para generar energía eléctrica. Uno de sus elementos más importantes y comunes es la torre de refrigeración, mediante la cual es posible disminuir la temperatura del agua de enfriamiento empleada en la central. Desde el punto de vista estructural, una torre de refrigeración está sometida a constantes efectos dinámicos y térmicos que pueden acelerar su deterioro y conllevar al apareamiento de

daños y patologías que, con el paso del tiempo, pueden ser de carácter irreversible.

Tal es el caso de la torre de refrigeración objeto del presente estudio. El apareamiento de fisuras y grietas en su estructura justifica la necesidad de conocer el origen de las mismas y para ello, se ha realizado una evaluación mediante un análisis vibracional y estructural, teniendo en cuenta información determinada y registrada experimentalmente.

El análisis ha empleado el método de elementos finitos como fundamento para la modelización del sistema. El empleo de esta técnica en torres de refrigeración ha sido ampliamente aceptado en los últimos años, tal como lo atestiguan algunos autores [1, 2].

I.1. Descripción de la torre de refrigeración examinada y antecedentes.

La torre sobre la cual se han hallado fisuras e indicio de roturas, está formada por una cimentación constituida por 44 parejas de pilares colocados circunferencialmente, que soportan una jácena inferior de reparto y una lámina de hormigón armado de revolución. En la parte superior se dispone de una jácena circunferencial. Además, la torre de refrigeración se encuentra en un terreno llano, cercano a una mina donde se producen voladuras de gran amplitud.

En cuanto al estado del arte de la torre, en orden cronológico se han reportado las siguientes incidencias:

- La torre entra en funcionamiento en Abril de 1975, según proyecto de estructura de Octubre de 1972.
- En el año 1996 se efectuaron trabajos de reparación de la torre tanto en su interior como en su exterior, que consistieron en resolver problemas de durabilidad, eliminar zonas de hormigón sueltas, colocar un mortero hidráulico e instalar una protección exterior con revestimiento acrílico e interior con revestimiento de epoxi.

- En el año 2010 se hace un diagnóstico del estado de la torre, comprobando que se desprenden trozos de hormigón en especial en la cara próxima a la salida.
- En el año 2011 se constata la presencia de una grieta de 50 m de longitud en la zona anteriormente indicada, y se decide hacer un seguimiento.
- A principios del año 2012 se verifica la evolución de la fisura y el comienzo de una nueva grieta en la cara opuesta. Por tanto, se recomienda actuar urgentemente.

La grieta principal se encuentra en la cara sur de la torre (160°), con una separación máxima entre labios de 14 cm. La rotura da lugar a un hundimiento general del paño en al menos seis nervios verticales y se sitúa a 70 m de altura. En la Figura 1 se ilustra una fotografía con la ubicación de esta grieta.

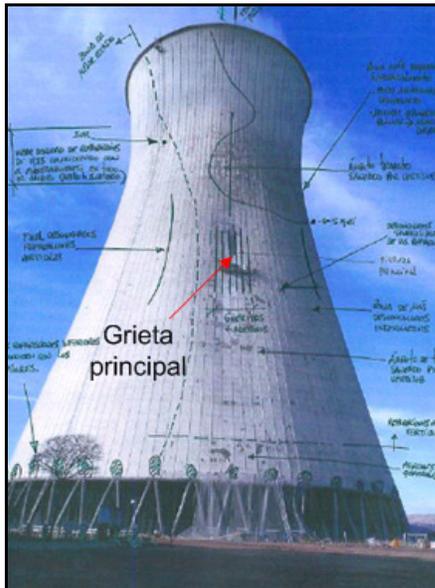


Figura 1. Fotografía de la torre de refrigeración e identificación de la grieta o fisura principal.

La nueva grieta se sitúa al noroeste de la torre (285°) y tiene un desarrollo vertical de 19 m y en horizontal de 7,2 m. La situación en altura es similar a la de la fisura principal.

II. MODELO DE ANÁLISIS.

Teniendo en cuenta los antecedentes previos, por medio del software Abaqus se ha diseñado un modelo de elementos finitos tridimensional de la torre de refrigeración teniendo en cuenta su geometría, la cual consiste en un hiperboloide de revolución de una hoja, construida de hormigón armado con terminación en su parte superior por una viga de coronación y sustentada en su base mediante pilares cilíndricos dispuestos en diagonal, unidos entre ellos mediante un anillo o jácena circunferencial inferior. El hiperboloide ha sido modelizado mediante elementos tipo lámina “shell”, mientras que la viga de coronación y los pilares han sido caracterizados a través de elementos tipo “frame”. Las características geométricas y dimensiones de la torre son las descritas en la Tabla 1, mientras que en la Figura 2 se detalla el modelo descrito.

Altura total	120 m
Altura de pilares	7,65 m
Diámetro base	87,4 m
Diámetro de coronación	54,5 m
Diámetro de garganta	48 m
Espesor medio de lámina de revolución	0,14 m
Viga de coronación	1 m x 0,3 m
Anillo inferior (viga de unión entre pilares)	0,75 m x 0,45 m

Tabla 1. Características geométricas del modelo de la torre.

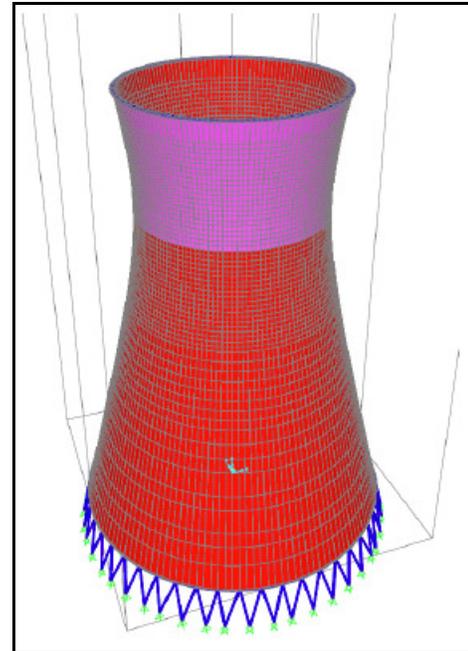


Figura 2. Modelo de elementos finitos de la torre de refrigeración.

En cuanto a las características estructurales establecidas en el modelo, se han considerado los valores nominales, definidos en proyecto y presentes en la torre, para hormigón y acero AEH-400.

Por otra parte y apoyándose en investigaciones recientes [3], para el análisis de la dinámica estructural de la torre se considera la formulación de Rayleigh, descrita mediante la Ecuación 1, donde α y β dependen de los ratios de amortiguamiento y de las frecuencias propias para cada modo, mientras que C , M y K son respectivamente las matrices de amortiguamiento, inercia y rigidez.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

A partir del modelo propuesto se busca evaluar los esfuerzos y el estado de tensiones originados por la acción del viento, así como por el peso propio de la torre de refrigeración, por la presencia de gradientes térmicos y la dinámica estructural.

A. Influencia del viento.

El impacto del viento sobre una torre de refrigeración ha sido ampliamente estudiado en diversas investigaciones [4, 5, 6]. Sin embargo, atendiendo a la regularización y legislación vigentes, se han tenido en cuenta las directrices expuestas en la norma UNE-ENV 1991-2-4:1998 [7]. A partir del citado documento normativo, se ha definido la presión del viento W_{wj} en conformidad con la expresión especificada en la Ecuación 2, donde q_{ref} es la presión de referencia, c_e es el coeficiente de exposición que depende de la altura z_j , c_d es el coeficiente de presión y c_{fj} es el coeficiente de fuerza.

$$W_{wj} = q_{ref} \cdot c_e(z_j) \cdot c_d \cdot c_{fj} \tag{2}$$

Siguiendo lo establecido en el apartado 10.8.2 de la norma [7], el coeficiente de fuerza se calcula de acuerdo a la Ecuación 3.

$$c_{fj} = \psi_\lambda \cdot c_{f0} \tag{3}$$

Siendo c_{f0} el coeficiente de fuerza de un cilindro de esbeltez infinita y ψ_λ un factor de reducción. En el caso particular del modelo diseñado, se ha considerado que el coeficiente de fuerza es igual a la unidad.

Por otra parte, el coeficiente de exposición tiene en cuenta los efectos que la rugosidad del terreno, la topografía y la altura sobre el nivel del suelo provocan sobre la velocidad media del viento y la turbulencia. Considerando que la torre examinada se encuentra en terreno llano conforme con la categoría III de la norma para áreas suburbanas o industriales, los valores de este parámetro se han hallado considerando intervalos de altura de 20 m, según lo tabulado en la Tabla 2.

z_j [m]	c_e
20	2,30
40	2,80
60	3,25
80	3,40
100	3,50
120	3,60

Tabla 2. Valores del coeficiente de exposición [7].

El coeficiente de presión se determina en función del número de Reynolds R_e definido según la Ecuación 4, donde v_m es la velocidad media del viento, ν es la viscosidad cinemática del aire y ϕ es el diámetro del hiperboloide de revolución en cada altura.

$$R_e = \frac{\phi(z_j) \cdot v_m(z_j)}{\nu} \tag{4}$$

La velocidad del viento se ha determinado a partir de registros experimentales medidos a través de anemómetros añadidos en alturas discretas de 20 m y distribuidos en la torre. A modo

ilustrativo, se presentan los resultados obtenidos para todo el año 2012 a una altura de 60 m. Como nomenclatura, se ha considerado dirección norte como N, dirección sur como S, dirección oeste como O y dirección este como E.

Mes	Dirección	v_m [m/s]	Mes	Dirección	v_m [m/s]
01	SO	7,67	07	O	8,69
02	SO	12,14	08	SO	8,03
03	O	15,73	09	SO	6,70
04	SO	8,43	10	SO	7,02
05	O	9,15	11	O	8,11
06	O	7,71	12	O	7,93

Tabla 3. Velocidad media del viento medida a una altura de 60 m.

Con el número de Reynolds, el ángulo α que establece la dirección del viento y considerando la gráfica incluida en la norma y esquematizada en la Figura 3, se han calculado los diferentes coeficientes de presión.

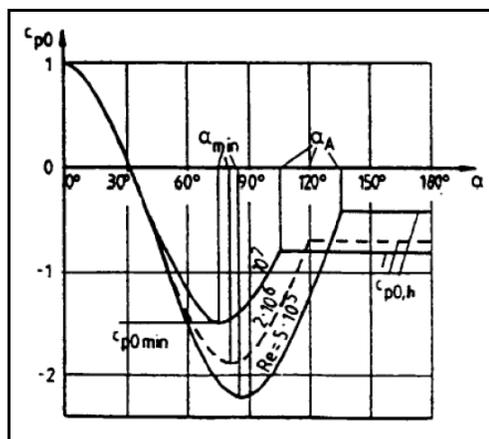


Figura 3. Gráfica para estimar el coeficiente de presión [7].

B. Consideración de la acción térmica.

Los efectos térmicos debidos al funcionamiento habitual de la torre, han sido tomados en cuenta por medio del gradiente térmico de temperatura de la sección transversal, obtenido a partir de una diferencia de temperaturas entre las fibras extremas de la sección. Mediante sensores dispuestos en la estructura, se han obtenidos los promedios mensuales de temperatura ambiente resumidos en la Tabla 4.

Mes	T [°C]	Mes	T [°C]
01	5,52	07	27,88
02	5,50	08	27,50
03	10,80	09	22,35
04	11,52	10	16,46
05	19,85	11	8,75
06	25,94	12	5,85

Tabla 4. Temperatura media ambiental en la torre de refrigeración.

Considerando que la temperatura de funcionamiento en el interior de la torre es de 40 °C y que la temperatura media anual en el exterior es de aproximadamente 15 °C, se dispone

de una variación de temperatura de 25 °C. Para la obtención de los esfuerzos provocados por la acción térmica, y dado que el fenómeno objeto de estudio es la variación de temperatura entre fibras se ha introducido el gradiente térmico, como la suma de un incremento uniforme y homogénea de temperatura de 12,5 °C, más una variación de 12,5 °C y -12,5 °C en la fibra interior y exterior, respectivamente, según la Figura 4.

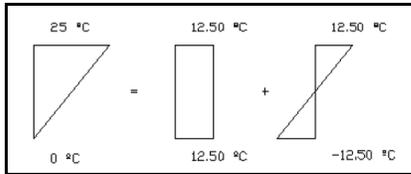


Figura 4. Ilustración del gradiente de temperatura.

La superposición anteriormente descrita se ha adoptado para una hipótesis de comportamiento lineal y homogéneo del material sin fisuración.

III. RESULTADOS.

A. Modos propios de vibración.

El análisis vibracional se ha realizado teniendo en cuenta la influencia de las voladuras producidas por una mina próxima a la torre. Por medio de sensores acelerómetros instalados en puntos de la estructura, se ha adquirido una amplitud máxima de aceleración de vibración de 181 mm/s² en las diferentes voladuras experimentadas en el año 2012. La Figura 5 muestra el registro temporal asociado a este valor pico máximo.

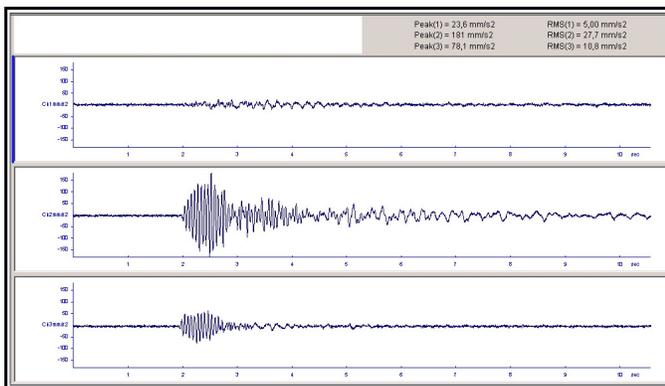


Figura 5. Registro temporal de vibraciones medidas en la torre.

De acuerdo al modelo antes descrito y a las medidas hechas, se han calculado los primeros doce modos de vibración de la torre de refrigeración, recogidos en la Tabla 5.

Modo	f [Hz]	Modo	f [Hz]
1	0,8465	7	1,0387
2	0,8502	8	1,0408
3	0,8847	9	1,1742
4	0,8904	10	1,1748
5	0,9539	11	1,3691
6	0,9615	12	1,3826

Tabla 5. Modos de vibración calculados.

Para valorar el impacto de las vibraciones experimentadas en la torre de refrigeración, se ha considerado una metodología aceptada por investigaciones recientes [3], así como también los criterios exigidos por la norma UNE 22-381:1993 [8]. En la misma, se exponen curvas límite admisibles para los valores de vibración en estructuras debidos a voladuras. Realizando la integración y el tratamiento en frecuencia de todas las señales adquiridas experimentalmente, se ha determinado el espectro de la velocidad de vibración, el cual ha sido comparado con respecto a la curva admisible para la clasificación del grupo I, asociada a edificaciones de tipo industrial con estructuras de hormigón armado. La Figura 6 esquematiza el espectro de la señal de vibración con amplitud máxima medida, contrastada con la curva límite.

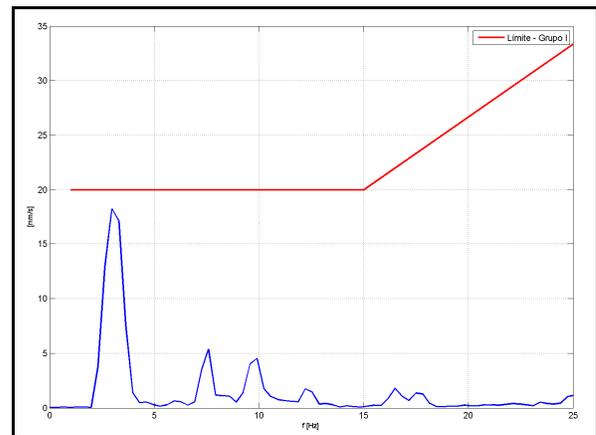


Figura 6. Contrastación de curva límite con espectro de vibración.

La figura pone de manifiesto que se satisfacen los límites admisibles aceptados. A la vista de estos resultados y teniendo en cuenta que las voladuras tienen carácter esporádico, se ha descartado que éstas sean origen de las grietas presentadas en la torre de refrigeración.

B. Evaluación de la dinámica estructural.

La introducción de las condiciones experimentales medidas en el modelo de elementos finitos, ha permitido obtener un primer resultado significativo, el cual evidencia que en las zonas adyacentes a la presión de viento, es decir, donde la succión es máxima, se experimenta una serie de esfuerzos a tracción tanto vertical como horizontalmente, justificando las dos grandes grietas verticales observadas a 160° y 285°.

Las direcciones principales (máximas y mínimas) obtenidas en el modelo, se ubican justo en la parte inferior del cuello del hiperboloide de revolución, coincidiendo con la patología observada, tal como se aprecia en la Figura 7.

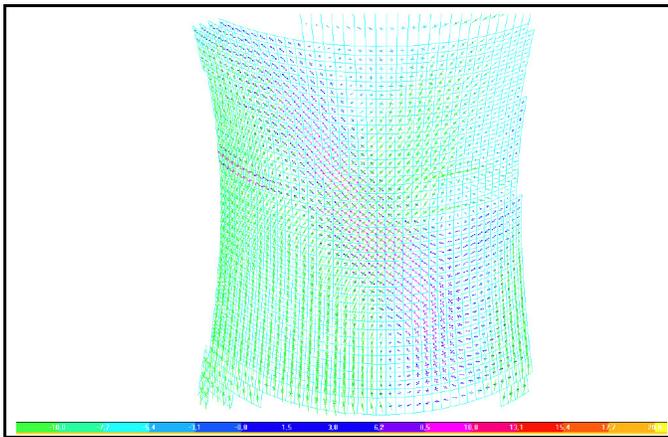


Figura 7. Zona máxima de esfuerzo en la parte inferior del cuello del hiperboloide de revolución.

La consideración de la acción térmica en la estructura, incide principalmente en los extremos superior e inferior de la torre de refrigeración, donde se dispone de la viga de coronación y anillo inferior, respectivamente. Por medio del modelo de cálculo analizado se han hallado unos esfuerzos generalizados máximos de tracción en ambas localizaciones de la estructura, viéndose incrementados en las zonas afectadas por la acción del viento. En el resto de la torre, la influencia del gradiente térmico no es tan significativa. En la Figura 8 se representan los esfuerzos determinados en la viga de coronación, mientras que la Figura 9 esquematiza los resultados particulares para el anillo inferior.

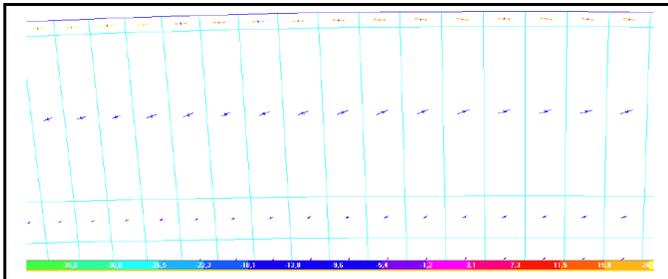


Figura 8. Esfuerzos en la viga de coronación debidos principalmente a la acción térmica.

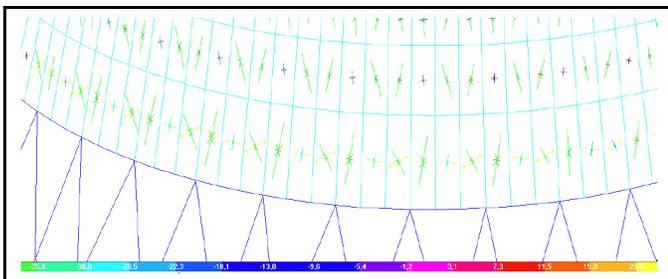


Figura 9. Esfuerzos en el anillo inferior debidos principalmente a la acción térmica.

En cuanto a los valores máximos de deformación obtenidos en la combinación de peso propio y las acciones térmicas y del viento, se han determinado deformaciones máximas próximas a 4,6 cm, tal como se ilustra en la Figura 10 y en la Figura 11.

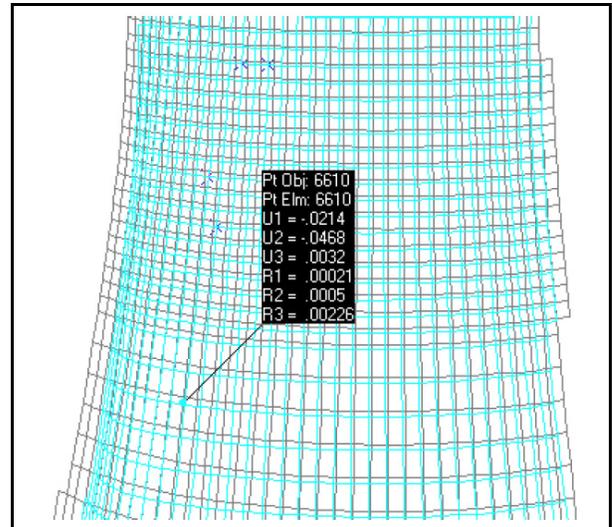


Figura 10. Valores de deformación máxima determinados en la parte inferior del cuello del hiperboloide de revolución.

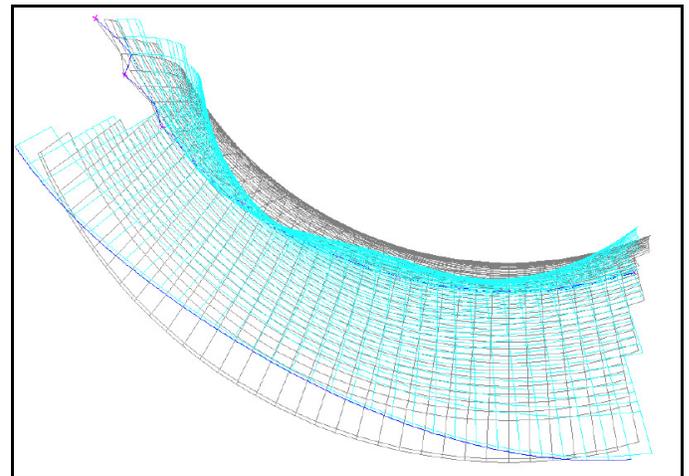


Figura 11. Vista en planta de los valores de deformación máxima.

El valor de deformación máxima antes citado se ha visto en la parte inferior del cuello del hiperboloide de revolución, el cual es el emplazamiento de máxima tracción. Es necesario hacer especial énfasis en la hipótesis de que la deformación obtenida resulta de un cálculo elástico lineal, por tanto no se considera la fisuración ni la deformación que este estado provoca. Hay que considerar que una vez producida la rotura de la lámina, ésta tiende a volver a su estado natural de posición natural y tensión nula, de acuerdo al principio de disipación de toda la energía.

C. RECOMENDACIONES DE ACCIÓN.

A la vista de los resultados obtenidos mediante el modelo de elementos finitos y las medidas experimentales, se puede afirmar que la torre de refrigeración, con más de 35 años de vida útil se encuentra en unas condiciones de exposición a la acción del viento y a gradientes térmicos severas. Estas dos acciones principales sumadas a la esbeltez de la lámina u hoja

de revolución, la hacen especialmente sensible desde el punto de vista de durabilidad y vida útil.

Además de la evidente necesidad de reparar con urgencia las dos grietas o fisuras, a través del trabajo y modelo realizados ha sido posible diseñar algunas propuestas de mejora.

En primer lugar es especialmente necesario instrumentar con sensores puntos del contorno de la torre de refrigeración, con la finalidad de monitorizar la evolución de la geometría exterior y llevar a cabo medidas de actuación en coordinación con los registros que se tengan de períodos de vientos fuertes, gradientes térmicos muy elevados, u otras incidencias como voladuras que superen el umbral de daño de la normativa.

En la actualidad, se dispone de una instrumentación basada en anemómetros, acelerómetros, galgas extensométricas y sensores de ultrasonidos, que permiten registrar de forma continua magnitudes de aceleración de vibración, velocidad y dirección del viento, esfuerzos de tracción y compresión, temperatura y deformación estructural. La instrumentación instalada en la torre, ha demostrado ser una herramienta útil para evaluar de forma constante el comportamiento dinámico de la estructura y para predecir acciones de mantenimiento.

Adicionalmente, mediante el modelo ha sido posible detectar también los emplazamientos sometidos a mayores esfuerzos por la acción de gradientes térmicos. Tras una nueva inspección se han detectado desconchados y nuevos indicios de deterioro en el anillo inferior y en la viga de coronación. A la luz de esta evidencia, se han llevado a cabo y diseñado campañas correctivas de esta problemática.

D. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha desarrollado una modelización de elementos finitos de una torre de refrigeración, afectada por fisuras y grietas tras labores de inspección. El modelo permite considerar la influencia de la presión del viento, el gradiente térmico debido al funcionamiento nominal de la torre, el peso propio de la estructura y la dinámica vibratoria originada por voladuras en una mina aledaña.

Las simulaciones realizadas se han complementado a través de mediciones experimentales hechas durante el año 2012. La información registrada se ha utilizado para alimentar los datos de entrada del modelo, con el propósito de predecir de forma más realista el comportamiento de la torre examinada.

Por medio del análisis vibracional se ha apreciado que las vibraciones inducidas por las voladuras ocasionales en la mina no provocan daños estructurales en la torre para los valores pico de aceleraciones obtenidas, ni se ha previsto riesgo en el buen comportamiento de ésta.

El modelo ha permitido obtener resultados de los niveles de esfuerzos y deformaciones presentes en la torre, apreciando

que la parte inferior del cuello del hiperboloide de revolución es la zona donde se presentan mayores esfuerzos, lo cual coincide con los problemas de fisuraciones presentados. En el mismo sentido, la modelización ha permitido detectar zonas donde la acción térmica cobra más relevancia.

Sobre la base de los indicios y resultados determinados por el modelo de elementos finitos y simulaciones realizadas, se han podido diseñar y llevar a cabo metodologías de mejora y de reparación. Las mismas se encuentran ya implementadas y forman parte del programa de mantenimiento habitual de la torre de refrigeración evaluada.

E. REFERENCIAS.

- [1] L. G. Kopenetz, and A. Cătărig, "Practically structural analysis of large cooling towers", *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 1(14), pp. 39-44, 2011.
- [2] L. Long-Yuan, and L. Wen-Da, "Asymptotic analyses of dynamic response of hyperbolic cooling tower shells with ring-stiffeners perturbation finite element solution", *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 8(7), pp. 631-639, 1987.
- [3] J. M. Dulinska, and M. Fabijanska, "Large-dimensional shells under mining tremors from various mining regions in Poland", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59, pp. 1443-1450, 2011.
- [4] D. Makovicka, "Response analysis of an RC cooling tower under seismic and windstorm effects", *Acta Polytechnica*, vol. 46(6), pp. 17-21, 2006.
- [5] P. S. Rao, P. K. Aravindan and K. Ramanjaneyulu, "Buckling analysis of cooling tower shells subjected to non-asymmetric wind pressures", *Computer and Structures*, vol. 40(4), pp. 849-856, 1991.
- [6] G. Murali, C. M. V. Vardhan and B. V. P. K. Reddy, "Response of cooling towers to wind loads," *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7(1), pp. 114-120, 2012.
- [7] *Eurocode 1. Basis of design and actions on structures. Part 2-4: Actions on structures. Wind actions*, UNE-ENV Standard 1991-2-4, May 1998.
- [8] *Control de vibraciones producidas por voladuras*, UNE Standard 22-381, April 1993.