

Disponible en [www.hormigonyacero.com](http://www.hormigonyacero.com)  
Hormigón y Acero, 2020  
<https://doi.org/10.33586/hya.2020.2713>

## ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

### EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA ESTRUCTURA DE TORRE DE REFRIGERACIÓN Y TORRE DE GASIFICACIÓN PREVIAMENTE Y DURANTE SU DEMOLICIÓN POR DETONACIÓN

Antonio Manuel BUENO BLEDA

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2713>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo, hasta ser incluido en un número, debe ser citado así:

**Antonio Manuel BUENO BLEDA, (2020) EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA ESTRUCTURA DE TORRE DE REFRIGERACIÓN Y TORRE DE GASIFICACIÓN PREVIAMENTE Y DURANTE SU DEMOLICIÓN POR DETONACIÓN, *Hormigón y Acero*, Avance online, doi: <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2713>**

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2020 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

# Evaluación estructural de una Torre de Refrigeración y una Torre de Gasificación previamente y durante su demolición por detonación

*Structural evaluation of the Cooler Tower and Gasification Tower before and during their explosive demolition*

Antonio Manuel Bueno Bleda <sup>a</sup>, Jacinto Ruiz Carmona <sup>b</sup> y Juan Rey Rey <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Arquitecto Máster en Estructuras de Edificación. Coordinador de Proyecto en Mecanismo Ingeniería

<sup>b</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Asociado en Mecanismo Ingeniería y Prof. Asociado en ETSAM (UPM)

<sup>c</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director en Mecanismo Ingeniería y Prof. Asociado en ETSAM (UPM)

## RESUMEN

La normativa actual determina los requisitos mínimos para la ejecución de nuevas estructuras o para la rehabilitación de las estructuras existentes, pero no indica de forma específica las bases de cálculo ante la ejecución de actuaciones previas y análisis de la demolición de estructuras de hormigón armado. En este artículo se presenta el análisis llevado a cabo para la evaluación de la repercusión de las actuaciones previas a la demolición y el modelado del proceso de caída de una Torre de Refrigeración y una Torre de Gasificación de dos edificaciones pertenecientes a una planta termoeléctrica del tipo Gasificación integrada en ciclo combinado.

## ABSTRACT

Current regulations determine the minimum requirements for structural design of new and existing structures, but it does not specifically indicate the calculation basis for the previous operations and analysis of the demolition of reinforced concrete structures. This article presents the analysis carried out for the previous operations and downfall of the Cooler Tower and Gasification Tower at a power Station.

**PALABRAS CLAVE:** demolición, detonación con explosivos, caída de edificio, análisis límite, colapso.

**KEYWORDS:** demolition, explosive detonation, building downfall, limit analysis, collapse.

## 1. Introducción

La demolición de edificios es un campo del conocimiento dentro de la ingeniería estructural no contemplado de forma específica por la normativa actual [1] Si se regula a través del REAL DECRETO 105/2008, de 1 de febrero,

la producción y gestión de los residuos de construcción y su demolición [2-3].

La demolición o derribo es la última fase dentro del periodo de vida de un edificio, a través del cual se permite la eliminación de todos los sistemas que lo componen.

El tamaño del edificio, su número de plantas, su configuración arquitectónica, estructural y de instalaciones, junto a los condicionantes externos como edificios y espacios próximos, determinan las estrategias a adoptar en cada caso específico. En el caso de la mayoría de edificios, con alturas inferiores a 5 plantas, la demolición se realiza mediante medios mecánicos y manuales usualmente utilizados en las labores de ejecución de edificios de nueva planta y rehabilitación de edificios existentes.

Para edificios de mayor envergadura y singularidad, es necesario implementar técnicas complementarias, como la utilización de explosivos, que permitan garantizar la demolición.

## 2. Descripción de las intervenciones

El presente artículo muestra el estudio y análisis estructural llevado a cabo en el proyecto de demolición por detonación de la Torre de Refrigeración y Torre de Gasificación dentro de una planta termoeléctrica del tipo gasificación.



Figura 1. Plano de situación de las dos torres

### 2.1 Torre de Refrigeración

La Torre de Refrigeración es el primero de los dos edificios a demoler. Está ejecutado mediante una estructura de cáscara hormigón armado con geometría de hiperboloide apoyada sobre pilares inclinados de hormigón armado de sección circular.



Figura 2. Vista de la Torre de Refrigeración a demoler

La torre se cimenta sobre zapatas aisladas de hormigón armado

### 2.2 Torre de Gasificación

La Torre de Gasificación es el segundo de los dos edificios a demoler en la central térmica. Está ejecutado mediante una estructura de muros y losas macizas de hormigón armado con geometría ortoédrica.



Figura 3. Vista de la Torre de Gasificación a demoler

La torre se cimenta sobre una losa pilotada de hormigón armado.

## 3. Bases de cálculo y análisis estructural

El análisis estructural de la demolición de ambos edificios comprende las siguientes fases:

- 1 - Análisis del estado actual.
- 2 - Análisis por etapas de los trabajos de preparación de la demolición por detonación

(aperturas de huecos/ventanas para instalación de explosivos y demoliciones selectivas).

3 – Análisis de la capacidad estructural en la situación previa a la demolición ante acciones climatológicas.

4 – Modelación de la caída del edificio.

Todas estas fases son modeladas dentro de un análisis estructural no lineal por etapas para analizar la evolución de las deformaciones y esfuerzos de los diferentes elementos críticos.

Para el análisis de las situaciones anteriormente descritas se parte de la información existente de ambos edificios y del levantamiento de datos realizados para determinar la geometría real.

### 3.1 Análisis del estado actual

La primera de las etapas corresponde con el estado actual de ambas estructuras. Se realiza un modelo de cálculo con el programa ETABS [4] introduciendo las características geométricas, materiales y cargas con las que se han ejecutado ambos edificios.

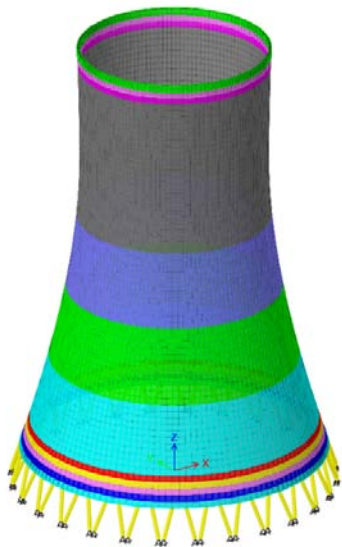


Figura 4. TR - Vista modelo cálculo - Estado actual

La Torre de Refrigeración (TR) se ejecuta mediante una cáscara de hormigón armado de geometría basada en un hiperboloide apoyada sobre pilares inclinados circulares, con hormigón HA-30 y acero AEH 500 (equivalente al actual B500S). Los espesores de la cáscara van desde 175 – 190 mm en el fuste

de la torre hasta 800 – 900 mm en los anillos superior e inferior.

La Torre de Gasificación (TG) se ejecuta mediante una estructura de muros de espesor 40 cm y losas macizas de hormigón armado de espesores entre 25 – 35 cm, con hormigón HA-25 y acero AEH 400 (equivalente al actual B400S) según lo indicado en los planos originales de proyecto.



Figura 5. TG - Vista modelo cálculo - Estado actual

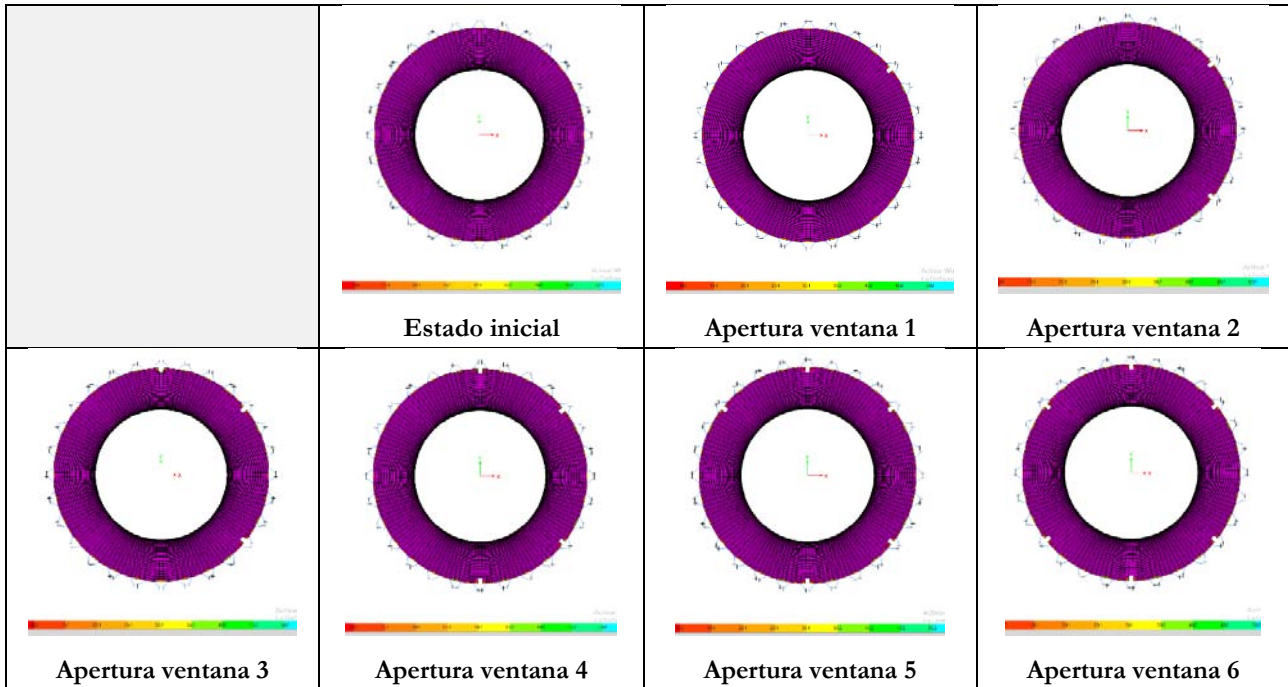
En el interior de la Torre de Gasificación aparecen estructuras metálicas que dan soporte a equipos y se modelan en los cálculos como cargas aplicadas sobre la estructura principal de hormigón armado.

### 3.2 Trabajos previos a la demolición

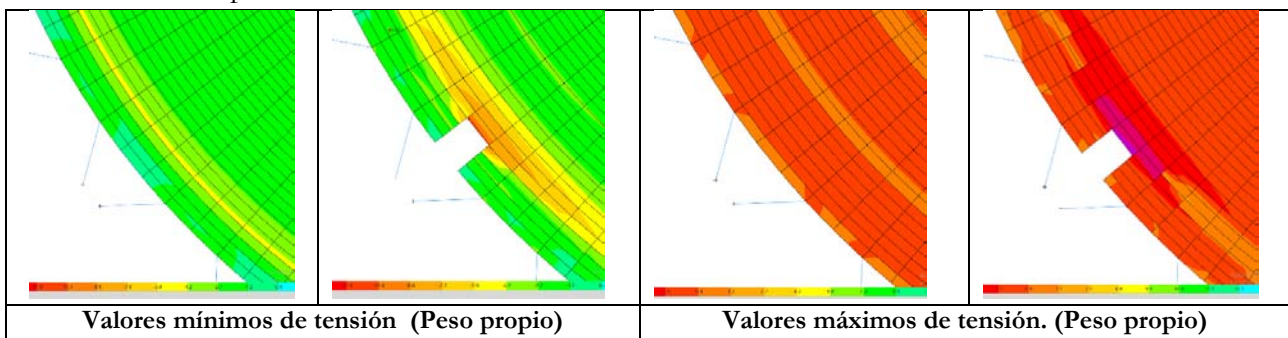
Para la demolición por detonación de ambos edificios, se planifica una intervención con apertura de huecos y ejecución de barrenos en posiciones estratégicas que permitan derribar los edificios para desarrollar las labores de desmantelamiento posteriores.

La definición de las estrategias de demolición son clave para determinar el modo final de caída del edificio. Durante las fases de preparación se deberá garantizar la seguridad estructural para evitar el colapso de la estructura debido a estas intervenciones verificando su estabilidad, resistencia y rigidez.

Para la Torre de Refrigeración se define una estrategia mediante la apertura de 6 ventanas en simetría polar con el eje central del hiperboloide:



A través de este análisis de apertura de ventanas por etapas se examina la respuesta de la estructura y de las tensiones en su entorno debido a las irregularidades generadas en el funcionamiento por forma de esta estructura hiperbólica.



Para la Torre de Gasificación, se plantea la ejecución de ventanas en las tres primeras plantas de la fachada noroeste, y ventanas en las fachadas suroeste y noroeste favoreciendo la eliminación de una cuña frontal que fuerce la caída del edificio en ese sentido, a través de la formación de una charnela que permita el giro del edificio generado en la fachada sureste.

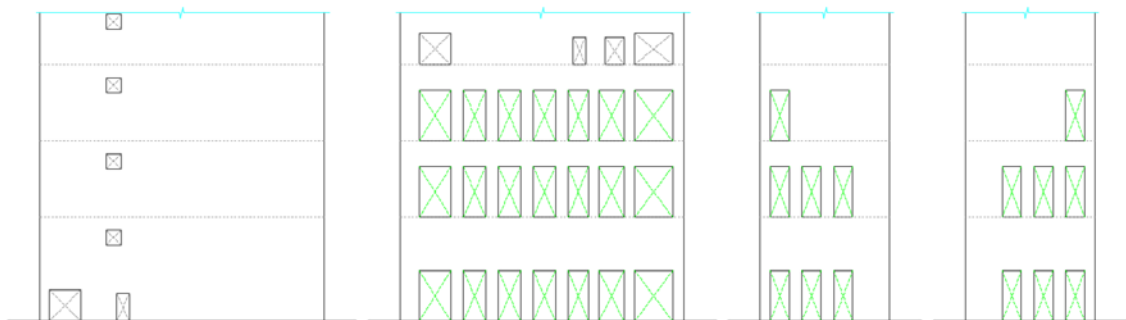


Figura 6. Alzados de apertura de huecos en fachadas

Mapa de fuerzas de compresión máximas

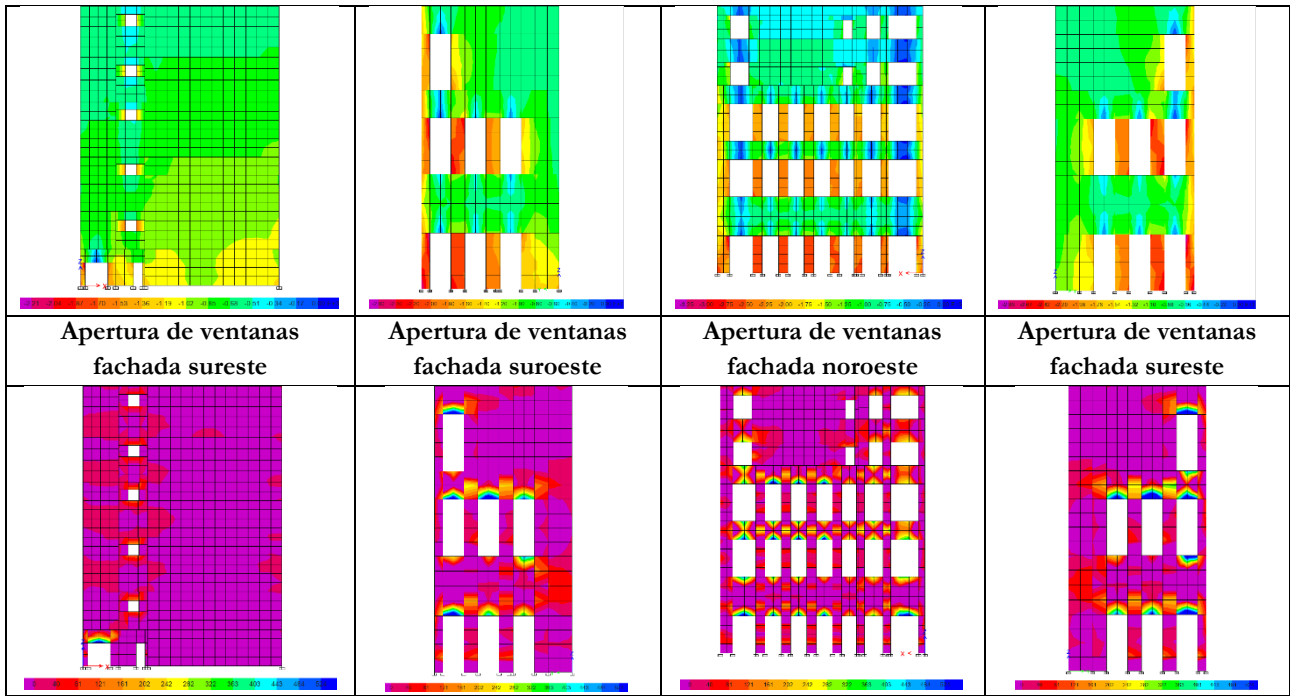


Figura 7. Mapa de fuerzas de compresión y tracción máximas

### 3.3 Estado previo e inicial de la demolición

Tras la realización de los trabajos previos a la demolición, el plazo de realización de la detonación se plantea inferior a dos meses. Durante ese periodo, situado entre los meses de verano, la acción climatológica predominante sería el viento, por lo que en ambos edificios se analiza una situación no lineal de viento aplicada a partir de las etapas descritas en los apartados anteriores. Con ello se verifica el comportamiento de ambas estructuras frente a la acción de viento definida por la normativa para su situación en el territorio.

En la Torre de Refrigeración, el viento genera una acción asimétrica con desplazamientos globales mínimos sobre la estructura, pero en el entorno de las ventanas se incrementan las tensiones hasta límites considerables. En previsión a este comportamiento, se determina un protocolo con ejecución de esquinas circulares en huecos para evitar concentración de tensiones que pudieran favorecer la aparición de fisuras con efectos no deseados.

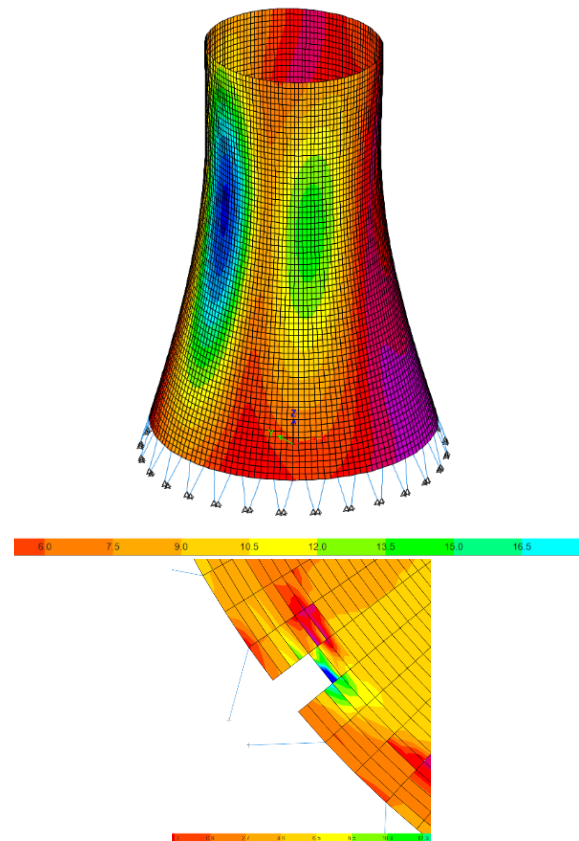
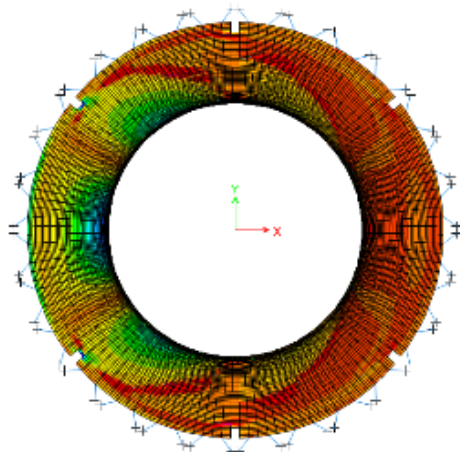


Figura 8. Tensiones en el entorno de las ventanas.

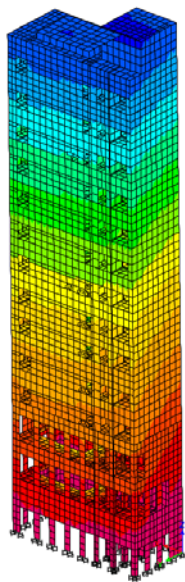
Se aprecian las concentraciones de tensiones debido a la acción del viento, pudiendo estas generar la aparición de fisuras que puedan comprometer el comportamiento por forma de la cáscara de hormigón armado.



**Figura 9. Tensiones durante la acción de viento**

En la Torre de Gasificación, el estado inicial con la apertura de huecos genera un desplome del edificio debido a la concentración de las deformaciones en las porciones de muro que se mantienen, obteniendo una relación de desplome en torno a  $H/7600$ :

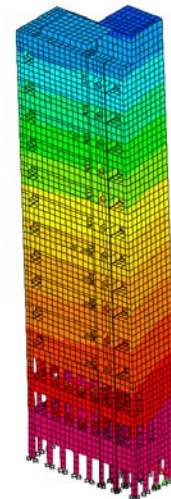
3-D View - Displacements (ELU2 - APERTURA HUECOS DEMOLICION) [mm]



**Figura 10. Desplome apertura ventanas**

Dada esta deformación, se analiza la acción del viento sobre las fases anteriormente aplicadas a través de un análisis no lineal por etapas, obteniendo una relación de desplome en este caso en torno a  $H/2300$ :

3-D View - Displacements (ELU1 - VIENTO EN APERTURA HUECOS) [mm]



**Figura 11. Desplome acción viento desfavorable**

Los desplomes obtenidos no comprometen la estabilidad de los elementos estructurales y se verifica que la capacidad resistente de los soportes generados por la apertura de ventanas muestra un coeficiente de seguridad mínimo de 2,17.

#### 4. Análisis de la capacidad límite de los elementos críticos

Para el análisis de la capacidad límite de los elementos críticos, se plantean los siguientes casos de cálculo que identifican las fases de preparación e inicio de la demolición:

**ELU 1 – Estado actual**

**ELU 2 – Trabajos previos**

**ELU 3 – Acción de viento**

**ELU 4+5 – Detonación de soportes**

Al tratarse de un análisis no lineal por etapas, cada una de las acciones sucesivas se calcula sin aplicar coeficientes de mayoración, obteniendo en cada comprobación el valor de coeficiente de mayoración de acciones global en base a la capacidad estructural de cada elemento (CMA).

En la Torre de Refrigeración se analizan en primera instancia la situación de los pilares circulares inclinados inferiores para cada uno de los casos de cálculo:

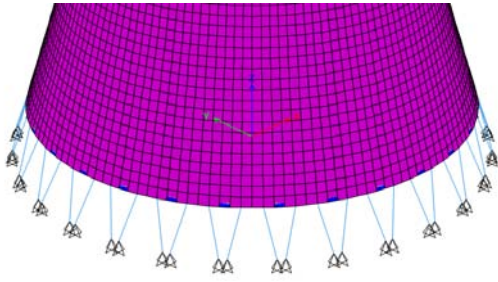


Tabla 1. Resultados del análisis de carga.

Caso	Axial (kN)	M2-2 (mkN)	M3-3 (mkN)
ELU 1	2293	20,74	45,70
ELU 2	2421	103,03	83,95
ELU 3	3983	120,70	243,14
ELU 4+5	*	*	*

En el caso de detonación, todos los pilares del hiperboloide son detonados dentro de un rango de 14000 ms, con un comienzo en dos direcciones para permitir el giro del cuerpo superior que permita orientar la caída de la estructura según los objetivos planteados.

En base a los datos anteriores, se analiza el estado de sollicitación de los pilares, obteniendo que para el caso de viento planteado por la normativa se obtiene un CMA inferior a 1.

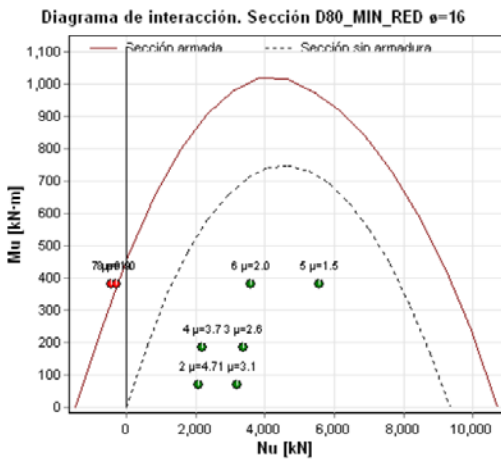
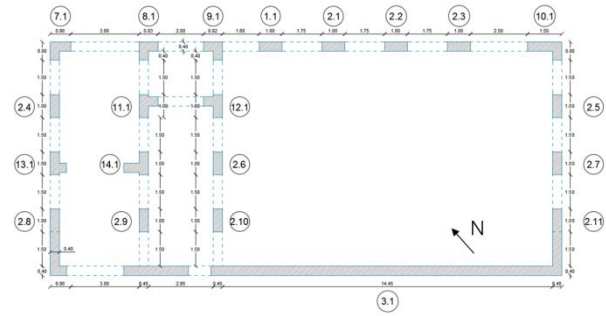


Figura 10. Tabla cumplimiento columnas inclinadas

Por ello, se determina un límite de previsión de viento de 90 km/h (25m/s) para garantizar la seguridad en torno a la estructura de la Torre de Refrigeración.

En la Torre de Gasificación se analizan los soportes obtenidos en el proceso de apertura de

ventanas y la fachada sureste frente a los diferentes casos de carga definidos:



El caso de demolición se compone de tres fases secuenciadas dentro del rango de 14000 ms de detonación de explosivos:

ELU 4. Se lleva a cabo la detonación de los soportes de planta baja en fachada, en orden de derecha a izquierda para favorecer el giro del edificio hacia la fachada este.

ELU 5. Se lleva a cabo la detonación de los soportes de planta primera y segunda en fachada en orden de derecha a izquierda.

ELU 6. Finalmente se detonan los soportes de segunda alineación en planta baja y primera, desencadenando el colapso del resto de soportes.

Con este proceso se favorece la eliminación de la cuña frontal que permita el giro del edificio y evite choques y efectos derivados durante su caída.

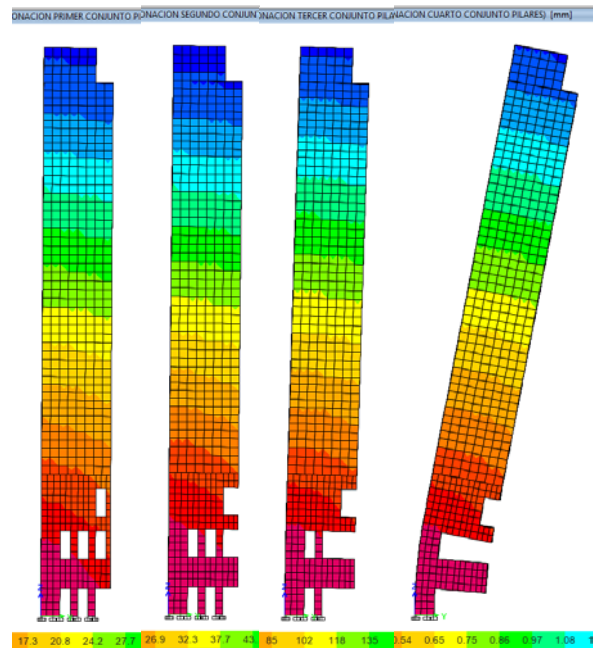


Figura 12. Análisis demolición y caída TG



El análisis de las etapas anteriores se complementa con el caso ELU 9, donde se contempla el colapso de todos los soportes obtenidos en la apertura de ventanas para la voladura y la resistencia, durante un periodo más alargado de tiempo, del muro de la fachada sureste que permite el giro del edificio:

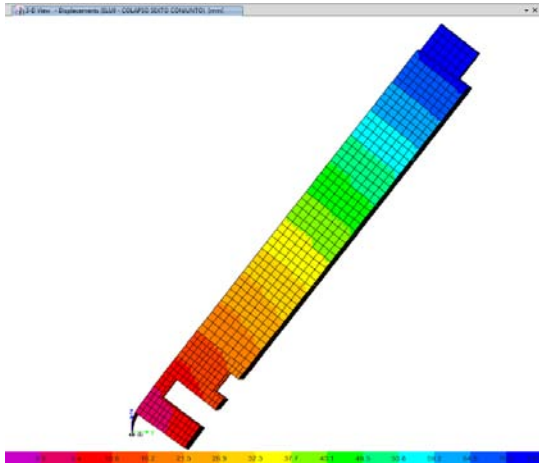


Figura 13. Giro en caída de Torre Gasificación

Este caso analizado, mostraría en la realidad un comportamiento claramente no lineal, por lo que los modelos matemáticos solamente permiten intuir el comportamiento del edificio.

Se realizan tabla de verificación para cada uno de los soportes para el cálculo de flexocompresión definido en la normativa EHE-08:

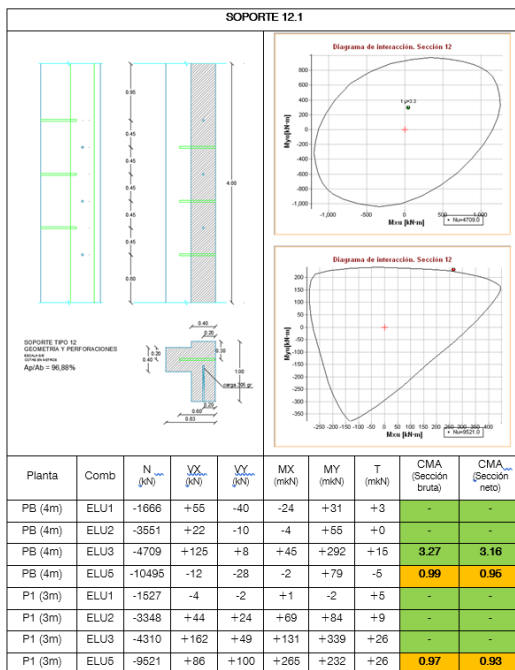


Figura 14. Análisis capacidad de columnas en base

#### 4.1 Análisis temporal de la caída de la Torre de Gasificación

Junto con el análisis por etapas de la caída mostrado en el apartado anterior, para el caso de la Torre de Gasificación donde no se disponía de referencias similares, se desarrolló un análisis dinámico en tiempo real (time history) del inicio de la caída para verificar el tiempo de inicio necesario para el giro de la estructura y que se garantizase que el choque de la parte frontal de la estructura con el suelo no generara un efecto rebote que condicionara la forma de la caída. Al eliminar la cuña inferior, el propio giro representado por el modelo genera en 0,1s un desplome alejado del punto de choque de la estructura permitiendo que la estructura desarrolle la inercia de caída en la dirección prevista.

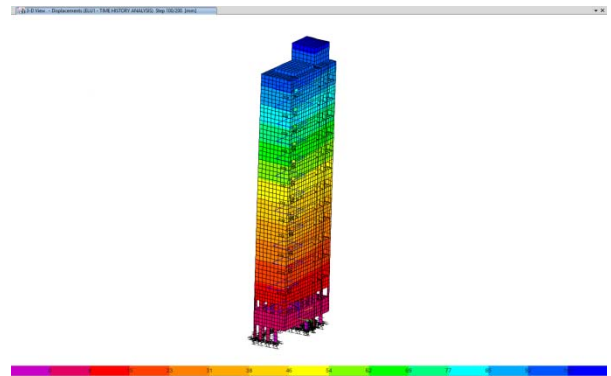


Figura 15. Análisis dinámico en tiempo real

En este análisis dinámico es únicamente válido en las primeras décimas de segundo de la caída dadas las hipótesis elásticas realizadas, pero da información suficiente para determinar la dirección de caída del conjunto.

#### 5. Análisis de las operaciones llevadas a cabo

Finalmente, las operaciones mostradas anteriormente se llevaron a cabo entre los meses de junio y septiembre del año 2018, con los resultados detallados a continuación:

### 5.1 Demolición de la Torre de Refrigeración

La demolición de la Torre de Refrigeración se realizó el día 2 de julio de 2018. A continuación, se muestran una serie de imágenes del proceso de caída de la estructura:



Figura 16. Fotografías del proceso de caída de la Torre de Refrigeración.

### 5.2 Demolición de la Torre de Gasificación

La demolición de la Torre de Gasificación se llevó a cabo el día 10 de septiembre de 2018. A continuación, se muestran una serie de imágenes del proceso de caída de la estructura:





Figura 17. Fotografías del proceso de caída de la Torre de Gasificación.

## 6. Conclusiones

La demolición final nos permitió, en ambos casos, volver a revisar todas las conclusiones obtenidas durante la fase previa de análisis:

- Durante la fase de trabajos previos a la demolición, la respuesta de ambas estructuras estuvo dentro de los límites estimados, verificándose la capacidad resistente de la misma.
- La caída de la Torre de Refrigeración se desarrolló dentro de los límites previstos una vez mermada la forma estructural de la cáscara. El acortamiento del diferencial de tiempo en la explosión entre los pilares delanteros y posteriores redujo su capacidad de giro provocando el choque frontal de la cáscara de hormigón y el consiguiente rebote que desvió la caída de la cabeza de la torre sensiblemente en la última etapa de desplome.
- El plan de demolición de la Torre de Gasificación se mantuvo según lo previsto en fase de análisis. La eliminación por detonación de la cuña frontal hasta planta segunda, junto con la decisión de mantener el muro trasero como charnela hasta el final de la detonación

permitió el giro del edificio hasta un punto donde, llegado el choque frontal de la estructura contra el suelo, se evitara el retroceso por choque de la parte delantera en la caída de la estructura.

Finalmente, en ambos casos se cumplieron los objetivos de derrumbe por debajo de la altura límite de los medios auxiliares que posteriormente permitieron completar el desmantelamiento de la estructura y con la posición sobre el terreno valorada en proyecto.

### Referencias

- [1] Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento.
- [2] Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- [3] AEDED Asociación española de demolición, descontaminación, corte y perforación.
- [4] Etabs 2016, Structures&Computers.