

# Comportamiento estructural de chimeneas de concreto reforzado: el caso de la chimenea de Termotasajero S.A.

## Reinforced concrete chimneys' structural behaviour: the case of the Termotasajero S. A. chimney

Recibido: 26 de octubre de 2009. Aprobado: 7 de mayo de 2010.

Nicolás Parra García

Profesor asistente del Departamento de Arquitectura de la Universidad de los Andes. Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Diseño de Puentes, Universidad Militar. Posgrado en Dinámica Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña.

✉ [nparra@uniandes.edu.co](mailto:nparra@uniandes.edu.co)

Harold Alberto Muñoz

Ingeniero civil, Universidad del Cauca. Maestría en Ciencias, Universidad de Massachusetts. Consultor en estructuras.

✉ [ingestructurasltda@gmail.com](mailto:ingestructurasltda@gmail.com)

### Resumen

El artículo presenta el diagnóstico realizado para la estructura de una chimenea de concreto reforzado construida en el año 1982 en la termoeléctrica de Tasajero S. A. (Norte de Santander), a partir de los ensayos de campo y el análisis estructural realizados con el objeto de determinar las posibles causas de los daños observados y de predecir su comportamiento ante fuerzas sísmicas para establecer el alcance de los trabajos de reparación y mantenimiento necesarios para su operación de acuerdo con las normas de construcción vigentes (NSR-98).

*Palabras clave:* chimeneas de concreto reforzado, presión sistémica y presión térmica.

### Abstract:

The paper presents a diagnostic undertaken for the construction of a reinforced concrete chimney built in 1982 in the thermoelectric company Tasajero S. A. (Norte de Santander), taking as a starting point, the field test and the structural analyses undertaken in order to determine the possible causes of damage observed and predict its behaviour under systemic pressure in order to establish the degree of repair work and maintenance required for its operation, according to the current construction norms (nsr-98).

*Keywords:* reinforced concrete fireplace, systemic pressure, thermic pressure.

Las chimeneas se caracterizan por ser estructuras esbeltas, en voladizo, cuya función principal es la de transportar los gases resultantes de la combustión o de una reacción química desde el nivel del terreno hasta determinada altura para su dispersión en la atmósfera. La altura de la chimenea depende de las condiciones específicas del proceso industrial que producen los gases y de las exigencias ambientales en torno a los límites en los cuales éstos pueden ser descargados generando niveles de contaminación aceptables según las normas.

La termoeléctrica Tasajero S. A. se encuentra localizada en el suroccidente de la ciudad de Cúcuta en el departamento de Norte de Santander. Dentro del conjunto de las construcciones de la empresa se encuentra una chimenea de concreto reforzado de 90 m de altura total, cuya construcción se realizó en 1982. La chimenea de Termotasajero S. A. está conformada por un fuste tronco-cónico en concreto reforzado, con un diámetro exterior de 6,80 m en la base y de 4,10 m en la punta, de espesor variable entre 0,35 y 0,20 m en la parte superior. Adicionalmente, posee un recubrimiento interno (*lining*) en ladrillo refractario para proteger el concreto de la acción agresiva y corrosiva de los gases de desecho, y controlar los gradientes de temperatura de forma tal que los esfuerzos térmicos en el concreto se mantengan dentro de límites aceptables.

A una altura de 8,50 m, el fuste de la chimenea tiene dos aberturas de 5,10 x 1,80 m ubicadas en caras opuestas diametralmente, las cuales sirven para la entrada de los gases que vienen de la caldera. La chimenea presenta fisuras verticales desarrolladas a todo lo largo del fuste, con separación regular entre 1,20 y 1,40 m y aberturas hasta de 10 mm de ancho.

Se adelantó una investigación documental y en campo para determinar las características del proceso constructivo original, los materiales y criterios de diseño, así como un análisis estructural de la chimenea para obtener un diagnóstico completo acerca de su estado a la fecha y una caracterización del comportamiento esperado ante fuerzas sísmicas.

### **Análisis estructural de la chimenea**

Se construyeron dos modelos de análisis para el estudio de la chimenea: un modelo principal tridi-



Figura 1. Chimenea de la termoeléctrica de Tasajero.



Figura 2. Modelo tridimensional de la chimenea en elementos finitos.

mensional de elementos finitos cuadrangulares tipo "shell" (fig. 2), con el cual se obtuvieron resultados de esfuerzos en las caras de la chimenea; y un modelo complementario mediante elementos lineales o tipo "frame" para comparar y corroborar los resultados obtenidos con el modelo matemático de elementos finitos para los valores de momento, cortante y axial en la base de la chimenea. El uso de modelos matemáticos sencillos complementarios permite calibrar los resultados de los modelos más complejos de elementos finitos y ajustar el refinamiento del mallado hasta obtener resultados con niveles de precisión suficiente.

Para obtener las propiedades mecánicas del concreto que se va a utilizar en el análisis, se extrajeron ocho núcleos y se ensayaron en laboratorio, obteniendo valores de resistencia a la compresión entre 27 y 37 MPa. A partir de estos resultados se utilizó para el análisis un valor de resistencia promedio  $f'c = 31,6$  MPa y un módulo de elasticidad,  $E = 22008$  MPa para el concreto.

En el modelo de la chimenea se consideraron únicamente como cargas muertas el peso del recubrimiento interior refractario, la tolva y las pasarelas de inspección, ya que estos elementos afectan la masa de la estructura. El peso del recubrimiento antiácido se calculó de acuerdo con el peso específico del ladrillo ( $2000 \text{ kg/m}^3$ ), su espesor (0,114 m) y la altura entre apoyos verticales, asignando la carga lineal obtenida proporcionalmente a cada uno de los nudos que conforman la sección circular del modelo

en cada nivel. De forma análoga, se procedió con las plataformas metálicas y la tolva de recolección de cenizas que se ubica en la base del fuste.

También se evaluó la acción del viento para una velocidad base de 60 km/h, el gradiente térmico y las fuerzas horizontales por sismo según el espectro de la NSR-98 para la zona del proyecto.

Para el análisis del gradiente de temperatura a través del espesor de la pared de concreto, se utilizaron los datos de emisiones de la planta termoeléctrica, a partir de los cuales se determinó la temperatura interior de los gases.

El cálculo del gradiente de temperatura se efectuó por dos metodologías: en primer término, la fórmula propuesta por Taylor y Turner,<sup>1</sup> en la cual se encuentra el coeficiente *K* de transmisión del conjunto de las tres capas (concreto, cámara de aire, pared refractaria) para obtener la diferencia entre las temperaturas (en grados centígrados) interior y exterior del fuste:

$$\Delta t = t_i - t_e = (a/\lambda h) * K * (T - t)$$

La segunda metodología aplicada fue la recomendada por el aci-307/95, en la cual se relacionan los coeficientes de conductibilidad de cada una de las capas con sus espesores para obtener el gradiente actuante.

De acuerdo con los cálculos realizados, el gradiente de temperatura obtenido fue de 40 °C entre la cara interior y exterior de la pared del concreto. Esta diferencia de temperaturas genera la aparición de esfuerzos circunferenciales en la chimenea, ya que la cara expuesta a más temperatura intenta deformarse en mayor medida que la cara contraria. A partir del modelo matemático, se determinaron los valores promedio de esfuerzos de tracción y compresión circunferencial en la chimenea (fig. 3).

Se realizó también un análisis dinámico lineal de la chimenea basándose en el espectro de diseño de las normas NSR-98, para un coeficiente de aceleración *A* = 0,30, un coeficiente de Sitio *S* = 1,2 y un coeficiente de Importancia *I* = 1,3. Se obtuvieron las frecuencias propias de vibración de la estructura y su respuesta dinámica en términos de desplazamientos y fuerzas internas para diseño.

Las chimeneas altas responden de manera compleja y pueden considerarse como grandes voladizos verticales, cuyo comportamiento se asemeja al de un látigo, por lo que la contribución de algunos modos altos de vibración es importante, tal y como se observa en la tabla 1 resumen con los períodos y porcentajes de participación de los modos más significativos.

**Tabla 1.** Períodos de vibración y masa efectiva para el modelo de la chimenea

Modo	Período(s)	% de masa	Sentido
1	2,191	38,49	X
3	0,459	16,17	Y
8	0,124	72,70	Vertical
10	0,100	3,98	X
36	0,039	5,46	X
40	0,031	2,78	Y

Si bien se trata de una estructura aparentemente simétrica por su geometría troncocónica, es importante analizar la incidencia de las aberturas en el fuste. La aparente simetría es modificada por la variación en la rigidez que causan los ductos de entrada, lo cual se aprecia en el pequeño desfase obtenido entre modos sucesivos (1 y 2, 3 y 4, etc.) que usualmente aparecen acoplados en estructuras perfectamente simétricas. Este comportamiento es un indicativo de la influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de la chimenea.

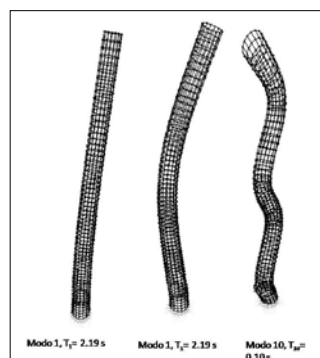


Figura 3. Esfuerzos circunferenciales debidos al gradiente térmico en el fuste, kg/cm<sup>2</sup>.

Figura 4. Complemento de la tabla 1: Algunos modos de vibración representativos de la chimenea.

1. Rumman, "Reinforced Concrete Chimneys".

Es importante mencionar que el análisis dinámico lineal realizado, aun cuando permite considerar el efecto de los modos altos de vibración en la respuesta de la chimenea, no permite predecir el comportamiento inelástico de la estructura ni la formación de rótulas plásticas en el fuste del elemento.

### Patología estructural de la chimenea

La estructura de la chimenea muestra de manera evidente en toda su longitud y contorno fisuras de diversas características y configuración. Prevalecen algunas fisuras verticales desarrolladas a todo lo largo de la altura de la chimenea con separación regular entre 1,20 y 1,40 m. Éstas poseen aberturas variables, pero se muestran con predominio de grietas hasta de 10 mm de ancho. Son marcadamente verticales, con inicio en las aberturas de las pequeñas ventanas que se encuentran sobre el nivel de la tolva, iniciando aproximadamente en el nivel +5,20 y terminando en el extremo superior de la chimenea (fig. 5).



Figura 5. Fisura vertical en el fuste de la chimenea.

Según el programa de ensayos planificado, se extrajeron núcleos de concreto en diferentes zonas de la estructura para analizar su composición, resistencia y demás características mecánicas. A partir de los análisis, se concluyó que la chimenea fue construida con una mezcla de concreto con relación agua-cemento baja ( $A/C = 0,45$ ), por lo que debió utilizarse un aditivo plastificante. En cuanto a los agregados, el 50% tiene un tamaño de  $\frac{1}{2}$ " (pulgada), lo cual genera un mayor contenido de pasta en la

mezcla y, por tanto, una mayor posibilidad de agrietamiento por contracción.

El proceso constructivo de las chimeneas usualmente dificulta la ejecución de un curado adecuado, en la medida que se va consiguiendo mayor altura, con el hecho adicional de que con ello se incrementa el efecto de evaporación del agua de la mezcla por causa del viento, cuya velocidad aumenta con el cuadrado de la altura.

A partir del análisis realizado, se pudo determinar que las fisuras verticales presentes a lo largo del fuste de la estructura fueron causadas por una acción conjunta entre el fenómeno de retracción temprana del concreto y las acciones térmicas que impone el funcionamiento de la chimenea en el cascarón de concreto. Las fisuras debidas a la retracción nacieron en las esquinas de las aberturas, gracias al cambio de rigidez que se presenta por la discontinuidad de la pared.

A las fisuras incipientes causadas por la retracción, se sumaron los efectos causados por el gradiente de temperatura a lo largo del espesor de la pared del fuste. Como la temperatura interior es superior a la temperatura de la superficie exterior, las capas exteriores tienden a impedir la dilatación de las interiores, originándose en éstas esfuerzos de compresión, mientras que las capas interiores tienden a producir el alargamiento de las exteriores, dando lugar en ellas a esfuerzos de tracción y, por consiguiente, al agrietamiento del concreto.<sup>2</sup>

Al existir dos aberturas significativas en el fuste de la chimenea, se presentan lugares en los cuales no hay restricción a la deformación y, por lo tanto, la sección de la estructura se distorsiona en dicha zona. La fisura se origina en la esquina, puesto que es el lugar en el cual comienza la restricción a la deformación en el fuste, por lo que en ellas se concentran esfuerzos que terminan agrietando el concreto. Esta situación es, además, agravada por el hecho del cambio abrupto en la rigidez, ya que la esquina del agujero es en ángulo recto. El mecanismo descrito se pudo reproducir en el modelo de elementos finitos de la chimenea, en el cual se observa cómo alrededor de los huecos existe una relajación de esfuerzos horizontales debido a la posibilidad de

2. Muñoz, "Estudio de evaluación, diagnóstico y especificaciones de mantenimiento y reparación de la estructura de concreto reforzado de la chimenea de la central térmica de Termotasajero-Cúcuta".

deformación, y cómo éstos se incrementan debido a la concentración en las esquinas por el cambio abrupto de rigidez en la pared (fig. 6).

### Comportamiento ante fuerzas sísmicas

La respuesta de la estructura ante las acciones que impondría un movimiento sísmico se evaluó según los criterios de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 y a las recomendaciones del aci 307-95 (Standard Practice for the Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys).

En cuanto a la rigidez de la chimenea, por tratarse de un elemento de gran esbeltez y comportamiento voladizo vertical, los desplazamientos esperados resultan significativos. Si bien no puede hablarse del concepto de 'deriva' en una estructura de este tipo, el aci (Instituto Norteamericano del Concreto), recomienda un límite de desplazamiento en la punta correspondiente a aproximadamente 1/300 de la altura total, lo que supone un límite de 0,30 m para la chimenea en estudio. Los resultados del análisis estructural realizado arrojan un desplazamiento total máximo de 0,502 m para las combinaciones de carga prescritas en la norma (0,9 CMuerta + 1,0 SismoX + 0,30 SismoY), lo cual excede el requisito. El control de desplazamientos en una chimenea resulta importante por cuanto una deflexión excesiva puede incrementar la flexión en la base debido a los momentos secundarios. Los desplazamientos inelásticos causados por fuerzas sísmicas incrementan la demanda de ductilidad en la estructura, para lo cual se requiere garantizar el detallado adecuado de los empalmes y el desarrollo del refuerzo, así como el uso de cuantías límite que para el presente caso no fueron utilizadas.

De acuerdo con las características del detallado del refuerzo en la chimenea y su estado actual, se adoptó un coeficiente de disipación de energía  $R = 1,0$ . La mayoría de códigos internacionales (cicind, aci 307) recomiendan la utilización de coeficientes de reducción por ductilidad bajos, debido a la poca capacidad de disipación de energía de este tipo de

estructuras en las cuales no existe mayor redundancia. Aun cuando las chimeneas son elementos estructurales de baja ductilidad, puede generarse alguna capacidad de disipación mediante la adecuada disposición, confinamiento y traslapo del refuerzo, y el detallado alrededor de las aberturas, que constituyen potenciales puntos débiles en la geometría del elemento.<sup>3</sup>

En cuanto a la resistencia a la flexión, se analizó la capacidad de la estructura basada en la distribución y tamaño del refuerzo colocado según los planos del proyecto original. Se evaluó la resistencia a la flexión de la sección calculando la posición del eje neutro para las cuantías verticales suministradas en diferentes niveles, y se obtuvo el valor de Momento nominal ( $M_n$ ) para comparar contra el momento último causado por el sismo de diseño (fig. 7).

La figura 7 resume la relación entre resistencia a la flexión ( $\phi M_n$ ) y la demanda ( $M_u$ ) debido al sismo. Puede observarse que la resistencia de la chimenea se ve seriamente afectada por la presencia de las aberturas en el fuste entre los 8,50 y los 13,50 m de altura, lo cual genera unos sobreesfuerzos no cubiertos por el refuerzo colocado en dicha zona.

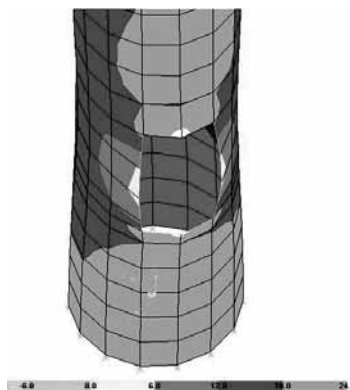


Figura 6. Esfuerzos circunferenciales debido al gradiente de temperatura en la base de la chimenea, kg/cm<sup>2</sup>.

### Resultados y conclusiones

El comportamiento estructural de la chimenea de Termotasajero S. A., está determinado por tres factores principales: su geometría y condiciones de fun-

3. Wilson, "Earthquake design and analysis of tall reinforced concrete chimneys".

cionamiento; las características de los materiales de construcción y diseño originales; y su respuesta dinámica ante fuerzas sísmicas.

En cuanto a la geometría y funcionamiento, las grandes aberturas en el fuste generan una zona en la que, debido a la pérdida de sección efectiva, se concentran los esfuerzos producto del gradiente térmico propio de la combustión de la planta, así como de todos los esfuerzos consecuencia de acciones externas (viento, sismo) sobre el fuste. Como criterio de diseño, las chimeneas deben considerar el tamaño y forma de las aberturas, así como la adición de elementos de transición y las especificaciones del recubrimiento interno para poder controlar al máximo los efectos adversos del gradiente térmico y las acciones externas en las zonas en la que la sección estructural es discontinua.

De acuerdo con los reportes de obra consultados y los análisis de las muestras de concreto extraídas, puede afirmarse que las condiciones constructivas, la composición de la mezcla y su proceso de curado, son la causa de fisuras tempranas por retracción. Este tema es especialmente delicado en elementos tan esbeltos y con espesores relativamente bajos, como la chimenea en estudio. Aun cuando las fisuras por retracción no comprometen la resistencia del elemento, constituyen la entrada de agentes externos que aceleran el deterioro de la estructura, facilitando fenómenos como la corrosión del refuerzo.<sup>4</sup>

La metodología de estudio empleada para el diagnóstico patológico y estructural de la chimenea sirvió para cuantificar las deficiencias en la durabilidad y la capacidad resistente de la estructura, y es el punto de partida para el diseño de una propuesta de reparación, reforzamiento y mantenimiento de la chimenea con miras a mejorar su nivel de servicio, incrementar su vida útil y disminuir su vulnerabilidad sísmica.


## Bibliografía

ACI 307-1995 "Standard Practice for the Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys", American Concrete Institute.

Muñoz, Harold A., "Estudio de evaluación, diagnóstico y especificaciones de mantenimiento y reparación de la estructura de concreto reforzado de la chimenea de la central térmica de Termotasajero - Cúcuta" (informe final), 2003.

Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS), 1998.

Rumman, Wadi S., "Reinforced Concrete Chimneys", Handbook of Concrete Engineering 2<sup>nd</sup> Edition, Nueva York, 1985.

Wilson, J., "Earthquake design and analysis of tall reinforced concrete chimneys", PhD Thesis, Dept. Of Civil and Environmental Engineering, University of Melbourne, 2000. 

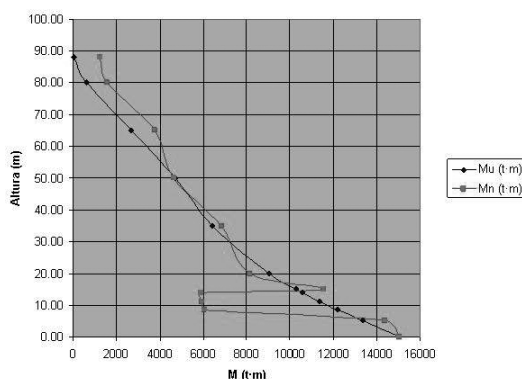


Figura 7. Demanda a flexión frente a momento resistente de la chimenea.

4. Muñoz, óp. cit.