

CIMENTACION DE UNA CHIMENEA DE 200 M DE ALTURA EN ROCA FLOJA COLAPSABLE

S. URIEL ROMERO

Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)
Universidad Politécnica de Madrid

F. AZCUE

J.M. VALENTI
INITEC

SINOPSIS

La chimenea de 200 m de altura de la Central Térmica Litoral de Almería está cimentada en una arenisca calcárea de muy baja densidad (alrededor de $1,55 \text{ T/m}^3$). La resistencia al corte, colapsabilidad y deformabilidad fueron estudiadas mediante ensayos de laboratorio e "in situ". La máxima carga admisible del terreno fue de 10 daN/cm^2 para tener suficiente coeficiente de seguridad para la rotura, debido a la tensión cortante o colapso. Los asentamientos medidos son muy cercanos a los resultados obtenidos con la placa de carga en dirección horizontal.

INTRODUCCION

La central eléctrica de Almería cuyo propietario es ENDESA, está localizada en Carboneras a 200 m del mar Mediterráneo. A esta región le corresponden terremotos de intensidad VIII y vientos con velocidades superiores a 100 Km/h .

Para evitar la contaminación del terreno, el humo se descarga a la atmósfera por medio de una chimenea de 200 m de altura. La sección de la chimenea es circular, con un diámetro exterior en la base de $19,50 \text{ m}$ y 12 m en la coronación (fig. 1). De acuerdo con los fenómenos naturales indicados anteriormente, las fuerzas transmitidas al terreno son:

Peso propio de la chimenea 10.500 T
Terremoto

Momento - 54.000 mT Cortante - 818 T
Viento

Momento - 33.000 mT Cortante - 322 T



FIGURA 1. Vista de la chimenea de 200 m de altura.

Teniendo en cuenta las condiciones especiales del terreno de cimentación, se diseñó una cimentación anular de 5 m de anchura y 24 m de diáme-

tro exterior. El objetivo principal de este informe es la justificación de la geometría indicada y el comportamiento del terreno de cimentación.

EL TERRENO DE CIMENTACION

El suelo en el que se cimenta la central corresponde al Mioceno Superior, teniendo una antigüedad de unos 6 millones de años. Las formaciones presentes en el emplazamiento son areniscas calcáreas en superficie y subyacentes estratos de margas y calizas de color blanco-amarillento. Más cerca del mar, el Mioceno está cubierto por sedimentos marinos cuaternarios, compuestos por arenas cuarcíticas y gravas.

La chimenea está localizada en el Mioceno, cerca del contacto con los suelos cuaternarios. El espesor total de los estratos de arenisca calcárea es alrededor de 23 m (Fig. 2). El nivel freático se sitúa 6 m por debajo del nivel de explanación de la central, coincidiendo con el nivel del mar próximo al emplazamiento. Prácticamente la única formación afectada por la transmisión de tensiones debidas a la chimenea, es la arenisca. A continuación se describe esta roca.

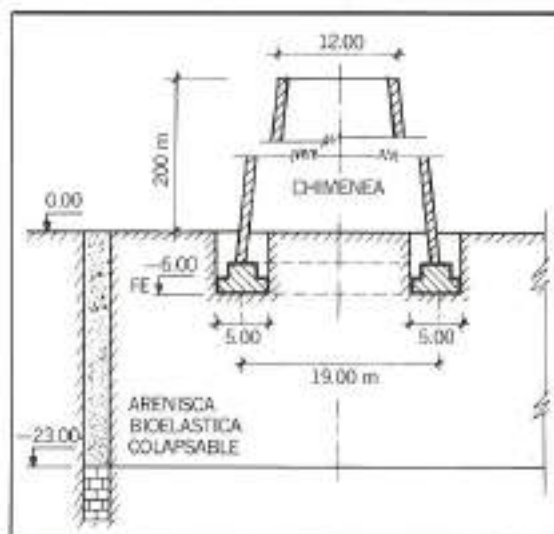


FIGURA 2. Sección marga-caliza esquemática de la chimenea y de la cimentación.

Los estudios petrográficos realizados en muestras indican que es una caliza biocelástica, compuesta por cristales de caliza y conchas unidas con cemento de precipitación química. Una de las principales características de la arenisca es su muy baja densidad seca, alrededor de 1,55 T/m³. El suelo se puede clasificar como un "suelo rígido" o "roca muy blanda", y por esta razón es probablemente susceptible de colapso tensional,

es decir una destrucción repentina de su estructura vacuolar cuando el campo de tensiones llega a cierto nivel, produciéndose a continuación grandes deformaciones. Generalmente la arenisca es masiva con muy pocas juntas. En cualquier caso, la mayoría de las juntas están actualmente soldadas, de la misma forma que la roca propiamente dicha. Esta baja densidad determina su fácil ripabilidad con equipos mecánicos modestos o con utensilios manuales. La cuchara de retroexcavadora fragmenta fácilmente la roca, y los dientes de la cuchara quedan claramente marcados en los taludes de la excavación (Fig. 3). Sin embargo, como se comentará posteriormente, es suficientemente elevada para admitir excavaciones de 40 m de altura con ángulo de talud con respecto a la horizontal de 60° (ver taludes en Fig. 1, detrás de la chimenea).

PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LA ARENISCA

La resistencia al corte, deformación y especialmente la colapsabilidad son los factores principales que determinan la morfología y las dimensiones de la estructura de cimentación. Se realizaron ensayos de laboratorio con muestras de sondeos y en bloques obtenidos en las paredes de excavaciones. Por otra parte se realizaron ensayos in situ para conocer la deformabilidad de la roca. En la tabla 1 se indican algunos de los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio.

La resistencia a compresión simple y colapso se investigaron por medio de ensayos triaxiales sin drenaje en muestra de 10 cm. de diámetro, con tres presiones laterales ($\sigma_3 = 0,15$ y 30 daN/cm²). Estos ensayos fueron completados con ensayos de colapso isotrópico en los que la muestra se somete a una presión homogénea creciente ($\sigma_1 = \sigma_3$) hasta obtener tensiones en las que se produce un cambio importante en la curva tensión-deformación, o sea la tensión isotrópica que destruye la estructura natural precedente.

Densidad seca	1,55 T/m ³
Porosidad	41%
Humedad	
— bajo nivel freático	24,7%
— sobre nivel freático	13%
Contenido en carbonato	75,2%
Resistencia a compresión simple	
— bajo nivel freático	14,0-23,0 daN/cm ²
— sobre nivel freático	18,5-26,0 daN/cm ²

CUADRO 1.



FIGURA 3. Excavación anular para la cimentación de la chimenea en arenisca calcárea.

En el ensayo de compresión simple ($\sigma_3=0$), la rotura es frágil, tal como ocurre en rocas blandas. La resistencia pico coincide con una deformación súbita de la muestra. Se observan uno o muchos planos de rotura y la probeta se divide en muchos fragmentos, cada uno de los cuales mantiene su estructura primitiva.

En el ensayo isotrópico ($\sigma_3=\sigma_1$) el colapso se marca claramente en el codo de la curva tensión-deformación. Se ensayaron siete muestras; el valor promedio de la tensión de colapso varió entre 48 y 61 daN/cm², con un valor medio de 57 daN/cm². (ver curva 4, Figs. 4 y 5).

Cuando $\sigma_3=30$ daN/cm² se nota claramente el colapso de la estructura natural, para una tensión desviadora ($\sigma_1=\sigma_3$) moderada, 21 daN/cm² tal como se indica (ver curva 3, Figs. 4 y 5).

Para $\sigma_3=15$ daN/cm², inicialmente para una tensión desviadora alrededor de 31 daN/cm² empezó el colapso y finalmente mostró una

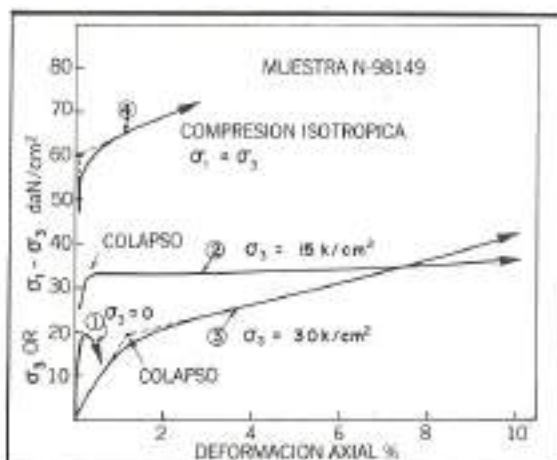


FIGURA 4. Curva tensión-deformación. Ensayo triaxial.

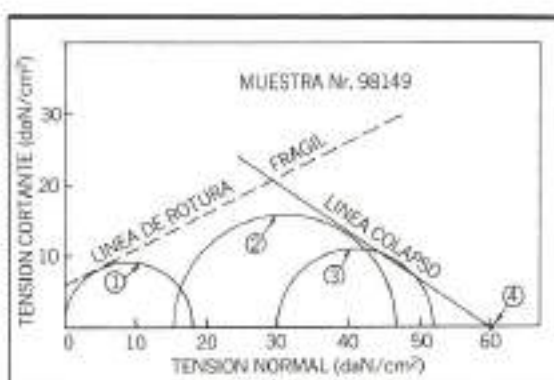


FIGURA 5. Circulos de Mohr para rotura frágil y colapso.

rotura plana clara, similar al tipo de rotura frágil (ver curva 2, Figs. 4 y 5).

Existen muchas teorías para explicar el colapso de rocas porosas flojas y suelos cementados (ver referencias) y las diferencias con la rotura frágil convencional. Se ha demostrado experimental y teóricamente que el colapso se produce cuando los enlaces entre las partículas de suelo o roca se rompen por compresión. En rotura frágil normal los lazos se rompen por corte. El colapso empieza cuando el círculo de Mohr de tensiones es tangente a una línea que pasa por un punto, que hemos llamado colapso isotrópico, con una pendiente negativa con un valor similar al ángulo de rozamiento interno convencional para rotura frágil. Las Figs. 4 y 5 muestran las relaciones tensión-deformación para los cuatro casos indicados anteriormente. Se han obtenido los siguientes resultados promediados:

Para rotura frágil

Cohesión 6,3 daN/cm²
Ángulo de rozamiento interno 22,5°

Para colapso

Colapso isotrópico 60 daN/cm²
Ángulo rozamiento interno negativo 22,5°

Para determinar la deformabilidad de la arenisca se realizaron ensayos de placa de carga circulares en dirección horizontal en las paredes de calicatas abiertas en las cercanías de la chimenea (Fig. 6). La carga en la placa se incrementaba en escalones de 2 daN/cm² hasta el valor máximo 76 daN/cm². Después del ciclo de descarga, se aplicaron 9 ciclos adicionales de carga entre 0 y 16 daN/cm². Un diagrama típico de carga deformación se presenta en la Fig. 7. De estos ensayos se deducen las siguientes conclusiones:

- En el primer ciclo de carga, la curva tensión-deformación presenta baja curvatura en las cercanías del origen, pero en el resto hasta la presión máxima el módulo de deformación es alto.
- A partir del 7º ciclo, la conducta del suelo es



FIGURA 6. Ensayo de deformabilidad horizontal ϕ 60 cm.

elástica y no se observa asiento permanente adicional.

C. Bajo el agua, sistemáticamente el módulo de deformación es mayor que el de encima del nivel freático. La relación promedio entre estos dos módulos es de alrededor de 0,5. Bajo el agua el suelo está saturado, y por tanto, los ensayos son parcialmente drenados. De estos ensayos, se consideraron los siguientes módulos para el diseño.

Para cargas verticales permanentes:

Entre 0-4 daN/cm² 40.000 daN/cm²

Entre 0-14 daN/cm² 16.700 daN/cm²

Para terremotos

Entre 0-10 daN/cm² 19.800 daN/cm²

Para viento

Entre 0-10 daN/cm² 15.000 daN/cm²

CAPACIDAD PORTANTE

Para el diseño se deben examinar dos puntos: coeficiente de seguridad frente a la rotura por colapso o frágil y movimientos esperados durante circunstancias normales y extraordinarias.

En relación con la rotura frágil, los parámetros que definen la resistencia al corte son muy altos. La resistencia a compresión simple (20 daN/cm²) o la resistencia triaxial ($c = 6$ daN/cm²,

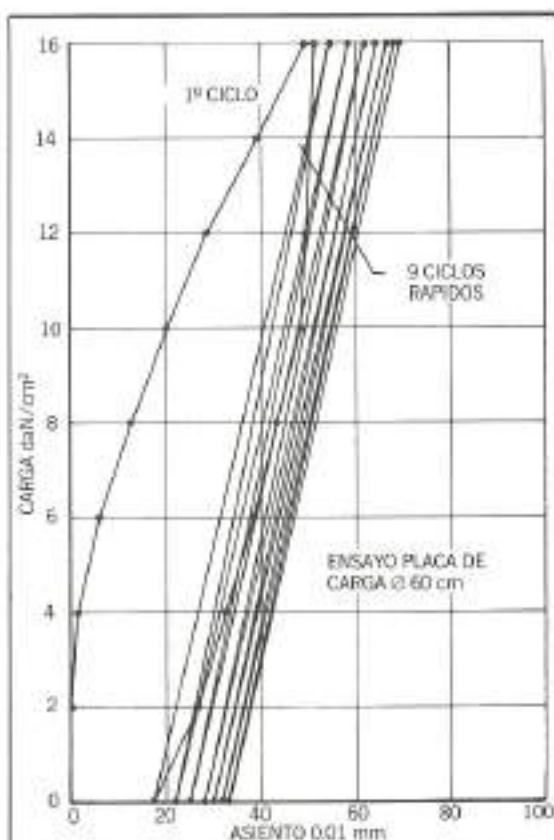


FIGURA 7. Diagrama típico del ensayo de placa de carga.

$\phi = 22,5^\circ$), admite presiones en el terreno mayores que 20 daN/cm², con un coeficiente de seguridad igual o mayor a 3.

Sin embargo, la rotura por colapso es más restrictiva. No hay reglas para cálculos respecto a esta posibilidad. En las Islas Canarias, muchas estructuras están cimentadas en suelos volcánicos colapsables, y es práctica habitual, en proyectos importantes adoptar para capacidades portantes un coeficiente de seguridad 5, ó sea la tensión principal mayor debe ser 1/5 de tensión isotrópica de colapso. Aunque parece un valor pesimista hay que tener en cuenta muchas circunstancias que conducen a tomar un coeficiente de seguridad prudente. Además existe la posibilidad de concentración de tensiones en las esquinas de estructuras de cimentación rígidas.

En contacto con suelos más deformables, las tensiones en los bordes de las cimentaciones pueden ser varias veces superiores a la carga admisible del terreno. Por esto el colapso puede empezar en estas zonas, probablemente en pequeñas extensiones con un incremento hacia el centro de la cimentación. Con estos criterios se fijó una

carga admisible de 11 daN/cm². Para la chimenea se diseñó un anillo de 5 m de anchura y 24 m de diámetro exterior. Para las cargas debidas a terremotos y viento la presión máxima podría ser 10,2 daN/cm², y la inclinación de la chimenea no más de 3×10^{-4} .

ASIENTOS OBSERVADOS DESPUES DE LA CONSTRUCCION

Los asientos observados durante la construcción se hallan en la Fig. 8. Los primeros movimientos se midieron cuando la chimenea tenía 70 m de altura, y la presión en la cimentación alrededor de 1,5 daN/cm². El asiento entre 0 y 1,5 daN/cm² fue extrapolado. Entre 1,5 y 3,5 daN/cm² el asiento medido fue de 6 mm con un error ± 1 mm. El asiento total fue estimado en 11 mm.

El valor calculado con un módulo de deformación de 40.000 daN/cm² fue 10,1 mm.

Cuando la chimenea estaba casi completamente construida (ver Fig. 8) se produjo en la región un terremoto de grado IV. La medición siguiente indicó un comportamiento elástico del suelo, y no se registraron asientos adicionales.

CONCLUSIONES

En el caso expuesto de una chimenea de gran altura cimentada en un terreno colapsable, de baja densidad, 1,55 T/m³; la deformabilidad del suelo está de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de placa de carga en dirección horizontal.

RECONOCIMIENTOS

Estamos muy agradecidos a la Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA) y especialmente a D.

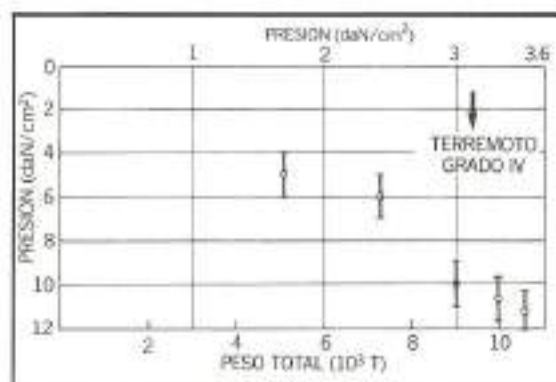


FIGURA 8. Asientos medidos en la chimenea.

Emilio de la Loma por el permiso para publicar los datos indicados en el informe.

REFERENCIAS

- Uriel Romero, S. (1982). "Le phénomène d'affondrement dans les roches volcaniques à forte porosité". *Revue Française de Géotechnique* N. 20, p. 65-77.
- Uriel Romero, S. and Serrano A.A. (1973). "Geotechnical properties of two collapsible soils of low bulk density at the site of two dams in Canary Islands". 8th Congress ISSMFE, Moscú, Vol. I, p. 257-264.
- Uriel Romero, S. and Bravo, B. (1971). "La rotura frágil y plástica en un aglomerado volcánico de Las Palmas de Gran Canaria". I Congreso Hispano-Luso-Americano de geología económica. Madrid.
- Uriel Romero, S. and Bravo, B. (1970). "Brittle and plastic failure of rocks". II Congreso de ISRM. Beograd.
- Uriel Romero, S. (1977). "Tests to investigate the deformability of overconsolidated clayey soil". 2nd Congress of the International Association of Engineering Geology. Madrid.



Un aliado
muy rentable.

Motobasculantes



14 Modelos de 1000 a 3000 Kgs.
Diferentes sistemas de descarga.
Tracción a 2 y 4 ruedas.



Carretillas Elevadoras

De 1000 a 2500 Kgs.



Pala Cargadora

Modelo standard: 400 litros.
Versiones con pinzas para troncos,
retro excavadora, etc.



Auto- hormigonera

Capacidad de amasada: 750 litros.



APART. P.O.B. 194
TEL. (93) 874 73 11
TELEX 53102 AUDU E
MANRESA (Barcelona) ESPAÑA
