

Causa de la rotura y distribución de chimeneas carbonatadas en la Dorsal de Guadalquivir y en el Canal de Cádiz (Margen Continental Sudportugués)

Rupture and distribution causes of carbonate chimneys in the Guadalquivir Ridge and Cadiz Channel (Sub Portuguese Continental Margin)

G. Jané¹, A. Maestro¹, J.J. Martínez Díaz², M.A. Rodríguez Pascua¹, J. García Mayordomo¹,
B. Fernández Revuelta³, L. Somoza¹ y V. Díaz del Río⁴

1 Dpto. de Investigación y Prospectiva Geocientífica., IGME. 28003 Madrid g.jane@igme.es

2 Dpto. Geodinámica Interna, Fac. CC. Geológicas, Univ. Complutense de Madrid. 28040 Madrid

3 Dpto. de Infraestructura Geocientífica y Servicios, IGME. 28003 Madrid

4 Centro de Oceanografía de Málaga, IEO. 29640 Fuengirola, Málaga

Resumen: A lo largo del Canal y Dorsal de Cádiz se ha observado la existencia de numerosas chimeneas carbonatadas con evidencias de rotura por flexo-tracción en su base. Este trabajo aborda el análisis de la distribución espacial y las características mecánicas de las chimeneas con el objeto de determinar la causa de la rotura. Se han considerado como posibles causas de la rotura el empuje debido a la Corriente Mediterránea de Salida que se canaliza a través del Canal de Cádiz o la inercia asociada al movimiento del terreno debido a un evento sísmico. La orientación preferente de caída de las chimeneas, así como el resultado del cálculo de la velocidad del flujo y de la aceleración del terreno necesaria para provocar la rotura en base a las características mecánicas de las mismas sugiere que su rotura pudo ser causada por un terremoto de Mw entre 5,7 a 7,0.

Palabras clave: chimeneas carbonatadas, ensayos geotécnicos, Corriente Mediterránea de Salida, evento sísmico, Golfo de Cádiz.

Abstract: *The existence of carbonate chimneys with evidence of basal flexo-traction crack has been observed along the Cadiz Contourite Channel and Cadiz Diapiric Ridge. This research aims the study of spatial distribution and the mechanical characteristics of the chimneys for determining their rupture cause. The Mediterranean Outflow Water along the Cadiz Channel or inertia force due to ground oscillatory movement related to a seismic event could be responsible for the chimneys rupture. Considering the preferential orientation of the broken chimneys and the results obtained from estimating flow speed and ground acceleration, according to their mechanical behaviour, the occurrence of a Mw 5,7-7,0 earthquake can be suggested as the most probable cause.*

Key words: *carbonate chimneys, geotechnical test, Mediterranean Outflow Water, seismic event, Gulf of Cadiz.*

INTRODUCCIÓN

En el sector central del talud medio del Golfo de Cádiz fueron descubiertas durante la campaña Anastasya 2000, realizada en el marco del proyecto TASYO, chimeneas carbonatadas asociadas a emisiones de fluidos ricos en hidrocarburos. Estas estructuras presentan un desarrollo vertical, sin embargo, actualmente, se encuentran, mayoritariamente, en posición horizontal apoyadas sobre el fondo marino con evidencias de rotura por flexo-tracción en su base.

El objetivo de este trabajo es determinar la causa de la rotura de las chimeneas carbonatadas en base al estudio de su distribución espacial y de sus características mecánicas.

MARCO OCEANOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

El área de estudio de este trabajo queda enmarcada en la parte central del talud medio del Golfo de Cádiz, en un área cuyos rasgos morfológicos más relevantes son el Canal de Cádiz y la Dorsal Diapírica del Guadalquivir de dirección NE-SO (Fig.1). En esta zona confluyen importantes procesos oceanográficos, sedimentarios y tectónicos, cuya dinámica queda patente en su fisiografía, arquitectura sedimentaria, morfoestructura y sismicidad.

Desde el punto de vista oceanográfico este sector constituye un área donde interaccionan la corriente atlántica entrante y la masa de agua mediterránea de salida, que se desplaza a lo largo del talud medio y superior, interaccionando con la superficie del fondo dando lugar a morfologías en la que predominan elementos derivados de la erosión (canales) y la sedimentación (depósitos contorníticos).

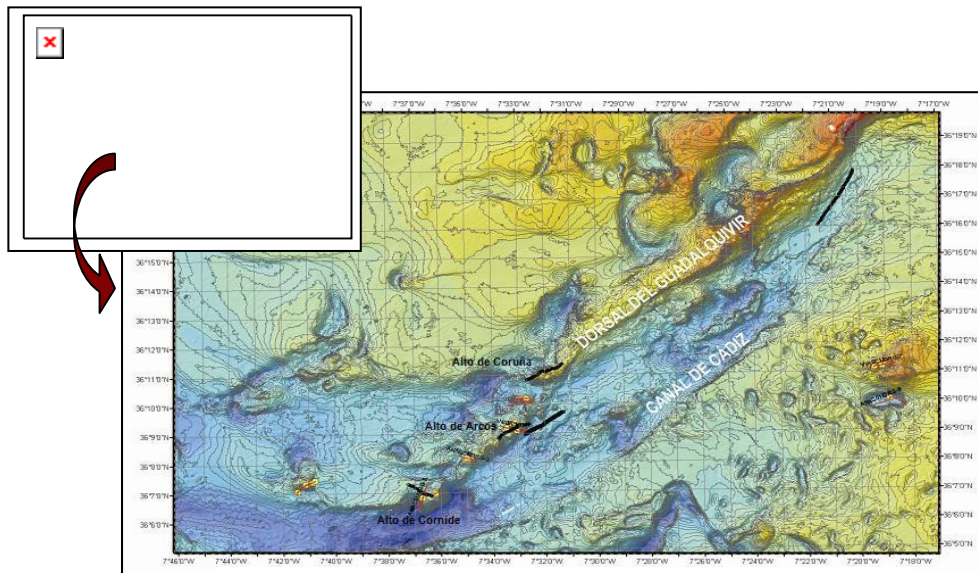


FIGURA 1. Mapa de localización del área de estudio

La evolución geológica de esta área está controlada por la evolución del orógeno Bético-Rifeño, situado en su extremo oriental, así como por los movimientos de convergencia entre las placas euroasiática y africana, a través de la Zona de Fractura de Azores Gibraltar, que quedan reflejados en la estructura, morfología y sismicidad de la zona. Los rasgos estructurales predominantes del margen continental del Golfo de Cádiz son los sistemas de fallas de direcciones NE-SO a ONO-ESE, además de una serie de fallas extensionales de dirección NNO-SSE. Entre los rasgos morfológicos de carácter tectónico más importantes del margen cabe destacar la presencia de montes y cañones submarinos y umbrales diapíricos, que muestran un claro carácter compresivo del margen con orientación NNO-SSE. La sismicidad de este margen es de tipo somero a intermedio. En el análisis de la distribución de los epicentros se observan tres tendencias: NE-SO, que se relacionan con los bancos del Guadalquivir y de Goringe y el Cañón de San Vicente; ONO-ESE, asociada a los sistemas de Goringe-La Herradura y del Coral Patch Ridge; y N-S, con el Cañón de Portimao

METODOLOGÍA

El estudio de distribución de las chimeneas carbonatadas se ha abordado a partir del análisis sistemático de 1798 fotografías submarinas realizadas durante la campaña Anastasya 2001 (Fig. 2). Las observaciones se han llevado a cabo a lo largo de cinco transectos situados en el Canal de Cádiz y sobre una serie de relieves localizados en el sector suroccidental de la Dorsal Diapírica del Guadalquivir denominados Cornide, Coruña y Arcos. Se han identificado varios elementos lineales que han permitido establecer algunos de los caracteres tectónicos y oceanográficos de este sector. En concreto, el análisis direccional se ha realizado sobre tres elementos lineales: eje largo de las

chimeneas carbonatadas que se disponen horizontales sobre el fondo, crestas de los *ripples* y fracturas.

Por otro lado, se han realizado ensayos en el laboratorio sobre algunas muestras recogidas durante la campaña para determinar el comportamiento mecánico de estas estructuras. Se ha determinado la densidad aparente, porosidad abierta, velocidad de propagación del sonido, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidad dinámico y resistencia a la compresión y a la flexión.



FIGURA 2. Fotografía submarina donde se observan las chimeneas dispuestas horizontalmente sobre el fondo.

RESULTADOS

El análisis de la distribución espacial de las chimeneas a partir de las fotografías submarinas muestran una dirección espacial regular según una dirección NO-SE con una dispersión media de unos 50°, y que muestran una disposición más aleatoria a medida que aumenta su longitud, siendo de carácter bimodal o multimodal a partir de los 30 cm. (Fig. 3).

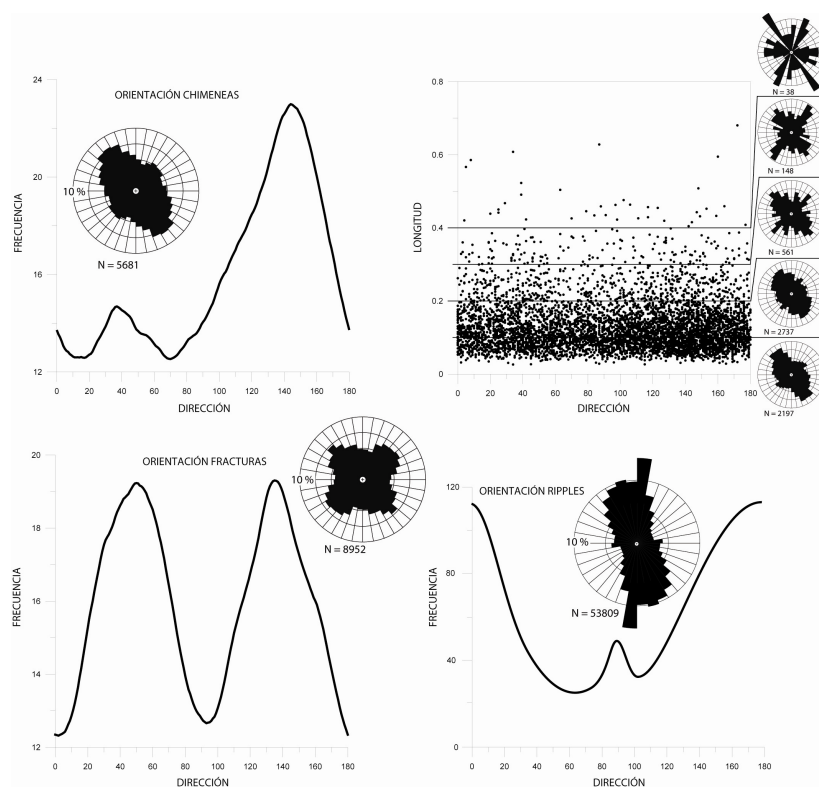


FIGURA 3. Análisis de elementos lineales de la zona de estudio.

Los ensayos mecánicos han establecido que los valores medios de densidad aparente de estas estructuras es de 2266 kg/m^3 , de V_s es 2 km/s y de V_p es de $3,7 \text{ km/s}$, el coeficiente de Poisson es de $0,29$, del módulo de elasticidad (E) es de 24 GPa , la resistencia a la compresión 56 MPa y a la flexión $4,6 \text{ MPa}$.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Del estudio del comportamiento mecánico de los elementos, la fuerza que ejerce cada una de las causas de rotura que se considera y la distribución espacial que ocasionaría la acción de estas fuerzas se deduce:

1) La velocidad media del flujo necesaria para romper las chimeneas es de 139 m/s , muy superior a la velocidad de la Corriente Mediterránea de Salida observada en esta zona que es de aproximadamente $0,8 \text{ m/s}$ (García-García, 2002). Si la rotura se debiera al empuje de la corriente, las chimeneas deberían presentar una distribución NE-SO, paralela a la dirección de ésta, según los datos bibliográficos y de orientación de las crestas de *ripples* de corriente observadas en las fotografías submarinas, sin embargo presentan una orientación oblicua, siendo en la mayoría de los casos perpendicular.

2) Si consideramos la rotura debida a un evento sísmico, el parámetro de amplitud más representativo del daño será la aceleración máxima horizontal para periodo cero segundos, lo que se denomina aceleración pico (o Peak Ground Acceleration, PGA). Inicialmente se calculó el valor del PGA asemejando el comportamiento de la chimenea con una viga empotrada donde se aplica el esfuerzo de flexión en la

parte central de su longitud, y únicamente se considera la resistencia a la flexión-tracción del material y las dimensiones del objeto. La aceleración necesaria para romper las chimeneas por flexión varía entre $11g$ y $162g$, con un valor medio de $44g$. Dado que los cálculos aplicados suponen que las chimeneas son cuerpos cilíndricos perfectos, y por el contrario, su superficie presenta importantes irregularidades, se consideró como coeficiente reductor de la aceleración necesaria para la rotura el efecto de las concentraciones de esfuerzos en las rugosidades de la superficie de la chimenea. Una vez aplicado este coeficiente reductor los valores de PGA cuando el esfuerzo se aplica cerca del ápice varían entre $2g$ y $126g$, con un valor medio de $25g$. En ambas situaciones la enorme simplificación del modelo da lugar a valores excesivamente elevados de la aceleración necesaria para la rotura difícilmente ajustable con un evento sísmico real. Por ello ha sido necesario buscar otros factores amplificadores de la aceleración sísmica e introducirlos en nuestra ecuación. En este trabajo se propone un modelo de rotura de una chimenea carbonatada en la que ésta se va a semejar a una viga empotrada sometida a un esfuerzo de flexión pura y donde la rotura se produce en el empotramiento. Para desarrollar este modelo partimos de las siguientes premisas: (1) Se va a considerar la chimenea como un cilindro perfecto de superficie exterior lisa; (2) El efecto del terremoto se va a simplificar teniendo en cuenta únicamente un desplazamiento horizontal del suelo en una única dirección, desde la posición inicial de la chimenea hasta un punto de desplazamiento máximo, que vamos a modelizar como un movimiento armónico simple, y que dependerá del periodo característico del terreno; y (3) La chimenea se desplaza dentro de un fluido a gran velocidad, lo que

supone la existencia de un flujo turbulento que variará en función de la viscosidad y densidad del agua. Para un valor del periodo característico del terreno de 6 s, obtenido a partir de información de sondeos, las chimeneas sufren un desplazamiento máximo de su posición inicial entre 4 m y 12 m, con un valor medio de 8 m, las aceleraciones que produce este movimiento están comprendidas entre 0,4g a 1,29g, con un valor medio de 0,9g, y la velocidad del desplazamiento está comprendida entre 4 m/s y 12 m/s, con un valor medio de 9 m/s. A pesar que estos cálculos dan resultados coherentes, es necesario remarcar que el modelo que se presenta sigue siendo una simplificación importante del problema y es poco realista suponer, teniendo en cuenta el valor del periodo característico del terreno obtenido, que se hubiera dado una amplificación por resonancia. Por ello, teniendo en cuenta que sin lugar a dudas hubo un fenómeno de amplificación, hay que seguir considerando que éste no se debe únicamente a las características geológicas de la zona, si no que es necesario acudir a otras causas que lo explique como por ejemplo el efecto topográfico.

Una vez determinado el valor del PGA, se han seleccionado las funciones de atenuación, para obtener pares magnitud-distancia, propuestas por Ambraseys *et al.* (1996), Ambraseys y Douglas (2003) y Ambraseys *et al.* (2005). El criterio general de selección de funciones de atenuación ha sido que provengan de terremotos corticales ($h < 30$ km), que contengan un gran número de registros de terremotos grandes, a distancias cortas y en emplazamientos de terreno blando. Teniendo en cuenta que estas funciones de atenuación no tienen en cuenta el efecto topográfico, con lo que no conviene considerar aceleraciones que pudieran estar relacionadas con este efecto, y proveen valores promedio, por lo que no conviene considerar aceleraciones extremas, tomaremos como aceleración de referencia del sismo que causó la rotura de las chimeneas 0,8g ($7,8 \text{ m/s}^2$). Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de estas ecuaciones son posibles dos soluciones que concuerdan con la información de actividad sísmica existente en la actualidad en la zona de estudio:

1. Terremoto de magnitud Mw ó Ms mayor o igual a 7,0 en un radio de distancia más corta a la proyección en superficie de la falla de unos 4 km. La probabilidad de que se trate de esta posibilidad es de un 50% (considerando únicamente la incertidumbre proveniente del empleo de las funciones de atenuación).

2. Terremoto de magnitud Mw ó Ms mayor o igual de 5,7 en el lugar donde se localizan las chimeneas. Es un caso extremo, para dar un umbral mínimo de magnitud. La probabilidad en este caso es de aproximadamente 84%.

En función de estos datos podemos definir, aplicando las ecuaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994), que para el caso de un terremoto de $M_w \geq 7,0$ la rotura en superficie tendría que ser al

menos de 40 km (+28/-17), y para el caso de Mw ó Ms $\geq 5,7$ la rotura en superficie tendría que ser al menos de 5 km (+4/-2).

Por otro lado, la caída en una orientación NO-SE de las chimeneas también se puede relacionar con un evento sísmico. Éstas se orientan a favor de la dirección del rayo sísmico y paralelas a la estría de la falla cuando están muy próximas a él. Se ha calculado la dirección de la estría de falla teórica a partir del análisis de los mecanismos focales de terremotos ocurridos en el Golfo de Cádiz, presentando una orientación media N135°E. Las dispersiones en la distribución observadas, y que son más evidentes a medida que las dimensiones de las chimeneas son mayores pueden correlacionarse con irregularidades del sustrato o procesos de colisión de unas chimeneas con otras durante la caída.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio queda enmarcado dentro del proyecto Eurocore-Euromargins 01-LEC-EMA06F (REN2002-11668-E-MAR) titulado *Exploración de arrecifes carbonatados profundos asociados a emisiones de hidrocarburos en los márgenes continentales europeos*, del proyecto Eurocore-Euromargins 01-LEC-EMA24F (REN2002-11669-E-MAR) titulado *Control tectónico, estructura profunda y emisiones submarinas de hidrocarburos en el Golfo de Cádiz*, y del proyecto CONSOLIDER-INGENIO 2010 (CSD2006-0041) titulado *Geociencias en Iberia: Estudios integrados de topografía y evolución 4D (TOPO-IBERIA)*.

REFERENCIAS

- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A. y Bommer, J. J. (1996): Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25: 371-400.
- Ambraseys, N.N. y Douglas, J. (2003): Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23: 1-18.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. y Smit, P.M. (2005): Equations for the estimation of ground motion from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 37: 1-53.
- García-García, M. (2002): *Caracterización morfológica del sistema de canales y valles submarinos del talud medio del Golfo de Cádiz (SO de la Península Ibérica): Implicaciones oceanográficas*. Tesis de Licenciatura, Facultad Ciencias del Mar, Universidad de Cádiz, 114 p.
- Wells, D.L. y Coppersmith, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4): 974-1002.