



Ingeniería para la prevención del colapso de cavernas en zonas cársticas

Un paisaje cárstico tiene una gran variabilidad de estructuras internas dentro de las calizas, lo que a su vez produce una alta variabilidad en la estabilidad de las cavernas.



En todo el mundo, las grietas y conductos en el subsuelo de las zonas cársticas conforman su rasgo geomorfológico más común.

Estos resultan de la disolución de roca caliza, producto del proceso erosivo a través de los años impuesto por el agua combinada con materia orgánica en descomposición y sales, cuya mezcla tiene el potencial de acelerar la disolución de la roca para conformar huecos y cavernas de diferentes tamaños que incluso pueden llegar a tener las dimensiones para ser accesibles al ser humano. Por esta razón, uno de los riesgos geológicos más comunes en estas zonas es justamente el asociado al colapso gravitacional del techo de las cavernas de roca sobre sí mismas, sea este resultado de un proceso erosivo natural o por la imposición de un peso extrínseco sobre el techo que excede su capacidad de carga. De esta manera, el riesgo de colapso se vuelve una amenaza real para la industria de la construcción, especialmente cuando se conoce la presencia de cuevas de grandes dimensiones.

El tamaño del claro del techo en una cueva natural de roca tiene un elemento de inestabilidad inherente, algunas cuevas tienen forma de túneles cilíndricos que se han desarrollado con el paso de los años, en escalas de tiempo geológicas, por lo que sabemos que sus techos han conformado un arco estable constituido por roca sana y sólida con menos posibilidad de falla. Sin embargo, también sabemos que la falla progresiva de los techos de estas cavernas conforma un proceso natural en la evolución geológica de este tipo de paisajes, especialmente cuando los procesos de disolución de la roca migran hacia arriba, pues se incrementa el tamaño de la cueva a costa de reducir el grosor de su techo, hasta que se produce un colapso del mismo, dando lugar a un socavón (Sowers 1996; Waltham



et al., 2005). En el paisaje cárstico de la península de Yucatán, estos rasgos geológicos son conocidos como cenotes.

El posible nacimiento de un socavón o cenote es detectable a través de las depresiones o hundimientos circulares que se aprecian en el paisaje de la superficie de un suelo cárstico, y que los geomorfólogos denominan dolinas. El colapso de las dolinas resulta de la caída de los techos de las cavernas, situación poco común y que resulta extremadamente rara sin la imposición de una carga externa sobre el techo de la caverna. En un suelo cárstico, los mecanismos y velocidades a las que ocurre una falla del techo de una caverna dependen en gran medida de la integridad de la roca que conforma el techo, es decir, de su densidad y características del macizo rocoso. Por ejemplo, se acepta que, en calizas horizontales con poca perturbación, el techo de una caverna tiene el potencial de fallar y colapsar cuando la anchura de la caverna excede entre 10 y 20 veces el grosor de su techo (aunque estos números son generalizaciones de muy diversas situaciones y procesos, ver (Waltham, et al., 2005). Por ejemplo, cavernas con su techo apoyado solo en uno de sus extremos (cantiléver) reducen mucho su capacidad de supervivencia, mientras que aquellas en las que sus techos están apoyados en ambos extremos y sus desplazamientos están reducidos, naturalmente conforman un arco que sigue las líneas de compresión natural al interior de la roca y que está inducido por los esfuerzos de compresión. Por esta razón, a pesar de que su geometría no es perfecta, algunos techos de cavernas en roca cárstica reproducen la estabilidad de una dovela de arco, el proceso constructivo romano cuyo diseño por compresión no requiere de ningún material cementante. Sin embargo, en roca no sana o sólida, con diversas fisuras o con la presencia de diversas fracturas inclinadas, es posible que se produzcan serias inestabilidades que deriven en un colapso.

Un paisaje cárstico tiene una gran variabilidad de estructuras internas dentro de las calizas, lo que a su vez produce una alta variabilidad en la estabilidad de las cavernas. Existen estudios geológicos que a partir del modelado numérico han determinado que, bajo condiciones de carga impuesta, el grosor del techo de las cavernas es un parámetro determinante para conocer el riesgo de colapso (Kornik, 2002), aunado a la condición geológica de la roca, en particular su densidad y el número de fracturas internas (Zhu y Chen, 2005).

Los colapsos o socavones generados por actividades humanas en terrenos cársticos (denominados también colapsos antropogénicos) son una amenaza largamente reconocida para la construcción de cualquier tipo de estructuras: vías de comunicación, edificios, casas, etc. Sin embargo, se sabe también que, por lo general, la gran mayoría de las cuevas se presentan a profundidades que son irrelevantes para los trabajos de ingeniería que se dan en la superficie, esto se debe a que los techos de estas cuevas son lo suficientemente gruesos y mucho mayores a la anchura de la misma, lo que les da la capacidad de soportar las cargas impuestas en superficie (Sowers, 1996).

De esta manera, en zonas cársticas, un parámetro ingenieril fundamental para determinar la estabilidad de una cueva es la relación que existe entre el grosor su techo y la anchura de esta (t/w , por las siglas en inglés de thickness/width). Como regla general, y del lado conservador, se acepta que una caverna es estable y puede ser "ignorada" por un constructor, cuando el grosor de su techo excede su anchura.

El conocimiento que nos ha permitido llegar a este tipo de reglas no ha estado exento en el pasado de que algunas construcciones se hicieran sobre techos de cavernas muy delgados. Es el caso de la carretera principal que va a Palermo en Sicilia, Italia, que varios años después de ser construida documentó la presencia de una cueva con $t/w = 0.1$ (Jappelli y Liguori, 1979). Una vez descubierta esta



cavidad, se hicieron estudios geológicos de detalle que determinaron que esta cueva no era segura; sin embargo, es posible que su supervivencia se diera a pesar de la carga impuesta por la carretera gracias a la distribución de esfuerzos en el concreto reforzado de la carretera misma. En diversas zonas cársticas del mundo (notablemente en Croacia y China) existen casas y localidades enteras ubicadas sobre cavernas con ríos subterráneos. Para fortuna de ellos, la mayoría de los techos de estas cuevas son muy grandes y no representan un riesgo.

En contraste, existen también registros de colapso estructural de cavernas sobre la que se ha construido infraestructura diversa. Por ejemplo, en 2004, en Tampa, Florida, Estados Unidos, se generó un socavón de 5 m de profundidad en una carretera que se encontraba sobre una cueva que no había sido advertida y cuyo grosor de techo solo había sido sondeado hasta los 3 m de profundidad, lo que era claramente inadecuado para las condiciones morfológicas del sitio (p. ej. roca caliza) (Kambesis y Brucker, 2005).

Por estas razones, las obras de ingeniería civil en zonas cársticas requieren seguir recomendaciones para la definición de una relación entre grosor y anchura de la cueva que garantice tanto su integridad física como la seguridad de la infraestructura que se desea construir sobre ellas. Además, existe otro parámetro de importancia a considerar, el que define la solidez geológica de la roca o macizo rocoso. Este parámetro, llamado calificación de la masa rocosa (Rock Mass Rating), identificado como RMR por sus siglas en inglés, relaciona la calidad de la roca obtenida por medio de información proveniente de sondeos directos, con aquella relativa a las fracturas internas (p. ej. orientación, espaciamiento) (Bieniawski, 1973). De esta manera, valores de RMR en un rango de más de 80 representan rocas de muy buena calidad (p. ej. buena capacidad de carga), mientras que un valor de RMR menor a 20 indica mala calidad de la roca (p. ej. poca capacidad de carga o mayor riesgo de falla).

En la literatura, y para zonas cársticas como la península de Yucatán, la piedra caliza tiene asociados valores de RMR en el rango entre 30 y 40. Este valor de RMR permite sugerir para terrenos cársticos un valor seguro para la relación de grosor de techo/anchura de caverna de 0.5, lo que se traduce en que el grosor de la caverna sobre la que se desea construir debe ser al menos de la mitad de la anchura de la misma caverna ($t = w/2$) (Asef et al., 2000).

Es evidente, entonces, que, para la construcción de cualquier tipo de infraestructura sobre zonas cársticas con cavernas rocosas, es necesaria la implementación de un programa de sondeos directos e indirectos que nos permita conocer el número, la ubicación y dimensiones de las cavernas más cercanas a la superficie terrestre, de tal suerte que se pueda construir de manera segura la infraestructura sobre este tipo de terreno. En otras palabras, es posible la construcción de cualquier tipo de infraestructura sobre zonas cársticas, pero se requiere utilizar las mejores prácticas derivadas de la ingeniería.

En el proyecto del Tren Maya, y en particular en su tramo 5 sur, de Playa del Carmen a Tulum, se tienen documentados por diversas fuentes de información, 1 150 cenotes y varios sistemas de ríos subterráneos que se extienden a lo largo del subsuelo de la península de Yucatán. Entre los más conocidos y explorados por los espeleólogos submarinos está el sistema de Sac Actún en la región de Tulum, o el que se encuentra en Playa del Carmen. Esto ha generado diversas dudas entre algunos sectores de la población sobre el riesgo a la integridad de estos sistemas por la construcción del tren. Como se ha documentado en esta columna, existen las herramientas ingenieriles que permiten la construcción segura en este tipo de regiones, y que resultan de la experiencia mundial del ejercicio de la ingeniería.



Por estas razones, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua se han diseñado las recomendaciones basadas en parámetros provenientes de la literatura científica, al mismo tiempo que se han hecho recomendaciones respecto a la planeación del programa de sondeos directos e indirectos (p. ej. georadar) a lo largo del tramo 5 sur. Por ejemplo, proponiendo un programa de tres sondeos directos (al centro y extremos del paso de vía del tren) a cada 250 m a lo largo del trazo, que permitirá conocer la realidad geológica del sitio a una muy alta resolución espacial. Adicionalmente, esto nos permitirá identificar no solo las cavernas que se conocen y se tienen ubicadas (grosor y anchura de las cavernas bajo el paso del tren), sino también aquellas que no se han descubierto y cuya existencia se desconoce. Así, de la mano de un proyecto prioritario se ampliará el conocimiento del paisaje cárstico en esta zona y se utilizará este conocimiento para protegerlo y conservarlo.

Por si esto fuera poco, en caso de encontrar algún rastro de cavidad o caverna con los sondeos directos e indirectos, se sugiere la ampliación del programa de sondeos directos al menos a seis sondeos transversales al trazo (entre los extremos del paso de vía) y a cada 25 m. En todos los casos, la profundidad sugerida para los sondeos directos es de 15 m. Con esta sencilla recomendación garantizamos el cuidado del paisaje cárstico, al mismo tiempo que se garantiza la conservación de estos sistemas tan importantes y apreciados en nuestro país.

Referencias

- ASEF, M. R., REDDISH, D. J. & LLOYD, P. W. 2000. Rock-support interaction analysis based on numerical modelling. *Geotechnical Geological Engineering*, 18, 23-37.
- BIENIAWSKI, Z. T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of the South African Institute of Civil Engineers*, 15, 335-343.
- JAPPELLI, R. & LIGUORI, V. 1979. An unusually complex underground cavity. In: *Proceedings of the International Symposium on Geotechnics of Structurally Complex Formations, Volume 2*. Associazione Geotecnica Italiana, Rome, 79-90.
- KAMBESIS, P. & BRUCKER, R. 2005. Collapse sinkhole at Dishman Lane, Kentucky. In: WALTHAM, T., BELL, F. & CULSHAW, M. (eds) *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering Construction*. Springer, Berlin, 277-282.
- KORTNIK, J. 2002. Stability appraisal of the Medvedova Konta pothole. *International Journal of Speleology*, 31, 129-135.
- SOWERS, G. F. 1996. *Building on sinkholes*. ASCE Press, New York.
- WALTHAM, A. C. & FOOKES, P. G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101-118.
- WALTHAM, A. C. & SWIFT, G. M. 2004. Bearing capacity of rock over mined cavities in Nottingham. *Engineering Geology*, 75, 15-31.
- WALTHAM, T. BELL, F. & CULSHAW, M. 2005. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer, Berlin.
- ZHU, X. & CHEN, W. 2005. Tiankengs in the karst of China. *Cave & Karst Science*, 32, 55-66.