

05-016

Efficiency Study of air-conditioning systems in deep subsurface cavities through the transient analysis of geothermal gradient

Eva Martínez García; Juan Pedro Solano Fernandez; Juan Pedro Luna Abad

Universidad Politécnica de Cartagena;

Nowadays, raw materials and critical raw materials shortage and their difficult obtaining for supplying economic consumption requirements, supposes a high increase in the depth of subsurface mines.

Air-conditioning system is essential for optimum development of health and safety labours in this mines, being one of the most important operating costs.

In this work, conjugated heat transfer phenomena in the host rock-drift system, produced by geothermal gradient, will be studied with computational fluid dynamics tools. The contributed thermal loads caused by this heat flux into the subsurface cavities, will be calculated as well as their influence on the air-conditioning requests for a given period. It's also characterized the influence of low conductivity materials used for drift coating.

Keywords: Deep subsurface mines; CFD; transient analysis; efficiency; air-conditioning systems; low conductivity coating.

Estudio de eficiencia de la climatización en cavidades subterráneas profundas mediante el análisis transitorio del gradiente geotérmico

En la actualidad, la escasez y dificultad de obtención de los minerales primarios y los minerales primarios críticos para suplir las demandas de consumo de la economía global suponen un aumento en la profundidad de las explotaciones mineras subterráneas.

En el desarrollo las labores de minería subterránea profunda es imprescindible un sistema de climatización para proporcionar condiciones de higiene y salud óptimas, suponiendo este sistema, uno de los costes más importantes de la explotación.

En este trabajo se analizarán la transferencia de calor conjugada en el sistema galería –roca encajante producido por el gradiente geotérmico, mediante herramientas de mecánica de fluidos computacional. Se calcularán las cargas térmicas de refrigeración aportadas por este flujo de calor sobre la cavidad subterránea en operación y su influencia en las solicitaciones del sistema de climatización para un periodo dado. También se caracterizará la influencia sobre las mismas debido al uso de materiales de revestimiento con baja conductividad térmica en la superficie de la galería.

Palabras clave: minas subterráneas profundas; CFD; análisis transitorio; eficiencia, climatización en cavidades subterráneas; revestimiento de baja conductividad

Correspondencia: Eva Martínez García evamartinezg82@gmail.com



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

La creciente demanda de los minerales y rocas catalogados por la Comisión Europea como materias primas críticas (CRM, critical raw materials) ha potenciado el desarrollo de nuevas tecnologías en ingeniería subterránea. La prospección geofísica y la explotación de nuevos yacimientos minerales, así como el agotamiento de cotas mineras a cielo abierto, exigen la búsqueda y apertura de subniveles de excavación cada vez más profundos – superiores a 3 km, para desarrollar la producción extractiva.

En estas profundidades, el clima subterráneo de la mina se ve afectado por distintos actores nocivos para el desarrollo de la producción, entre los que destaca, por importancia, la alta temperatura de la roca encajante provocada por el flujo de calor que proviene del centro de la Tierra, identificado típicamente como el gradiente geotérmico. El incremento de la presión, la humedad, los gases de escape de la maquinaria diésel y gases liberados por la roca, también se consideran cargas térmicas significativas (Pulung et. al., 2013). Todos estos factores provocan un aumento de la temperatura en la atmósfera subterránea, por lo que el diseño y la operación de sistemas de ventilación y refrigeración eficientes son herramientas indispensables para el control de la seguridad y salud en la explotación subterránea.

Este trabajo abarca el estudio tridimensional del fenómeno transitorio de la transferencia de calor conjugada que se produce en el par roca encajante - galería, en una mina subterránea profunda que además está sometida a los efectos del sistema de refrigeración de la explotación. Se usan las ecuaciones de la transferencia de calor y la mecánica de fluidos a través de CFD usando para ello el código comercial ANSYS Fluent. Se calculan los flujos de calor que penetran en la galería, ocasionados por la diferencia de temperaturas entre las paredes de la galería y el flujo de ventilación. Esta carga térmica disminuye con el tiempo, a medida que la roca encajante se enfría como consecuencia de la ventilación continua de la galería. La velocidad a la que ocurre este fenómeno tiene importantes consecuencias para el dimensionamiento de los sistemas de refrigeración de la maquinaria que opera en el interior de la galería, así como para evaluar las tensiones mecánicas ocasionadas en la roca, como consecuencia de la contracción volumétrica que sufre el mineral al disminuir su temperatura.

El estudio se extiende al cálculo de las cargas térmicas cuando la galería se protege con un revestimiento de 10 cm de mortero aligerado con el fin de observar los beneficios, que supone un aislamiento de estas características con respecto a la roca desnuda.

Se desarrolla una metodología simplificada capaz de controlar y predecir unas condiciones atmosféricas óptimas de seguridad y salud en el interior de la mina a la vez que constituye una herramienta para el cálculo de las demandas térmicas del sistema de refrigeración, su consiguiente reajuste eficiente y ahorro energético sin pérdida de condiciones salubres de trabajo, factor muy importante en producciones de esta índole en las que la partida de ventilación puede conformar hasta el 60 por ciento del total de gastos (Kurnia et.al.,2014).

2. Modelo matemático

En este sistema conjugado coexisten los mecanismos básicos de transferencia de calor: conducción (en la roca), convección (aire galería-ventilación) y radiación (roca-galería), por lo que es preciso realizar el estudio transitorio de la transferencia de calor en la roca y en el flujo de aire combinado (aire galería + aire refrigeración) en el interior de la galería en todas las direcciones en que se desarrolla.

El gradiente geotérmico, o flujo de calor procedente del núcleo terrestre constituye la principal carga térmica sobre la galería. En el caso en estudio se aplican los valores de gradiente geotérmico según bibliografía especializada (McPherson, 1993).

Se resuelven las ecuaciones de la mecánica de fluidos: ecuación de conservación de la masa, conservación del momento y conservación de la energía (Çengel, 2011):

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{U} = 0 \quad \text{Conservación masa} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{U} \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad \text{Conservación momento} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho C_p \mathbf{U} T) = \nabla \cdot (k_{eff} + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}) \nabla T \quad \text{Conservación energía} \quad (4)$$

Para la caracterización del flujo del caso y el estudio de la dependencia entre éste y la temperatura de la pared de roca, se ha de tener en cuenta la variación del coeficiente global de transferencia por convección, h . Como suelo y paredes de la galería son superficies que reciben un flujo de calor constante –gradiente geotérmico, se usa el método de resolución de superficie a temperatura constante aplicando la Ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q} = h A_s (T_p - T_f)_{med} \quad (5)$$

Donde \dot{Q} (W), es el calor que entra hacia la galería desde las paredes y el suelo de roca, A_s (m), es la superficie de transferencia y $(T_p - T_f)_{med}$ (K), es la diferencia de temperatura media que existe entre las paredes de roca y el fluido.

En la simulación con Fluent se obtienen los valores del flujo de calor, q'' (W/m²) que penetra en la galería y el valor de la temperatura media de fluido y pared; por tanto para calcular el coeficiente global de transferencia por convección h (W/m²K), se utiliza la expresión:

$$h = \frac{q''}{T_p - T_f} \quad (6)$$

El valor del número de Grashof, Gr , manifiesta la medida de los efectos de la gravedad sobre el fluido (en este caso aire) cuando cambia de densidad influido por la temperatura de las paredes; Donde g (m/s²), aceleración de la gravedad; β (K⁻¹), coeficiente de expansión volumétrico del aire; ν (m²/s), viscosidad cinemática del aire:

$$Gr = \frac{g \beta (T_{wall} - T_{fluid}) L^3}{\nu^2} \quad (7)$$

Richardson, Ri , revela si es predominante la convección forzada sobre la natural (debido a la ventilación/refrigeración) o si las condiciones existentes dan lugar a una convección mixta. Si $Ri < 0,1$, la convección natural será despreciable, si $Ri > 10$, no existe la convección forzada y si $0,1 < Ri < 10$, la convección es mixta.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (8)$$

Siendo Gr , número adimensional de Grashof; Re , número adimensional de Reynolds.

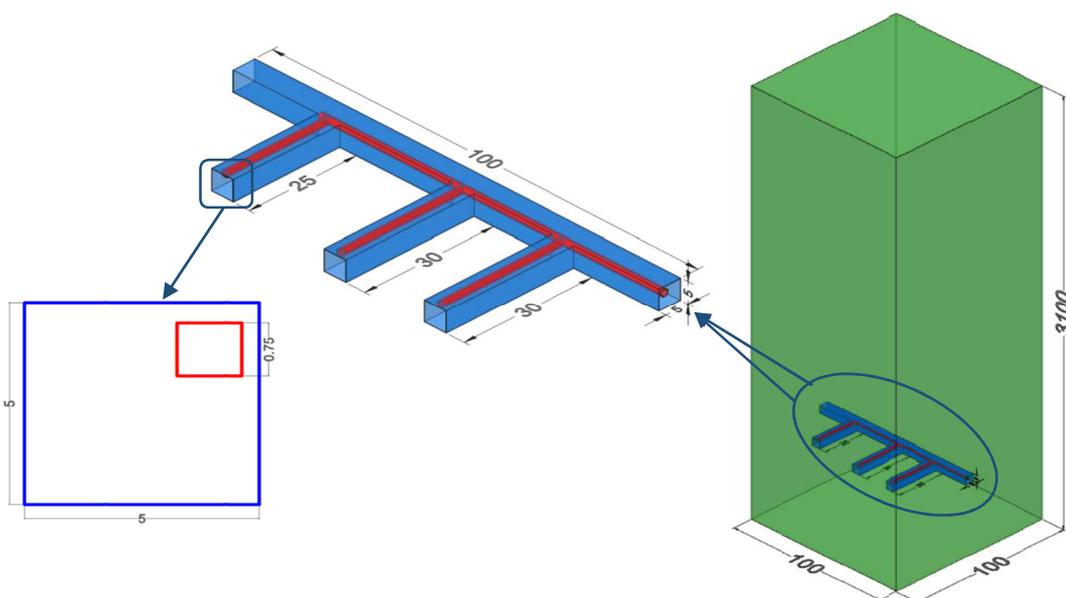
3. Caso en estudio

La metodología de análisis enunciada se aplica a una mina subterránea profunda situada en una zona de baja entalpía de la corteza terrestre con las características geométricas detalladas en el epígrafe 3.1. Se simula un segundo modelo al que partiendo de la geometría básica se añade un recubrimiento de hormigón aireado de 10 cm de espesor, en las paredes de la galería. Se simplifica el caso a un único subnivel de explotación y no se tiene en cuenta la existencia de rejillas para la ventilación natural entre subniveles ni la influencia de otros pozos anexos al nivel.

3.1 Geometría

En la geometría del volumen de control en estudio se diferencian las regiones: galería subterránea de sección 25 m^2 , longitud aproximada 100 m y transversales a ella 3 galerías (cross-cuts) de 30 m, 30 m y 25 m de longitud con la misma sección que la galería principal. La red subterránea descrita se sitúa a 3000 m de profundidad respecto al nivel de la superficie del terreno. El dominio roca completa comprende un prisma cuadrangular de altura 3100 m y lado 100 m. Se considera un sistema de ventilación soplante de sección $0,75 \times 0,75 \text{ m}^2$, según la figura 1:

Figura 1. Geometría caso en estudio



Se establecen unas condiciones iniciales que definen las propiedades térmicas del mineral constituyente de la roca encajante que es carbón, las características del sistema de ventilación/refrigeración - soplante con velocidad máxima establecida según normativa (R.D.863/1985); velocidad del aire existente en la propia galería, y por último, flujo de calor impuesto en la superficie inferior del dominio, para replicar el gradiente geotérmico en la roca.

3.2. Condiciones iniciales

La geometría y las condiciones de contorno se han resuelto de forma independiente para cada parte del dominio físico, utilizando un Pressure Based Solver, flujo transitorio, discretización de segundo orden y modelo turbulento $k - \omega$, SST. Debe tenerse en cuenta que el flujo en el interior de los conductos de ventilación no ha sido resuelto, sino que se ha impuesto a la salida de estos una solución estacionaria, resolviendo, directamente, el flujo en el interior de la galería.

Para el cálculo del flujo en el interior de las galerías se imponen las condiciones de contorno siguientes:

$$z = -3100 \text{ m}, \forall x, y \quad q'' = 0,06 \text{ W/m}^2$$

$$z = 0 \text{ m}, \forall x, y \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T_{z=0} - T_{\infty})$$

$$t = 0 \quad \begin{cases} T(x, y, z) = T_{estacionaria} \\ v_g = 0 \\ v_c = 0 \end{cases}$$

donde: z , es la profundidad, h , es el coeficiente de convección para $z=0$ (superficie), v_g , es la velocidad del aire en el interior de la galería, v_c , es la velocidad del aire a la salida de los conductos de refrigeración y $T_{estacionaria}$ es la distribución de temperatura que se obtiene al resolver la ecuación de conducción de calor en el dominio descrito anteriormente.

En la tabla 1 se recogen las condiciones iniciales y propiedades térmicas de la roca:

Tabla 1: Condiciones iniciales geometría básica.

Propiedades Roca		Ventilación/Refrigeración		Galería	
T_{roca} (K)	357	V_{imp} (m/s)	12	V_{gal} (m/s)	1,8
k_{roca} (W/m·K)	0,33	T_{imp} (K)	298	T_{aire_gal} (K)	298
ρ (kg/m ³)	1296			q'' (W/m ²)	0,06
C_p (J/kgK)	1300				

Donde:

T_{roca} : temperatura de la roca

k_{roca} : conductividad térmica carbón

ρ : densidad carbón

V_{imp} : velocidad impulsión flujo refrigeración

T_{imp} : temperatura flujo impulsión ref.

V_{gal} : velocidad aire interior galería

C_p : Calor específico carbón

q'' : flujo de calor en la base del dominio

T_{aire_gal} : temperatura del aire que entra en la galería

Se asume que la temperatura del aire de refrigeración es isoterma, aunque las paredes de la galería estén a alta temperatura, de esta forma el coste computacional queda simplificado, resolviendo sólo la ecuación de la energía

Para calcular el transitorio del fenómeno acoplado de conducción-convección se considera:

$$t > 0 \begin{cases} \Delta T = 3600 \text{ s} \\ v_g = 1,5 \text{ m/s} \\ v_c = 12 \text{ m/s} \end{cases}$$

Para simular el caso con recubrimiento de hormigón aireado, las propiedades utilizadas (Narayanan, 2000; Liu, 2014) se resumen en la tabla 2:

Tabla 2. Propiedades térmicas mortero aireado.

Propiedades mortero	
T_{sc} (K)	357
k_{sc} (W/m·K)	0,07
ρ (kg/m ³)	400
C_p (J/kgK)	2,285e-3

Para estudiar la dependencia de h respecto a la temperatura de pared de roca, se utiliza un modelo geométrico simplificado cuyo volumen de control es solamente la galería y en el que se imponen los parámetros recogidos en la tabla 3:

Tabla 3. Variables de la simulación.

T_{imp} (K)	V_{imp} (m/s)	V_{gal} (m/s)	T_{roca} (K)
288	8	1	353
		1,5	343
293	10	2	333
		3	323
298	12	4	313

La nomenclatura para cada caso es la siguiente:

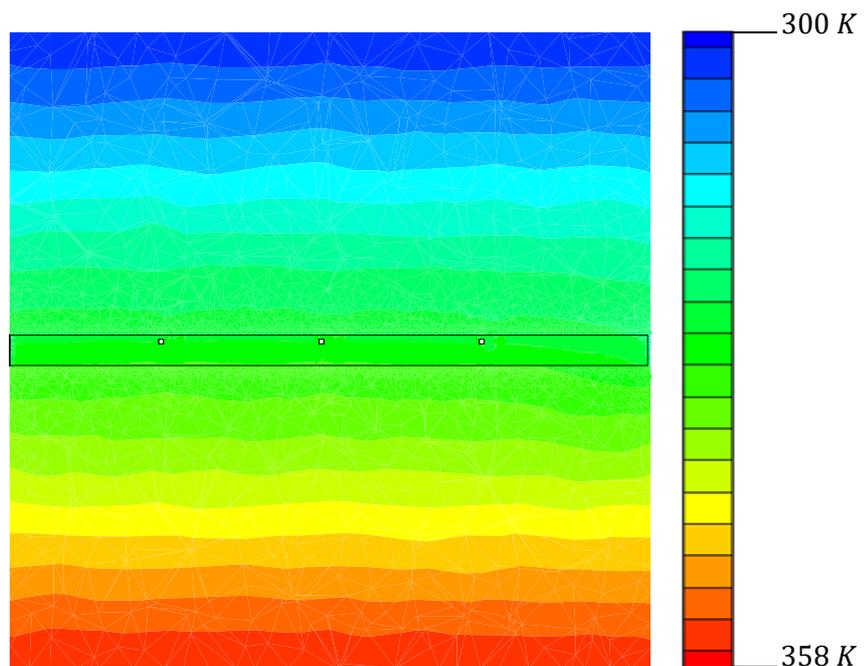


Por tanto, el caso d1.5_v10_Tv298, se corresponde con velocidad de aire en la galería 1,5 m/s, velocidad aire de ventilación/refrigeración 10 m/s y temperatura 298 K.

4. Resultados

Tras la resolución inicial en estacionario se obtienen los valores de estratificación vertical de la temperatura que se muestran en la figura 2.

Figura 2: Campo vertical de temperatura



Como puede apreciarse en la figura 3, el efecto del sistema de refrigeración sobre el aire en el interior de la galería provoca, de forma casi inmediata, que la temperatura del aire sufra un descenso hasta las condiciones de confort consigna 25 °C mientras la temperatura de la pared de la roca y el resto de su dominio permanecen a 80 °C.

Se asume que la temperatura del aire de refrigeración es isoterma, aunque las paredes de la galería estén a alta temperatura, de esta forma el coste computacional queda simplificado, resolviendo sólo la ecuación de la energía

Figura 3. Resolución flujo de ventilación y aire del interior de la galería en estado transitorio.

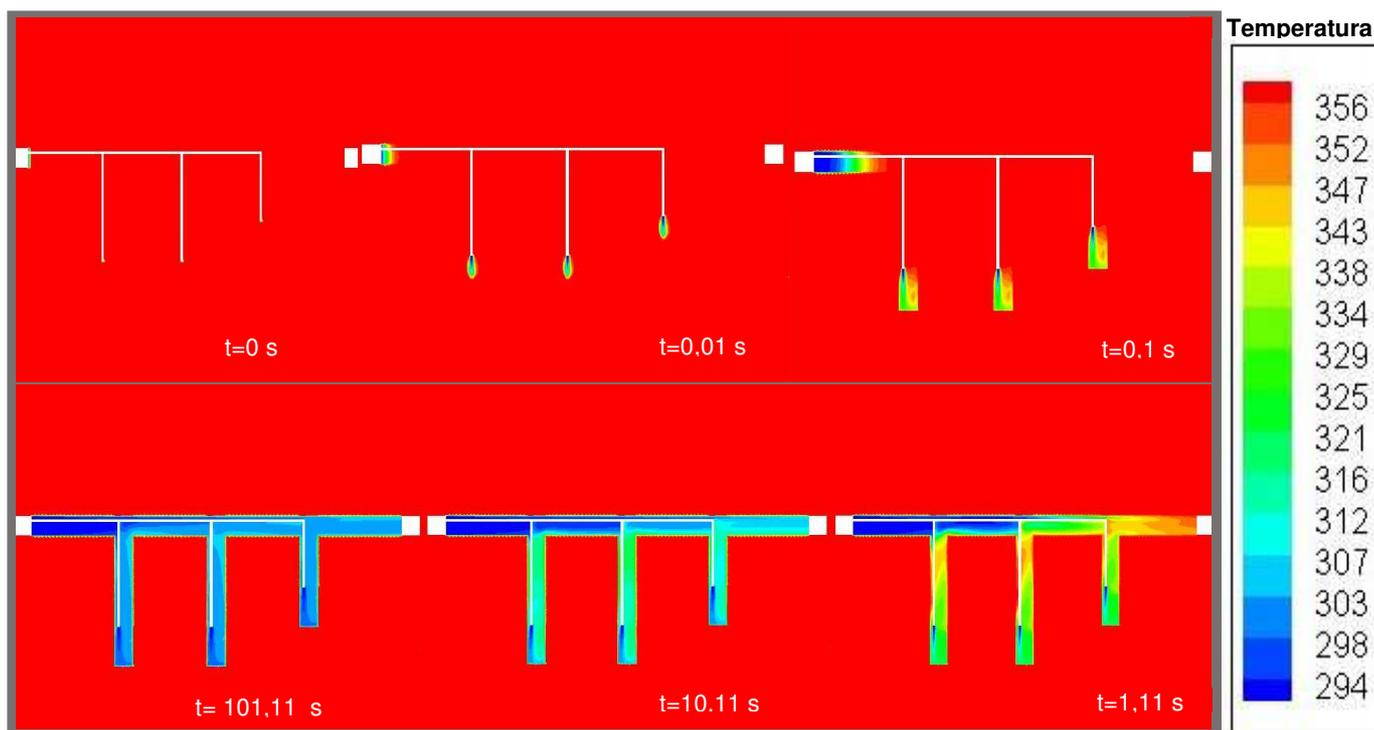
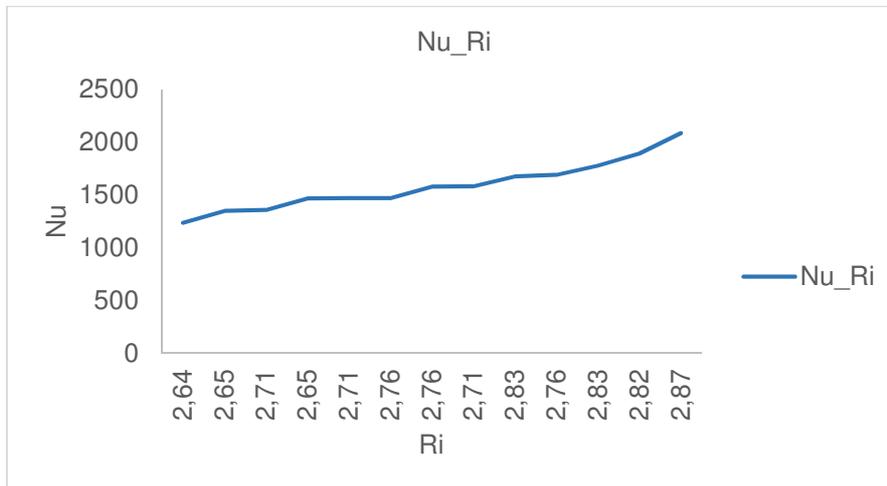


Tabla 4. Valores relación Temperatura de pared y coeficiente global de transferencia.

Caso	$T_{\text{pared}} \text{ (K)}$	$h_{288} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	$h_{293} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	$h_{298} \text{ (W/m}^2\text{K)}$
d1.5_v10	352,87	7,11	6,91	6,73
d1.5_v10	342,89	7,06	6,82	6,60
d1.5_v10	332,91	7,02	6,71	6,41
d1.5_v10	322,93	7,02	6,57	6,15
d1.5_v10	312,95	7,07	6,46	5,85
d1.5_v12	352,87	7,66	7,40	7,16
d1.5_v12	342,89	7,63	7,30	6,99
d1.5_v12	332,91	7,62	7,21	6,81
d1.5_v12	322,93	7,64	7,13	6,66
d1.5_v12	312,95	7,65	6,93	6,25

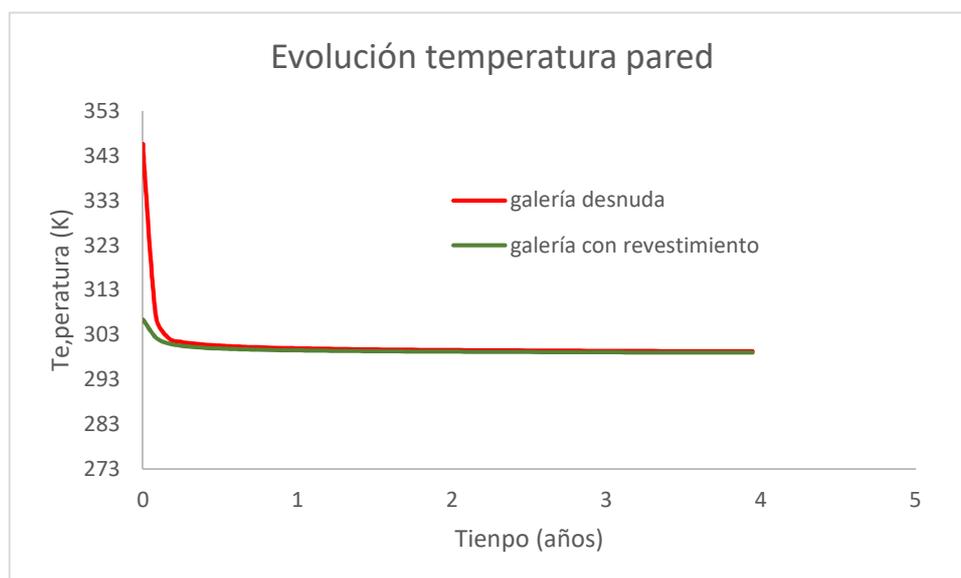
También se observa que los principales actores de los que depende la variación de h son: velocidad del aire de ventilación/refrigeración y su temperatura, independientemente del valor de temperatura de la pared de la galería. Se encuentran caracterizados por la relación entre los números Nusselt y Richardson, como se muestra en la figura 4:

Figura 4. Relación de dependencia Nu_Ri.



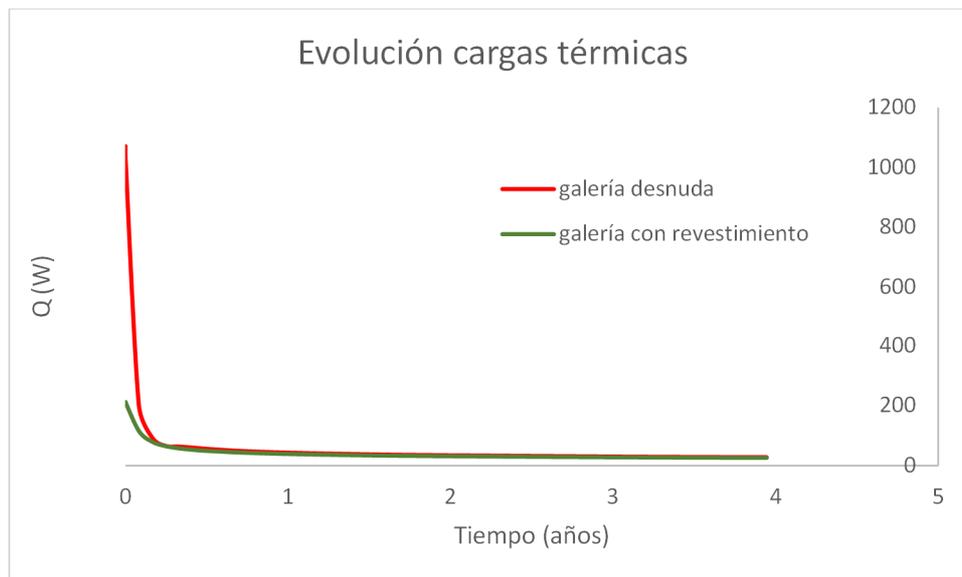
La evaluación comparativa de las dos geometrías construidas desvela que en caso de la geometría básica (roca desnuda) el coeficiente global de transferencia de calor por convección alcanza valores de $6 \text{ W/m}^2\text{K}$, y la temperatura de pared, a la que se ve expuesto el interior de la galería, alcanza un máximo de 345 K . En cambio, en el caso de la geometría con recubrimiento de hormigón aireado, el coeficiente de transferencia global disminuye notablemente, $0,6363 \text{ W/m}^2\text{K}$, y además consigue una reducción en la temperatura de la superficie de pared recubierta de 306 K . En ambos casos, se ha realizado el cómputo durante cinco años. En la figura 5 se observa como la temperatura en la pared tiende a estabilizarse en un límite inferior aproximado de 299 K .

Figura 5. Evolución temperatura pared geometría básica y con recubrimiento de hormigón aireado en galería.



Otro hecho derivado de estos resultados es que inicialmente las cargas térmicas que fluyen hacia el interior de la galería en el caso de la geometría básica son del orden de 1070 kW, mientras que en la galería con recubrimiento de hormigón descienden a unos valores iniciales de 212 kW, cómo se aprecia en la figura 6:

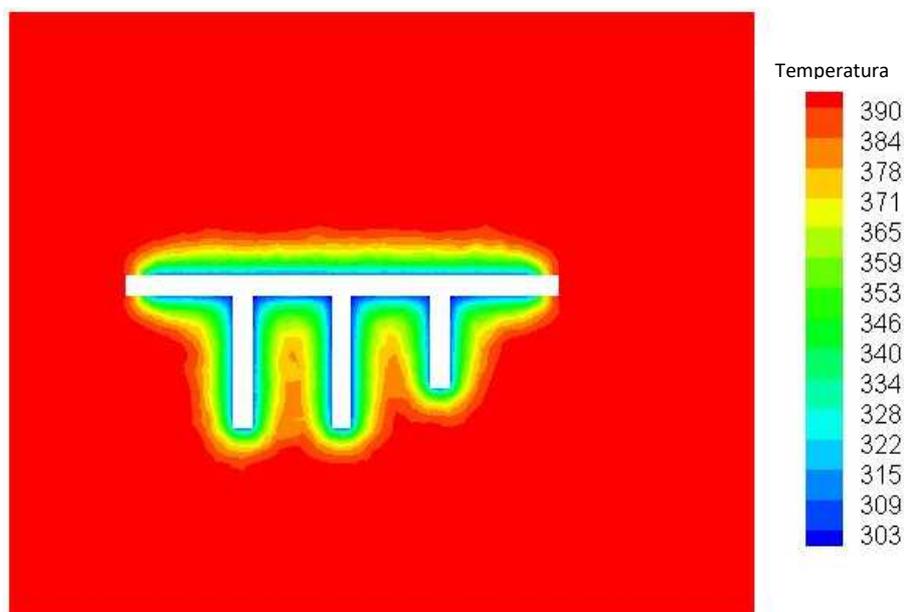
Figura 6. Evaluación comparativa de las cargas térmicas en las dos geometrías estudiadas.



El estudio de los cinco años de transitorio prevé una disminución paulatina de las cargas térmicas que fluyen hacia el interior de la galería hasta estabilizarse. En el caso de la galería con recubrimiento de hormigón aireado son flujos de calor muy bajos debido a las capacidades aislantes del material.

Los fenómenos mencionados anteriormente se manifiestan en la evolución de la temperatura del dominio roca circundante a la galería, durante ese mismo periodo de tiempo, tal como puede apreciarse en la figura 7:

Figura 7. Evolución de la temperatura en roca encajante tras 5 años de operación.



5. Conclusiones

Se desarrolla una metodología innovadora que describe el comportamiento del flujo de aire en el interior de la galería y explica la independencia del coeficiente global de transferencia de calor con respecto a la variación de la temperatura de pared T_p de la galería.

El estudio permite predecir el tiempo que tarda la roca en alcanzar el estado estacionario en su enfriamiento y el espesor al que se extiende.

Los resultados del estudio comparativo entre los casos con hormigón aireado y los casos estándar, sin mortero, revela que el hormigón aireado se puede considerar material de alto rendimiento para su uso como aislamiento térmico en cavidades subterráneas, ya que consigue reducir hasta 5 veces, las cargas térmicas que entran en la galería. Este hecho supone una reducción en la demanda del sistema de refrigeración.

Este estudio favorece la posibilidad de desarrollar estrategias de producción adaptadas a condiciones salubres de trabajo y ahorro energético en la partida de ventilación/refrigeración.

Con el uso de recubrimiento mediante hormigón aireado se consigue aportar estabilidad a la luz de las cavidades subterráneas a la vez que se evita el cambio brusco en la temperatura de la superficie rocosa que puede dar lugar a fisuras de retracción.

Bibliografía

- Çengel, Y.A., & Ghajar, A.J. (2011); *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones* (4ª Edición). Mexico DF : McGrawHill/Interamericana Editors S.A.
- España. Real Decreto-ley 863/1985, de 2 de Abril, Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera [Internet] *Boletín Oficial del Estado*, 12 de Junio de 1985, num.140, pp.17869-17877. [consultado 16 Abril 2017] Disponible en : <https://www.boe.es/buscar/pdf/1985/BOE-A-1985-10836-consolidado.pdf>.
- Kurnia, J.C., Pulung Sasmito, A., Yap Wong, W., & Mujumdar, A.S., (2014) Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines; *Science of the Total Environment*, 481, 317–334.
- Liu, W.V., Apel, D.B., & Bindiganavile, V.S., (2014). Thermal characterization of a lightweight mortar containing expanded perlite for underground insulation. *Cement & Concrete Composites*, 53, 44–51.
- Mcpherson, M.J., (1993). *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Nueva Delhi, India. Thomson Press (India) Limited.
- Narayanan, N.; & Ramamurthy, K.. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, 22, 321-329
- Niu Y. (2015) Research on thermal energy recycling utilization in high temperature mines. *Procedia Engineering*, 121, 389 – 395.

- Pulung Sasmito, A., Birgersson, E., C. Ly, H., & Mujumdar, A.S. (2013) Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment – A computational fluid dynamic study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, 82–95.
- Seyed Ali G-M., Pulung Sasmito, A., Ferri P. Hassani, Ferri P., & Amiri, L. (2016). Performance evaluation of large scale rock-pit seasonal thermal energy storage for application in underground mine ventilation. *Applied Energy*, 185 (2), 1940-1947.
- Xu, G., Jong, E.C., Luxbacher, K.D., Ragab, S.A., & Karmis, M.E. (2015). Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine. *Safety Science*, 74, 140–149.