

## CAPÍTULO 5. Descripción y Construcción de una Galería-Mina de Explotación de Aguas Subterráneas

Juan Carlos Santamarta Cerezal

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Aunque en los terrenos continentales, actualmente, se dispone de maquinarias avanzadas de excavación y sistemas del control del terreno que permite enfrentarse a todo tipo de material y roca (Cebrián C, 2005), en el caso de los terrenos volcánicos la evolución tecnológica no ha sido tan desarrollada. Esto es debido a que los terrenos volcánicos, presentan un terreno muy heterogéneo, anisótropo y difícil de parametrizar.

El terreno que conforman las Islas Canarias, es bastante variado en cuanto a su composición, lo que provoca numerosos problemas a la hora de ejecutar una perforación. Esta variedad, en cuanto a su dureza, hace muy difícil la utilización de medios mecánicos como microtuneladoras, siendo las perforaciones ejecutadas con medios más tradicionales utilizados en la minería convencional. Además hay que destacar que las minas de agua dulce en Canarias no tienen boca de salida por lo que si se utilizase esta tipología de maquinaria debería desmontarse y salir por la bocamina de nuevo (Soler, 2004).

Inicialmente, las galerías o minas, eran construidas por medios manuales y con animales, como los burros, para el transporte de herramientas y utensilios; en zonas con presencia de material masivo volcánico, como el basalto era necesario el uso de explosivos muy rudimentarios, incluso a veces, fabricados por los propios operarios. Los rendimientos en estos casos dependían de la destreza del cabuquero, que era el encargado de los explosivos. Los avances analizados eran del orden de 1 a 3 m/d. Los escombros resultantes eran cargados en vagonetas y éstos eran llevados a la superficie mediante fuerza animal o, empujados por los operarios (con pendiente de la traza de la galería a favor).

Tanto la explotación, como la dirección de obra y los planes de voladuras, deben ser ejecutados y realizados por un técnico competente, en este caso particular, los Ingenieros Superiores o Técnicos de Minas, ya que este tipo de instalaciones se rigen por la Ley de Minas. Evidentemente en los estudios hidrogeológicos y de demandas, caben otras cualificaciones y equipos multidisciplinarios.

Siguiendo con las técnicas de perforación y avance, complementariamente a los explosivos, se utilizan también en la perforación los martillos neumáticos y, en muy contadas



Figura 5.1.- Martillo percutor con empujador hidráulico. (Foto cortesía de Rafael Lario).



Figura 5.2.- Tramo de galería en construcción por parte de la Administración.

110

ocasiones mini-excavadoras en las galerías que por sus dimensiones, permiten la entrada de maquinaria y su maniobrabilidad. El uso de esta maquinaria tiene evidentes ventajas en cuanto a productividad y confort en el trabajo, sobre todo en la zona saturada de la perforación, con presencia de agua. Sin embargo, presentan el inconveniente de la producción de gases de escape (monóxido de carbono, CO), que no es posible evacuar a menos que la galería cuente con un sistema de ventilación forzada, hecho que no siempre ocurre. Por ello, habitualmente la única máquina con motor de explosión que entra en la galería es la locomotora, siendo las minipalpas de carga accionadas mediante sistema neumático.

La mina se suele construir con una alineación recta, aunque en determinadas ocasiones y debido a los materiales que van apareciendo y su orientación (almagres, buzamiento coladas, piroclastos...), puede haber cambios de rumbo, incluso ramales en determinados momentos de la excavación. Algunos ramales, en explotaciones más modernas, se utilizan para la circulación de la maquinaria. Estos cambios de orientación pueden ser debidos también a los resultados de exploración hidrogeológica. Se perfora un sondeo horizontal en el frente de la mina que informa de los materiales que se van a encontrar en secciones posteriores. También la distribución de los diques, suministran información, en conjunto con las humedades que vayan apareciendo en el trazado. Influye notablemente la experiencia de la dirección de obra en la búsqueda del recurso, sobre todo si es apoyada con un buen geólogo y el correspondiente estudio hidrogeológico.

Al inicio de la perforación, los primeros metros perforados (200-1.000) suelen discurrir en seco, es decir, en zona no saturada. El ambiente de trabajo se vuelve pulverulento. En seco, salvo que haya materiales muy duros tipo basalto o basalto “pelo perro” (el más duro



Figura 5.3.- Dique geológico en la traza de la galería.



Figura 5.4.- Agua de repisa.

según los operarios entendidos en la materia), los rendimientos son elevados y, aunque se podrían usar maquinaria de gomas, es conveniente, ir instalando desde el principio raíles, ya que, cuando se alcance la zona saturada, la maquinaria de gomas resbalaría y haría más dificultosa la ejecución de los trabajos, retrasando los mismos.

Al cabo de unos cientos de metros, la traza de la mina penetra en el acuífero, la denominada zona saturada. Este cambio no es inmediato, sino gradual, comenzando por la aparición de unas humedades en la base de la traza de la mina. Posteriormente, asciende por los laterales, —la denominada agua de repisa— en el argot minero insular, hasta finalizar por los hastiales.

El agua puede aparecer de golpe, tras la ruptura de un dique de cierta magnitud(1-5 m), por lo que es necesario, siempre, proceder a la perforación con extrema cautela al llegar a un dique. Normalmente el agua alumbrada en los frentes de galería suele hacerlo a través de los barrenos perforados para llevar a cabo la voladura; una vez alumbrada el agua, se puede tener una idea de la magnitud de la columna de agua mediante la instalación de un manómetro.

Las fuentes de agua, pueden aparecer en diversas partes de la sección, por fisuras o grietas, con cierta presión. Incluso puede llegar a caer agua en forma de lluvia de filtración en todo el tramo de la sección, por lo que las condiciones de trabajo, pueden empeorar considerablemente (humedad y temperatura). Este recurso hídrico, que suele ser de reserva (agua más cargada de sales), puede remitir en cantidad, ya que se está drenando la zona del acuífero más antigua, hasta llegar a los caudales estabilizados que vendrían dados



Figura 5.5.- Evacuación de caudales durante la ejecución de la galería.

como un porcentaje de la recarga. Es necesario tener cuidado con estas vías preferenciales de agua, ya que pueden provocar corrimientos y movimientos del material y caídas de prismas basálticos, generando problemas de estabilidad de la sección de la mina o incluso, en la seguridad de los trabajadores.

La mina, debe llevar una pendiente descendente del 1.5 al 2% en toda su longitud, esto va a favorecer el aprovechamiento del agua, que fluye por gravedad. En la infraestructura de tipo pozo-galería, hay dos opciones, la primera es: que no haga falta bombear el agua, porque se trate de un pozo artesiano —tenemos una diferencia de cota importante con respecto al recurso que drenamos, esta diferencia de cota puede ser gracias a los diques—, o bien, que sea necesario incluir en la instalación un sistema de bombeo, con costes energéticos, que incrementarían el precio total del agua final. Los operarios, para gestionar la pendiente de la galería utilizan tornillos en el arco de la sección con hilos, método rudimentario pero eficaz.

Al alcanzar la zona saturada, o bien, al comenzar a atravesar diques es posible que en la explotación se deba comenzar a trabajar con cantidades importantes de agua. Este líquido puede alcanzar temperaturas de unos 15-20 °C, llegando en algunos casos a superar

los 35 °C, esto provoca un ambiente de trabajo pésimo para los operarios, por lo que, se debe evacuar rápidamente. La evacuación se realiza mediante bombeo o bien por el canal que se ha ido realizando en la zapatera derecha del frente de la mina. Este recurso no es posible utilizarlo para abastecimiento, debido a que tiene restos de explosivos y materiales sueltos, en algunos casos de granulometría muy fina cuya decantación no es posible a corto plazo. Su posible uso en agricultura llevaría un estudio previo ambiental y de calidad, por si hubiera presencia de contaminantes perjudiciales. La solución menos eficiente con respecto estas aguas iniciales es verterlas a un barranco próximo, para lo cual también sería necesario disponer del permiso correspondiente. Las altas temperaturas también son un problema para los operarios, en algunas zonas son muy elevadas; se han dado casos de trabajar con agua a temperaturas cercanas a 50 °C en el frente de la galería, como en el caso de la galería de Lomo Colorado en la isla de Tenerife; de ahí que, algunas veces, se pueda hablar de minería de aguas termales. Otro ejemplo es la galería de La Fuente Santa en la isla de La Palma cuyas aguas están oficialmente declaradas como termales y minero-medicinales, la obra, de compleja ejecución y elevado coste, se encuentra actualmente en proceso administrativo para su explotación como balneario.

## **5.2 PROBLEMAS GEOTÉCNICOS USUALES EN LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS EN TERRENOS VOLCÁNICOS**

### *5.2.1 Introducción*

Los aspectos geotécnicos, son una de las cuestiones más complicadas a la hora de diseñar o ejecutar un proyecto subterráneo en un terreno volcánico.

Los materiales volcánicos son extremadamente heterogéneos, discontinuos y difíciles de predecir a diferencia, en general, de las formaciones continentales no volcánicas, más continuas, predecibles y competentes en general en la mayoría de los casos. La configuración habitual del terreno en ambientes volcánicos insulares consiste en la acumulación de distintas sucesiones de emisiones lávicas producto de erupciones efusivas, en su gran mayoría de carácter fisural, que configuran un paisaje dominado en su mayoría por lavas y depósitos piroclásticos. Dependiendo de la tasa efusiva, de la explosividad de la erupción y de las características reológicas de los materiales emitidos, éstos se pueden distribuir espacialmente de forma más o menos caótica y desordenada, lo que les confiere el carácter heterogéneo mencionado.

Canarias supone un ejemplo mundial a nivel constructivo de estas instalaciones mineras. La ingeniería geológica y geotécnica aplicada a las obras subterráneas, es una disciplina que en los últimos años ha tenido un gran desarrollo en las islas. A la hora de acometer o diseñar una obra subterránea en un medio insular, la singularidad geológica del Ar-

chipiélago Canario, de naturaleza volcánica, su lejanía y su pequeña superficie respecto al territorio continental, hace que, en la mayoría de las ocasiones, no se recojan todos los aspectos referidos a las propiedades del terreno en las instrucciones y códigos que se dictan a escala nacional, quedando ciertas lagunas interpretativas que debe sortear el profesional canario, muchas veces sin éxito.

Como se ha comentado en otras secciones, en Canarias han acontecido la mayoría de los procesos volcánicos que se pueden dar, pudiéndose encontrar un amplio espectro de materiales y estructuras volcánicas. Por este motivo, cualquier estudio o investigación, que en el ámbito de la geotecnia se realice en Canarias, es fácilmente extrapolable a cualquier otra región insular volcánica del mundo.

114

Es evidente que es necesario conocer el comportamiento del terreno por donde van atravesando las perforaciones de las galerías, no obstante esta auscultación, en las obras en terrenos continentales es más exhaustiva y completa que en terrenos volcánicos. Como se ha comentado los terrenos continentales presentan más homogeneidad en los terrenos que atraviesan las perforaciones, cosa que no se cumple en un terreno volcánico, debido a su heterogeneidad. Se puede atravesar en una sola perforación todos los litotipos volcánicos existentes.

Las propiedades morfológicas y litológicas de los terrenos volcánicos de Canarias son muy conocidas por los numerosos estudios geológicos que se han realizado en las islas, que han dado como fruto, una extensa bibliografía y una cartografía geológica de detalle en todo su territorio. Esto contrasta de manera significativa con una literatura muy escasa en lo que se refiere a propiedades geotécnicas.

### 5.2.2 Soluciones técnicas

La obtención de la información geológica de las obras subterráneas a ejecutar se hace verdaderamente complicada, porque en muchas ocasiones, se tendría que recurrir a sondeos verticales de gran profundidad (más de 500 m). Una solución habitual para la evaluación de agua en la traza del túnel, generalmente en obras hidráulicas subterráneas, es la perforación de un sondeo horizontal. Este sondeo se ejecuta en el frente de la excavación, de unos 50 m de longitud, principalmente para detectar flujos de agua o bien alturas de las láminas de agua sobrelevadas por diques, tras el frente de excavación. Con estas actuaciones se evitan problemas de inundación y se garantiza la seguridad de los operarios e instalaciones.

También se pueden estimar las propiedades del terreno y conocer los materiales geológicos que se van a atravesar consultando bibliografía de trabajos realizados en materiales y obras similares. Respecto a las características geotécnicas del terreno que se va a excavar,

PROBLEMA DE SOSTENIMIENTO DE LA GALERÍA	SOLUCIÓN TÉCNICA
Escorias de colada volcánica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercha metálica</li> <li>• Redondos de acero</li> <li>• Piedras a trasdós &gt; 45 cm</li> </ul>
Material de cono volcánico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para avanzar con la perforación es necesario estabilizar el frente mediante lechadas de cemento</li> </ul>
Emboquillado de galería en piedemonte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chapado metálico y perfiles</li> <li>• Hormigón armado tipo dovelas</li> </ul>
Piroclastos en cono volcánico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercha metálica</li> <li>• Lechada de cemento con bulones</li> <li>• Gunitado</li> <li>• Redondos de acero</li> </ul>
Presencia de pumitas, materiales plásticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubería en sifón recubierta del material plástico</li> <li>• Revestido de la perforación mediante dovelas (solución antieconómica)</li> </ul>
Materiales de cámara freatomagmática	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forrar perforación con bloques y hormigonar, si se dejan sólo los bloques colapsa por empujes del material plástico</li> </ul>
Materiales en lajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chapas metálicas</li> <li>• Cerchas</li> </ul>
Prismas de retracción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil solución</li> <li>• Determinar los inestables y actuar sobre ellos</li> </ul>

Tabla 5.1.- Sistemas de sostenimiento de galerías en función del problema geotécnico.

generalmente el terreno masivo, no presenta problemas de estabilidad. En la parte granular (escorias y piroclastos) se suele producir una sección más redondeada, siendo necesario en ocasiones recurrir a sistemas de sostenimiento (cerchas, gunitado), con la función de armar el terreno en estos tramos.



Figura 5.6.- Máquina para la ejecución de sondeos.



Figura 5.7.- Sección de la Galería de la Fuente Santa.

116

Con estos condicionantes, se puede plantear la construcción del túnel a sección completa, dependiendo de las dimensiones de la perforación u obra subterránea en cuestión, considerándose algunos tramos autoestables. En el caso de aparecer fisuras, y por tanto cuñas inestables, en frentes con roca por efecto de la descompresión tras la excavación, siempre se recomienda una capa de sellado con gunita  $e = 5 - 10$  cm y bulones colocados de forma que “cosan” a modo de aguja las fracturas y diaclasas.

En el caso de que alguna de estas premisas no se cumplan podemos recurrir a los diferentes tipos de sostenimientos disponibles para este tipo de infraestructuras. En el caso continental, en general, los sostenimientos de los túneles son fundamentales para evitar el colapso de la infraestructura, en el caso volcánico las zonas masivas de las coladas, en general, son auto portantes y como se ha comentado solamente en pocos casos hay que recurrir al revestimiento, salvo en los comentados anteriormente.

Como caso general, los problemas en la ejecución suelen aparecer cuando la perforación comienza a atravesar materiales más sueltos, como las escorias, prismas basálticos o piroclastos, que en algunos casos pueden comportarse como un fluido. Por ejemplo; al atravesar conos volcánicos jóvenes, como fue el caso de la perforación de La Fuente Santa, en La Palma (Soler, 2004), anteriormente comentada.

Esto genera problemas de estabilidad, a lo largo de la traza de la mina, que se suele solucionar con diversas técnicas —que elevan el coste de la explotación considerablemente—, como el gunitado, bulonado o bien incluyendo el uso de chapas metálicas (a veces con rocas a trasdós). En este último caso, es necesario ser consciente de que los materiales van cediendo y ejercen una presión sobre las planchas que hace que se estrechen las secciones.





Figura 5.8.- Inyectado en la traza de la galería.



Figura 5.9.- Gunitado en la sección de la mina.



Figura 5.10.- Refuerzo de la sección de la galería mediante bloques.

Esta incidencia es habitual, en el Valle de la Orotava (Tenerife) en Canarias, se incrementa también por el efecto de los depósitos de avalancha en dicha zona.

También, existen problemas importantes al atravesar materiales plásticos, tipo pumitas, que al tomar contacto con el agua pueden funcionar como arcillas expansivas creando serios problemas a la estabilidad de la perforación. Este caso significativo ocurrió en la infraestructura denominada Trasvasur, una galería de trasvase en la isla de Gran Canaria, en el cual la mina atravesaba formaciones de pumitas que iban abombando la galería.



118

Figura 5.11.- Traza de una galería en la zona de depósitos de avalancha (Cortesía de Rafael Fenoll).

Figura 5.12.- Sección colapsada en la traza de la galería.

Otro elemento geológico que condiciona la perforación y, que hay que tener en cuenta, son los deslizamientos históricos en la zona de la construcción de la galería. Estos deslizamientos, generan una línea de rotura donde se concentran materiales sueltos como rocas, bolos, con una matriz que, al acabar el deslizamiento y con el paso del tiempo, forman una capa impermeable que algunos autores denominan mortalón o bien fanglomerado. Este mortalón o debris avalanche tiene unas consecuencias hidrogeológicas importantes, la primera es que reorganiza la distribución del acuífero. Crea una capa impermeable, y a nivel de ejecución de las minas, al alcanzarse esta capa, la sección se vuelve muy inestable y es muy compleja su ejecución. Cuando se alcanza esta formación se suele abandonar la explotación si no es productiva.

En el caso de utilizar revestimientos en el túnel se deben controlar los siguientes parámetros técnicos:

1. Presión ejercida por el terreno sobre el revestimiento.
2. Tensión en el revestimiento.
3. Deformaciones del revestimiento.
4. Desplazamiento de las juntas.
5. Presiones intersticiales en el terreno.

CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	SOSTENIMIENTO		
	COMPONENTES		
	HORMIGÓN	BULONES	CERCHAS
<p>Compacto de masivo de lava o con alguna intercalación ocasional de escorias y piroclastos, de reducido espesor.</p> <p>RMR &gt; 70 y Q &gt; 13 macizo rocoso de "buena calidad"</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 10 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,51 x 2,0 m t</p>	---
<p>Compacto de masivo de lava con alguna intercalación de escorias o piroclastos de espesor métrico, pero que no afecta a la clave ni a la solera.</p> <p>RMR entre 60 a 70 y Q entre 5 a 13 macizo rocoso de "mediana calidad"</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 15 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	---
<p>El mismo macizo rocoso pero con la intercalación métrica de escorias o piroclastos situada a nivel de la clave; o bien, siempre que se observen condiciones de bloques delimitados por planos de discontinuidad, en bóvedas u hombreras.</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 20 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	1 th-29 / 1,0 m con tresillones
<p>El mismo macizo rocoso pero con la intercalación métrica de escorias o piroclastos situada a nivel de la solera</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 15 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	---
<p>Depósitos masivos de escorias y piroclastos o con alguna intercalación ocasional de compacto de masivo de lava</p> <p>RMR ≈ 60 y Q ≈ 5 macizo rocoso de "mediana calidad"</p>	<p>Proyectado con fibra* e= 20 cm</p>	<p>Tipo swellex de 10 tn y 4 m 1,01 x 2,0 m t</p>	1 heb-160 / 1,0 m con tresillones
Q: Índice Q de Barton			
*En el hormigón proyectado, la proporción recomendable de fibra es de 45 kg/m <sup>3</sup> .			

Tabla 5.2.- Sistemas de sostenimiento de galerías en función de la clasificación del macizo rocoso.

GRUPO	DESCRIPCIÓN	
T-1	Terrenos favorables: Aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.	
T-2	Terrenos intermedios: Los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m.	
T-3	Terrenos desfavorables: Los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos:	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos expansivos</li> <li>• Suelos colapsables</li> <li>• Suelos blandos o sueltos</li> <li>• Terrenos kársticos en yesos o calizas</li> <li>• Terrenos variables en cuanto a composición y estado</li> <li>• Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos</li> <li>• Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades</li> <li>• Terrenos con desnivel superior a 15°</li> <li>• Suelos residuales</li> <li>• Terrenos de marismas</li> </ul>

Tabla 5.3.- Grupos de terreno según el CTE.

### 5.2.3 Clasificación geotécnica de los materiales volcánicos encontrados en la traza de la mina.

Dado que en las Islas Canarias, tanto la litología como la edad de las formaciones rocosas condicionan de manera directa o indirecta el comportamiento geotécnico de los materiales que pueden ir apareciendo en la explotación, se ha procedido a dividir las diferentes superficies territoriales de cada una de las siete islas, en base a la combinación de dichos



Figura 5.13.- Depósitos coluviales en la traza de la galería.

criterios litológicos y geocronológicos, en diez unidades geotécnicas. Estas presentan, en su conjunto, una homogeneidad suficiente para su delimitación cartográfica, para su asimilación a los grupos de terrenos contemplados en el CTE.

#### A. Tipos de materiales

Siguiendo la metodología de Hernández-Gutiérrez (2015), a partir del amplio espectro de materiales volcánicos presentes en las Islas Canarias, se pueden definir dos grandes grupos en base a la existencia o no de una muy importante componente cohesiva de su resistencia.

- Materiales masivos o compactos. Este grupo incluye las coladas lávicas de todos los tipos y composiciones descritos y las ignimbritas con todas las variedades texturales posibles.
- Materiales fragmentarios o sueltos. Incluye los depósitos plinianos (“ash fall” o lluvia piroclástica) y los conos de cinder.

UNIDAD	SUBUNIDAD	TERRENO CTE
Unidad I: Complejos basales		T3
Unidad II: Coladas y macizos sálicos		T1
Unidad III: Macizos basálticos alterados		T3
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Coladas "aa" poco escoriáceas	T1
	IVb: Coladas "pahoehoe" y "aa" muy escoriáceas	T3
Unidad V: Materiales piroclásticos	Va: Ignimbritas y tobas	T2
	Vb: Depósitos piroclásticos sueltos o débilmente cementados	T3
Unidad VI: Materiales brechoides		T2
Unidad VII: Depósitos aluviales y coluviales		T3
Unidad VIII: Suelos arenosos		T3
Unidad IX: Suelos arcillosos y/o limosos		T3
Unidad X: Rellenos antrópicos		T3

Tabla 5.4.- Relación de las unidades geotécnicas de los terrenos volcánicos con respecto al CTE (Hernández-Gutiérrez, 2015).

Por lo tanto se diferencian hasta diez tipos distintos de rocas o de grupos de rocas volcánicas (litotipos), que presentan propiedades geotécnicas particulares similares. Hernández-Gutiérrez (2015), propone una clasificación simplificada de las rocas volcánicas canarias, en diez litotipos diferentes, con objeto de facilitar a los profesionales de la ingeniería y de la arquitectura, con conocimientos limitados de geología y de geotecnia, un medio para asignar un nombre a una roca y encuadrarla dentro de un grupo con propie-

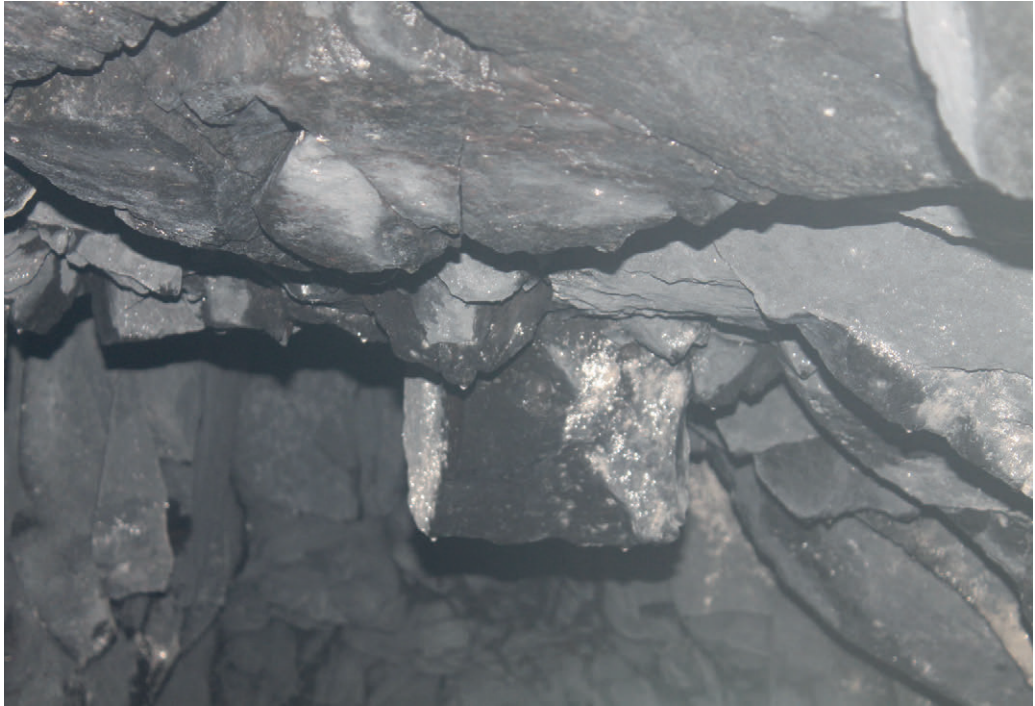


Figura 5.14.- Problema de caída de prismas basálticos en la sección de la galería.

dades geotécnicas similares. Para el caso de estudio de las galerías son interesantes los 6 primeros, dado que son los que nos vamos a encontrar en la traza de la galería en la mayoría de las ocasiones. Esto puede facilitar notablemente la adopción de soluciones técnicas para los problemas geotécnicos encontrados en las secciones de las galerías. También puede ajustar más las cantidades de explosivos necesarias para la perforación de la mina y, por último, la caracterización de la porosidad y parámetros relacionados con la permeabilidad de las rocas, pueden mejorar el conocimiento del funcionamiento de los acuíferos atravesados.

### **5.3 INNOVACIONES CONSTRUCTIVAS: REGULACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE LA RECONSTRUCCIÓN DE DIQUES GEOLÓGICOS Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS MEDIANTE SONDEOS DIRIGIDOS**

#### *5.3.1 Regulación de caudales mediante la reconstrucción de diques geológicos.*

El mayor problema que presentan las minas de agua es la poca capacidad de regulación que tienen. Una vez alcanzada por la perforación, la zona productiva o saturada, el caudal sale sin control o regulación alguna. La galería ha atravesado una serie de diques —en mayor número, conforme se avanza hacia las dorsales—. Estos caudales, inicialmente



Figura 5.15.- Sondeos verticales en la traza de la galería de Ipalán en La Gomera.

son muy elevados, aunque se van estabilizando con el tiempo. Por ejemplo, en la galería de Ipalán en la isla de La Gomera comenzó a drenar caudales rondando los 80 L/s y actualmente se obtienen del orden de 5 a 10 L/s, aunque se confía en obtener mayor rendimiento de la mina, con la construcción de numerosos sondeos verticales a lo largo de la traza para llegar a un caudal razonable, en relación al coste de la explotación. Esta solución es técnicamente contraria al concepto de excavación de una galería, que persigue el alumbramiento de agua sin coste de bombeo alguno.

Con el paso de los años y descenso del nivel del acuífero alumbrado tras un dique, se suele seguir reprofundizando la galería en lugar de perforar sondeos verticales ya que, en la inmensa mayoría de los casos, la ubicación de las galerías hace imposible y antieconómica su electrificación. En muy contadas ocasiones se encuentran sondeos verticales en el interior de las galerías de agua, en cualquier caso, la perforación de sondeos verticales en el interior de una galería sin que esta haya llegado a ser productiva en su frente podría considerarse como no deseable.

En las islas, por las lluvias, hay épocas del año que no es necesario tanta extracción de agua, por lo que se desequilibra la oferta con la demanda, por este motivo, se comenzó



con la ingeniería de diques mediante la ejecución de cierres de hormigón armado en las propias minas, utilizando para ello los diques geológicos con unas ciertas características de impermeabilidad y geométricas. Lo que se busca con esta técnica, es almacenar el agua en el propio macizo y regular el aprovechamiento.

El primer ingeniero que tuvo la idea de realizar estos cierres en España fue el Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Clemente Sáenz García, Catedrático de Geología de la Universidad Politécnica de Madrid de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos, aplicándolos en un acuífero en Soria, en la conexión de dos formaciones diferentes. Era básicamente un contacto hidroestratigráfico de distinta permeabilidad: margas-calizas. El Doctor Ingeniero Sainz de Oiza (responsable técnico del SPA15), también los nombró para el caso Canario. Telesforo Bravo valoró esta opción en las galerías de la Caldera de Taburiente en la isla de La Palma. Este sistema ha sido profusamente utilizados en otras zonas del mundo como por ejemplo; Perú, utilizando una falla como dique, en islas de Japón, incluso, en islas más cercanas, como Sicilia. En Canarias este método, se ha aplicado con éxito en el Pozo de Los Padrones en la isla de El Hierro (Tenerife) (Soler, 2004), reconstruyendo tres diques volcánicos usándolos posteriormente como pequeños embalses subterráneos y regulando la explotación a demanda. Existe otra experiencia de éxito en la isla de La Palma (Tenerife). Esta innovación es muy interesante y ha sido un gran avance para la gestión y optimización de las minas del agua, ya que, permite compartimentar el acuífero e ir drenando aguas de recarga a demanda, contribuyendo a la sostenibilidad de la explotación además como otra ventaja, se tiene que el agua está almacenada dentro del macizo, por lo que se evitan problemas sanitarios.

#### A. Planteamiento del problema

La perforación subterránea, una vez que penetra en la zona saturada, va drenando inicialmente las aguas de reserva, con una salinidad mayor dado su mayor tiempo de residencia en el acuífero. Posteriormente, los caudales se estabilizan, entonces es cuando se encauzan mediante una tubería o canal. La longitud de la perforación, como media, en las islas occidentales son entre 1.500 y 3.500 m, si bien actualmente en el Hierro las longitudes son sensiblemente menores. La isla de Tenerife dispone de algunas galerías de más de 7.000 m de longitud.

El problema que se plantea es el siguiente: una vez perforados los diques que almacenan el agua subterránea, no es posible regular los caudales alumbrados, dado que salen en continuo. El mercado del agua subterránea, en diferentes épocas del año no pueden asumir toda la oferta de agua captada. La única posibilidad es reconstruir los diques mediante hormigón armado y regular los caudales mediante una serie de conducciones.



Figura 5.16.- Piezómetro en la traza de la galería.

## B. Construcción

La primera acción a tomar en la ejecución de los cierres, es seleccionar los diques a cerrar o reconstruir. Estos se van numerando, conforme se van atravesando en la perforación. En ese momento, se puede hacer una selección inicial de los diques viables para su reconstrucción, atendiendo a: anchura, calidad del material constituyente (ausencia de fisuras por la aplicación de explosivos), así como, la localización del dique dentro del acuífero. Hay que tener en cuenta que al aplicar explosivo en la perforación de la galería, la propagación de la onda expansiva del explosivo ha podido dañar y fisurar más volumen del dique, no sólo en la sección observable, si no en más extensión de la formación geológica. Es por esto, que tener precaución con las posibles filtraciones.

Una vez seleccionados los diques, y, habiendo diseñado el esquema de funcionamiento de la explotación, se excava un sobre ancho en la sección de un metro. Posteriormente, se incluye el armado y los bulones, que constituyen el esqueleto de esta estructura artificial solidaria con la formación natural del basalto del propio dique geológico, incluyendo inyecciones de cemento. El montaje del armado, debe dejar paso a las conducciones de



Figura 5.17.- Cierre de hormigón en la galería de Iplán, en la Gomera.



Figura 5.18.- Cierre en la galería de Los Padrones en El Hierro.

fundición que serán las encargadas de drenar y regular el agua de una zona a otra y extraerla de la mina. También hay que dejar paso al tubo de ventilación para continuar con la perforación de la explotación.

Se pueden reconstruir varios diques en una sola explotación. El número de construcciones se establece en la capacidad de recarga del acuífero, características geológicas de la zona de influencia y de las estructuras geológicas (diques) que estén disponibles. La instalación de manómetros, para medir la presión ejercida por el agua en las diferentes estancias, es fundamental para gestionar el recurso, dado que nos suministra información de las diferentes cotas de agua, tras el dique reconstruido, así como la capacidad de recuperación tras su drenaje.

El sellado del dique se comienza una vez finalizado el armado. Se procede al hormigonado mediante bomba. La experiencia y los proyectos realizados (Soler, 2014), teniendo en cuenta en ambiente en el que se va a quedar la estructura, indican que con un HA-30 es suficiente. Para la compuerta de acceso a través del dique reconstruido, se deben dejar dimensiones suficientes para la explotación de la galería. Hay que tener muy en cuenta, rematar bien el sellado del dique para evitar la posibilidad de aparición de grietas, ya que podría arruinar la explotación por filtraciones. La zona más conflictiva, en este sentido, es la citada compuerta, por lo que conviene incluir unos neoprenos y comprobar la estanqueidad de la instalación, así como, asegurar que el fabricante de la puerta, certifique técnicamente que la estructura aguante presiones de unos 70-100 mca (metros de columna de agua).

Otra ventaja en este tipo de explotación, es el almacenamiento del agua en el propio acuífero por lo que está al margen de cualquier tipo de contaminación y a disposición de las demandas de recurso hídrico que se necesite. La puerta del cierre, como se ha comentado, debe soportar las elevadas presiones que ejerce el agua a trasdós. En casos que han sido estudiados, se han llegado a alcanzar 72 mca, como es el caso de la galería de los Padrones en la isla de El Hierro. Esta compuerta es de acero y hecha a medida, aunque en la última galería donde se ha incluido esta infraestructura, en La Gomera, la puerta se ha realizado mediante perfiles IPE y placas metálicas, debido a que el tamaño de la sección era es de grandes dimensiones.