



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE MINAS
Y ENERGÍA



Sondeos para explotación de acuíferos

Roberto Arranz-Revenga, Ph.D.

Juan Herrera Herbert, Ph.D.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA



POLITÉCNICA

Sondeos para explotación de acuíferos

Roberto Arranz-Revenga, Ph.D.
Juan Herrera Herbert, Ph.D.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA

SEPTIEMBRE | 2024

Esta página está en blanco intencionalmente.

Aviso legal

El presente documento se ha preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial. La respuesta ante un caso particular requerirá, siempre, de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso.

Copyright © 2024 – Roberto Arranz-Revenga & Juan Herrera Herbert.

Open Archives Initiative  La distribución de la obra está bajo los términos de la licencia *Creative Commons* Atribución 4.0 Internacional. Esta licencia permite compartir – copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre que: se cite debidamente a los autores originales y la fuente, se proporcione un enlace a la licencia *Creative Commons*, se indique si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de los licenciantes. No puede hacer uso del material con propósitos comerciales. Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado. No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia. Para más detalles sobre la licencia aplicada, visite: creativecommons.org.

Maquetación

El manuscrito ha sido editado, en formato electrónico, empleando XeLaTeX. Se ha usado como base el conjunto de clases y paquetes **KOMA-Script** a través de la clase **kaobook**. Esta clase es de dominio público y ha sido modificada por los autores.

DOI: [10.20868/UPM.book.84184](https://doi.org/10.20868/UPM.book.84184)

Archivo Digital de la UPM: [oa.upm.es:84184](https://oa.upm.es/84184)

Esta página está en blanco intencionalmente.

Índice general

Índice general	vii
1 Introducción	1
1.1 Clasificación de sondeos	2
1.2 Estudio hidrogeológico	4
1.3 Trámites administrativos	6
1.4 Etapas constructivas	8
1.5 Equipamiento del sondeo	9
1.6 Puesta en servicio	10
2 Proyecto de perforación	11
2.1 Documentos y estructura	11
2.2 Referencia legislativa	14
3 Construcción de sondeos	19
3.1 Programa de operaciones	19
3.2 Método de perforación	20
3.3 Diámetro del sondeo	22
3.4 Profundidad del sondeo	23
3.5 Emboquillado	24
3.6 Revestimiento temporal	26
3.7 Revestimiento definitivo	28
3.8 Ranurado	31
3.9 Engravillado	35
3.10 Sellado bentonítico	36
3.11 Cementado	37
3.12 Desviación del sondeo	40
4 Acondicionado y limpieza	43
4.1 Limpieza	43
4.2 Desarrollo	44
4.3 Higienizado	46
5 Sistemas de elevación de agua	49
5.1 Tecnologías de bombeo	49
5.2 Bombas volumétricas	50
5.3 Bombas centrífugas	52
5.4 Sistema de tuberías	52
5.5 Elementos auxiliares	54
6 Clausura de un pozo	59
6.1 Procedimiento de clausura	59
Bibliografía	65
Lista de acrónimos	69

Esta página está en blanco intencionalmente.

Índice de figuras

1.1 Imagen de tubificación natural en pendiente.	3
1.2 Imagen de la planta del Junco o Junquera (<i>Juncus effusus</i>).	4
3.1 Ejemplo de secuencia de operaciones de perforación, sellado y reperforación.	19
3.2 Pozo tradicional de Kerala, en la India.	21
3.3 Pozo escalonado en la India.	21
3.4 Pozo antiguo abandonado, con revestimiento de mampostería.	21
3.5 Concepto de Luz (<i>b</i>) de un sondeo.	22
3.6 Profundidad de sondeo en acuíferos confinados. Ejemplo de pozos artesianos.	23
3.7 Profundidad de sondeo en acuíferos libres. Ejemplo de pozos.	24
3.8 Brocal tradicional en <i>O Cebreiro</i> (Lugo).	25
3.9 Esquema de emboquillado.	25
3.10 Imagen de pozo de agua en el desierto.	26
3.11 Martillo en fondo roto percutivo ODEX.	27
3.12 Zapata de tubería de revestimiento.	28
3.13 Tubería de revestimiento HWT de 3.9" (98.8 mm) ø. Longitud entre 1.5 m y 3 m.	28
3.14 Esquema de revestimiento y emboquillado.	29
3.15 Revestimiento definitivo de gran diámetro helicoidal.	29
3.16 Tapa circular metálica soldada al final de la tubería de revestimiento.	30
3.17 Esquema de ranurado y cementado.	33
3.18 Detalle del filtro puentecillo.	33
3.19 Tubería de filtro de alambre continuo tipo <i>Johnson</i>	34
3.20 Detalle del esquema de filtro de alambre continuo tipo <i>Johnson</i>	34
3.21 Tubería de filtro de persiana.	34
3.22 Gravilla blanca de rodadura.	35
3.23 Tubería de PVC recubierta de grava.	36
3.24 Bentonita en forma de <i>pellets</i>	37
3.25 Bomba de tornillo para inyección de mortero.	37
3.26 Centrador metálico soldado a tubería de revestimiento.	37
3.27 Cementado por desplazamiento.	38
3.28 Cementado por tubería externa.	38
3.29 Métodos de cementado con tubería externa por el interior del revestimiento.	39
3.30 Cementado por obturador de desplazamiento.	39
3.31 Imagen de un inclinómetro comercial.	40
4.1 Ejemplo de filtro de doble enrejillado.	44
4.2 Fotograma de columna de agua vaciando un sondeo por la adición de hielo seco.	45
5.1 Esquema conceptual de funcionamiento de una bomba volumétrica.	50
5.2 Esquema conceptual de los elementos de una bomba centrífuga.	50
5.3 Elementos de una tubería de PE termosoldados a tope.	53
5.4 Acoplos de presión para unión de tuberías de PE.	53
5.5 Aro de cuello y brida loca.	53
5.6 Unión de tuberías mediante aro de cuello y brida loca.	53
5.7 Bomba de achique de agua sucia.	54
5.8 Cuadro de control para bombas trifásicas.	55
5.9 Esquema de válvulas antirretorno de resorte.	55

5.10 Imagen de un presostato electromecánico para bombas de banco.	56
5.11 Partes de un presostato electromecánico.	56
5.12 Esquema de una bomba de banco controlada por un presostato electromecánico y mejorada con acumulador de presión.	57
6.1 Fotografía de un punzonador hidráulico de tuberías.	61
6.2 Ejemplo de tubo punzonado hidráulicamente en pruebas de laboratorio.	61
6.3 Ejemplo de sellado de un pozo artesiano surgente mediante extensión de tubería e inyección de mortero de cemento.	62
6.4 Ejemplo de sellado de un pozo artesiano surgente mediante inyección de mortero de cemento y obturador inflable.	63
6.5 Ejemplo de sellado de un pozo artesiano surgente mediante: engravillado, resina acuarreactiva e inyección de mortero de cemento.	63

Índice de tablas

1.1 Clasificación de sondeos hídricos.	3
1.2 Tipo de datos hidrogeológicos.	5
1.3 Documentación habitual solicitada por la Administración.	7
1.4 Etapas en la construcción de un sondeo.	9
2.1 Planos mínimos a incluir en un proyecto de construcción de pozos de agua.	11
2.2 Leyes principales de minería y agua.	15
2.3 Ley de Minas y sus modificaciones hasta la fecha.	16
3.1 Valores de luz (b) recomendados y rango de coeficientes (f) correspondiente.	22
3.2 Tabla de espesores de tuberías metálicas de revestimiento recomendados.	30
3.3 Velocidad optima del agua a través de las ranuras v en función de la permeabilidad del suelo K (Conductividad hidráulica).	32
3.4 Tabla de ancho de la rejilla y engravillado en función de la granulometría del suelo.	36
4.1 Tabla de uso de lejía al 5% en peso para higienizado de pozos.	46
4.2 Tabla de uso de lejía al 12% en peso para higienizado de pozos.	47
5.1 Tabla de pérdidas de carga, expresado en mca, debido a la altura sobre el nivel del mar.	51
5.2 Tabla de pérdidas de carga, expresado en mca, debido a la temperatura del agua bombeada.	51

1

Introducción

El agua es el recurso natural más importante que existe. Se usa para consumo humano, agrario, ganadero e industrial. Sin su existencia no es posible ningún tipo de vida. Por ende, es un bien cada vez más escaso.

Un aumento en la demanda, como consecuencia de la concentración de las poblaciones humanas en grandes ciudades, hace imprescindible un suministro de agua constante y asegurado. Es por eso por lo que se construyen grandes infraestructuras en forma de acueductos y embalses a lo largo de todo el mundo. Además, es necesario un sistema, igualmente ambicioso, de canalización y tratamiento de aguas residuales. Ya sean urbanas o industriales, las aguas negras son un problema tan grande como la escasez de agua en sí.

Aunque para grandes ciudades la mayor parte del agua proviene de ríos y embalses, existen otros puntos donde también es necesario el agua y no existen infraestructura de grandes dimensiones para su transporte. Otro caso son los pequeños núcleos de población o industriales donde no es viable la construcción de grandes sistemas de almacenado o transporte de agua. En estos casos se suele optar por agua de procedencia subterránea. Para obtenerla existe una serie de tecnologías, perfeccionadas a lo largo de los milenios y que están ligadas a las técnicas mineras de los sondeos y la perforación.

Como se ha visto, el agua es un bien preciado y por tanto también lo son los yacimientos de agua. Aunque este término resulte extraño a una persona que viva al lado de un río o un embalse, no lo es tanto para una persona que viva en una zona desértica o incluso en una isla como Tenerife¹ u otras, donde se realiza verdadera minería con miles de metros de galerías subterráneas para obtener el preciado elemento.

Existe un delicado equilibrio entre los acuíferos y su entorno debido a que son un disolvente natural de sales y sustancias minerales y, además, albergan vida microbiana. Es por esto por lo que es imprescindible ser muy escrupulosos, tanto con la normativa legal vigente como con las buenas prácticas en la construcción y puesta en servicio de un sondeo de agua. Esto es extensible a los sondeos de investigación hidrogeológica o de control.

La existencia de varios acuíferos atravesados por un mismo sondeo puede provocar desastres de muy difícil solución, en caso de ponerlos en comunicación entre sí. Este es el caso de acuíferos con diferente salinidad como el caso de acuíferos e intrusiones marinas a diferentes cotas².

Los materiales empleados en las canalizaciones, sistema de bombeo, válvulas de control, etc. deben ser compatibles con el medio ambiente. Además, se deben cumplir los requerimientos técnicos de la instalación para garantizar caudales y presiones nominales del proyecto. Y en función del entorno químico, se deben garantizar su correcto funcionamiento durante la vida útil del equipo. Siendo importante la protección contra la corrosión debido a un pH elevado o a la salinidad de la zona. Así mismo, los morteros a base de cemento o cemento-bentonita, empleados en

1.1 Clasificación de sondeos	2
1.2 Estudio hidrogeológico	4
1.3 Trámites administrativos	6
1.4 Etapas constructivas	8
1.5 Equipamiento del sondeo	9
1.6 Puesta en servicio	10

1: Situada en las Islas Canarias, posee algunas de las mayores minas de agua de España.

2: A modo de ejemplo, en las costas de Almería, en el levante español, las intrusiones marinas de agua salada pueden arruinar acuíferos de agua dulce si entran en contacto con ellos.

el sellado de las tuberías de revestimiento, deben asegurar su estabilidad química. Esto evita su descomposición prematura frente a minerales existentes en el suelo como son los yesos o las sales. En todo caso es fundamental un análisis minucioso del entorno geológico y de los posibles riesgos medioambientales que conlleva la perforación de sondeos para captación de agua o de investigación hidrogeológica.

Por último, y a modo de aclaración, existe una cierta controversia por el uso de la palabra, de uso tradicional, “pozo” frente a la más moderna “sondeo”. Para algunos el empleo de la palabra “pozo” se refiere a sondeos para la prospección de agua y los perforistas especializados en este tipo de perforaciones son denominados “poceros”. Sin embargo, también se habla de “pozo” de petróleo o geotérmico sin que tengan relación unos con otros. Para otros la diferencia entre “pozo” y “sondeo” se refiere al diámetro y la profundidad de este. Siendo el término “pozo” el más usado para perforaciones de menor profundidad y mayor diámetro. Con valores cercanos a los 20 m de profundidad y diámetros superiores a 1.5 m. Por último, hay quien emplea el término “sondeo”, en el ámbito hídrico, para referirse a las perforaciones en la investigación hidrogeológica.

Dado que el español es una lengua viva, en evolución constante y con diferentes variantes en los distintos países de habla hispana, el término empleado dependerá mucho de las circunstancias locales. Sea cual sea el vocablo empleado lo importante es la claridad y detalle a la hora de exponer el uso y las características de la perforación a realizar³.

1.1 Clasificación de sondeos según su uso

Tradicionalmente se han realizado sondeos para obtener agua para consumo y agricultura, pero existen muchos más usos que, a menudo, se olvidan. Estos usos son diversos: como pozos de achique en obra civil, drenajes en espacios subterráneos como explotaciones mineras o túneles y sondeos piezométricos para estudios hidrogeológicos.

El uso del pozo indica el tipo de agua que se va a extraer y por tanto que tipo de instalación o instrumentación será necesaria durante la construcción del sondeo. Así, no es igual obtener agua dulce que agua salobre o incluso una salmuera. Siendo la corrosión el principal factor a tener en cuenta, en este caso⁴.

De esta manera se pueden definir, a grandes rasgos, varios tipos de sondeos de agua según el uso que se haga de los mismos que figuran en la Tabla 1.1 de clasificación y que se pueden agrupar a su vez en cuatro subgrupos.

El primer subgrupo hace referencia al uso directo del agua. Son los sondeos más comunes para obtención de agua subterránea y su objetivo es el abastecimiento de agua potable, en el caso de la ganadería y el consumo humano, y agua de riego para la agricultura⁵. En el caso del agua mineral, la diferencia está en la certificación otorgada por la administración y la normativa adicional aplicable, según la Ley de Minas [1].

Cuando el uso del agua es para un propósito indirecto como, por ejemplo, el empleo de aguas termales para aprovechar su energía térmica se clasifica según el segundo subgrupo. Normalmente se emplea para usos

3: En cuanto a la bibliografía anglosajona, se emplea la palabra “well” para referirse a un pozo y el término “borehole” para referirse a un sondeo o perforación. El uso de estas palabras en inglés es similar al empleado en español.

4: Algunos cultivos son muy sensibles a la salinidad del agua de riego, como el caso del *Aloe vera*. Pequeños cambios de salinidad pueden arruinar la cosecha.

5: Se distingue entre agua potable y de riego, porque cumplen otros estándares de calidad según la normativa vigente. En ningún caso, el agua empleada en riego es tóxica o peligrosa.

Finalidad	Detalle de uso
Uso directo	Agua para agricultura
	Agua para consumo humano y ganadería
	Agua minero medicinal
Uso indirecto	Agua minero industrial
	Uso de aguas termales
	Uso industrial del agua
	Uso en lixiviaciones
Drenado	Achique para vaciados en obra civil
	Achique en minas bajo nivel freático
	Drenes en obra civil y estabilizado de suelos
	Drenes en obra subterránea
Investigación	Sondeos piezométricos y de investigación

Tabla 1.1: Clasificación de sondeos hídricos. Fuente: los autores.

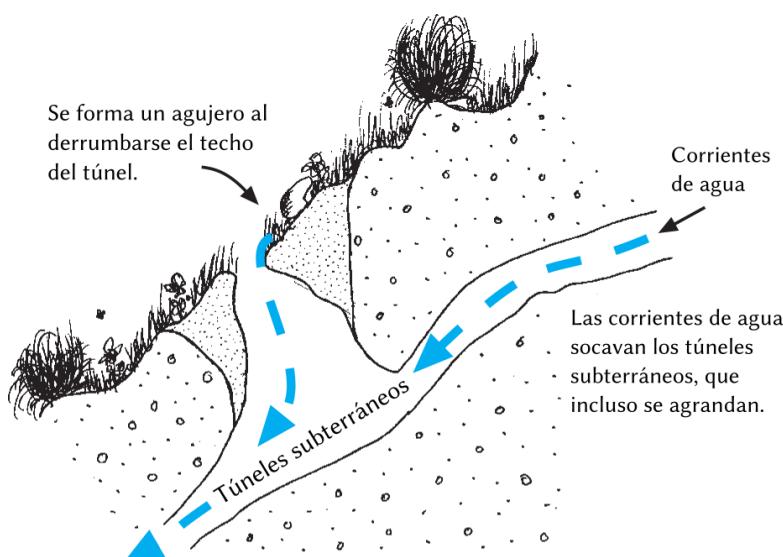
industriales, y en ocasiones el objeto son las sales disueltas en ella. Ya sea de forma natural, en forma de agua minero industrial, o artificial, como el caso de las lixiviaciones.

El tercer subgrupo consiste en extraer agua como residuo o elemento no deseado, y su posterior vertido controlado. Un ejemplo en obra civil es el achique en zonas donde se va a producir un vaciado de terreno y están saturados en agua. En minería el achique del agua contenida en los niveles situados bajo el nivel freático.

Aunque los más comunes son los drenes para evacuado de agua procedentes de filtraciones. Esto permite estabilizar el suelo, evitando aumentos de presión, lavado de finos⁶ o, en el peor de los casos, tubificaciones⁷ como se muestra en la Figura 1.1.

Por último, están los sondeos piezométricos y de investigación, que se emplean para el control de niveles freáticos, entre otros.

Como se puede apreciar existe una variedad de usos muy amplia y algunas requieren de una alta especialización a la hora de acometerlos.



6: El lavado de finos es un problema que puede dañar gravemente las edificaciones cercanas, socavando parte de su cimentación. Puede ocasionar grietas y fisuras en edificios e instalaciones. Se suele producir cuando aparecen filtraciones de agua, que arrastran la fracción de menor granulometría del suelo bajo la cimentación. De esta forma se reduce la cohesión y se pierde capacidad portante del suelo.

7: La sufusión o tubificación consiste en la formación de conductos o tubos subsuperficiales que en ocasiones pueden llegar a diámetros de varios metros. Una vez formados permiten el arrastre y evacuación de material sólido. Generando una gran erosión. Sus efectos pueden ser catastróficos [2-5], como se muestra en la Figura 1.1.

Figura 1.1: Imagen de tubificación natural en pendiente, con apertura de cavidad en superficie. Fuente: [5] Traducida.

1.2 Estudio hidrogeológico

Desde que se empezaron a realizar pozos para la obtención de agua, hace milenios, los perforistas emplean conocimientos tradicionales para buscar el mejor sitio para ubicarlos. Normalmente este conocimiento se basa en la observación de la naturaleza y en la experiencia transmitida durante generaciones. Un ejemplo es la búsqueda de determinadas plantas que indican la presencia de agua a poca profundidad, como se muestra en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Un ejemplo de planta que indica la presencia de agua subterránea superficial es el caso del junco o junquera (*Juncus effusus*) que se da en marismas, pero que a veces también surge de manera aislada en mitad del campo. Los lugareños saben que si caván al lado de la planta encontraran agua a muy poca profundidad. Fuente de la imagen: [6].

En otras ocasiones se emplean los servicios de personas con una sensibilidad especial para detectar anomalías o discontinuidades en el subsuelo. Aunque no hay estudios científicos que avalen la eficacia de estas técnicas se llevan empleando desde tiempos inmemoriales. Son los llamados zahories o radiestesistas y se valen de elementos sencillos como un par de varillas metálicas, una vara de madera o un péndulo para detectar la presencia de agua subterránea. Su percepción produce un efecto ideomotor en la herramienta empleada para encontrar agua.

Por supuesto hoy en día estas técnicas están en desuso y quedan como vestigio de una época donde no se disponían de tanta información y medios como hay en día. Por supuesto, estas técnicas no tienen cabida en un proyecto actual.

Origen de información de datos hidrogeológicos

- ▶ Información propia de la empresa de sondeos
- ▶ Organismos e instituciones
- ▶ Datos de campo e inferidos

Esto es especialmente cierto si se pretende planificar una serie de sondeos para una explotación agraria o de suministro de agua, en la que los

rendimientos de los pozos, caudales y tiempo de recuperación son imprescindibles para que la Administración apruebe el proyecto. Sin justificación adecuada no hay autorización. No obstante, sigue siendo costumbre, sobre todo en el medio rural, el mantener una charla informal con el "pocero" de la zona para consultarle sobre la viabilidad de la construcción de un pozo productivo en un lugar concreto⁸.

Es necesario un estudio hidrogeológico antes de empezar a perforar. El estudio tiene dos fases, como se muestra en la Tabla 1.2. La primera fase tiene similitud con la fase de exploración minera y comienza con el acopio de información local. Normalmente las fuentes de información que se tienen son propias, como trabajos realizados por la empresa perforista con anterioridad, en la zona, o contactos con otras empresas colaboradoras locales. Otra fuente fundamental son los organismos públicos involucrados directamente, como las Conferencias Hidrográficas afectadas, e indirectamente, como el IGME. Por último, se pueden tomar datos de campo de primera mano, siempre que no suponga la realización de sondeos o cambios en el paisaje.

Posteriormente se procede, si es el caso, a una segunda fase de sondeos de investigación para verificar el grado de correlación entre los datos bibliográficos obtenidos en la primera fase y las pruebas de campo. Estos datos experimentales permiten hacer una proyección de: localización y profundidad de los sondeos, caudal esperado y en qué condiciones, capacidad y tipo de bombas a usar, diámetro del sondeo, energía eléctrica necesaria, régimen de funcionamiento diario y un largo etcétera de ítems imprescindibles para elaborar un proyecto detallado. Aun así, puede ser necesario la realización de diversos ensayos una vez terminada la construcción de los sondeos que figuran en el proyecto.

Un mal estudio hidrogeológico, o uno inexistente, puede provocar un incremento importante de costes y por tanto un grave perjuicio para la viabilidad económica del proyecto. Debe ser realizado por un equipo de profesionales competentes y con experiencia. Otro tanto ocurre para la redacción del proyecto de perforación y la ulterior construcción de los sondeos.

Como es evidente el estudio hidrogeológico se tiene que adaptar al objetivo y alcance del proyecto. No tendría sentido alguno gastar miles de euros en un estudio y varios miles más en la ejecución de algunos sondeos de investigación como preámbulo a la construcción de un pozo de abastecimiento para una vivienda unifamiliar. Por contra, una campaña de sondeos de bombeo de agua para drenar una mina de interior no tiene sentido sin un exhaustivo estudio hidrogeológico.

Fase	Tipología de la fuente de datos
Exploración	Catálogo de acuíferos inventariados
	Catálogo de pozos de agua local
	Hoja geológica de la zona
	Estructuras geológicas afectadas
	Analíticas de muestras de agua
Investigación	Sondeos hidrogeológicos
	Pruebas de bombeo preliminares

8: Aunque esto pueda parecer contradictorio, se hace con frecuencia. Sobre todo, si se considera la práctica, cada vez más perseguida, de la realización de pozos ilegales. Los cuales no tienen ningún tipo de control ni supervisión por parte de la Administración. Son un riesgo para la sostenibilidad de los acuíferos. Y perjudican a los regantes locales.

1.3 Trámites administrativos

En España el agua pertenece al Estado. Por tanto, es la Administración quien tiene que autorizar la perforación y puesta en funcionamiento de cada pozo instalado. En el momento de redactar este documento, existen tres niveles de administraciones públicas involucradas en el proceso de legalización de pozos de agua: administración central, administración autonómica y administración local (ayuntamientos). Cada una de ellas juega un papel concreto y cada una de ellas tiene sus propios criterios, procedimiento administrativo y tasas.

¿Qué trámites hay que seguir para solicitar la perforación de un pozo para la extracción y empleo de agua?⁹ Los motivos para ejecutar la construcción de uno o varios pozos de agua son diversos y dependen del uso que se le vaya a dar al agua. Por tanto, se debe seguir la clasificación según lo previsto en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico - Real Decreto 849/1986, de 11 de abril [7] y de la Ley de aguas - Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio [8].

Los permisos para hacer un pozo de agua siempre son de tipo administrativo, pero los procedimientos para llevar a cabo su solicitud pueden variar de acuerdo con la comunidad o ayuntamiento correspondiente. Se puede consultar a modo de resumen la documentación más importante que se suele solicitar en la Tabla 1.3.

El agua no puede venderse directamente en el mercado, al menos el agua en su estado natural. Así, la comercialización de agua potable sea mineral o no, es fruto de un permiso de explotación previo. Este es concedido a un productor que paga unos impuestos para poder extraer el agua y distribuirla después, como parte de un negocio. El agua de riego es gestionada por el órgano administrativo de cuenca correspondiente¹⁰, que es un organismo que depende de la Administración Central. El agua para consumo humano, y su depuración posterior, es gestionada por un ente bajo control público¹¹.

Esto significa que un particular o una empresa tiene garantizado el suministro de agua corriente y la gestión de las aguas residuales urbanas o industriales, en las zonas edificables o industrializables legalmente establecidas. Por tanto, si se quiere realizar un proyecto de sondeos para extraer agua, más allá del servicio que presta la administración, hay que gestionarlo a través de la Confederación Hidrográfica que corresponda a la zona donde están ubicados los pozos. En estos casos es necesario legalizar dichos pozos.

La Administración, a través de la Confederación Hidrográfica correspondiente, fiscaliza la extracción de agua, tanto en volumen como en caudal. Se asigna para ello contadores y se controla la cantidad máxima extraída durante períodos determinados de tiempo, normalmente períodos de 24 horas y de 30 días. De esta manera se pretende asegurar que todo el mundo puede acceder al agua que se le ha asignado. Lo mismo sucede para su uso en ganadería o para usos industriales, en zonas no habilitadas, etc.

En todos los casos hay que pagar por el agua. Siendo el precio que pagar muy inferior al coste real que esta tiene. Debido a que en el cálculo del precio debería incluirse el coste de depurado de aguas residuales, tanto

9: Conviene recalcar las palabras “extracción” y “empleo” que significa explotación, en este contexto. La extracción de agua por otros motivos como el achique o el drenado no entra dentro de este planteamiento.

10: Por ejemplo la Confederación Hidrográfica del Tajo.

11: En la Comunidad de Madrid es Canal de Isabel II.

Trámite	Organismo	Necesidad
Proyecto	Confederación Hidrográfica	Obligatorio
Tasas de perforación	Dir. Gral. de Minas	Obligatorio*
Seguridad y Salud	Dir. Gral. de Minas	Obligatorio*
Impacto Ambiental	Confederación Hidrográfica	Según casos
Licencia de obra	Ayuntamiento	Según casos

Tabla 1.3: Documentación habitual solicitada por la Administración. Fuente: los autores.

* La Dirección General de Minas tiene competencia en la construcción de sondeos debido a que se emplea tecnología minera. No importa que el sondeo no se use para explotar agua.

urbanas como industriales, la infraestructura de distribución, el bombeo, la gestión de avenidas por aguas torrenciales y un largo etcétera.

La importancia de la depuración de agua suele pasarse por alto o darle menos importancia de la que tiene. Esto es especialmente cierto con los vertidos de grandes cantidades de agua al sistema de alcantarillado en entornos urbanos. En la Tabla 1.1 se mencionan los sondeos de achique. Con ellos se bombea agua para “secar” un volumen de terreno saturado en agua. Esto hace que el nivel del agua descienda por debajo de la cota de trabajo de la obra civil. Esta operación es frecuente, sobre todo en la construcción de aparcamientos subterráneos bajo nivel freático. Frecuentes en ciudades costeras o atravesadas por un río caudaloso. En estos casos es necesario “secar” el subsuelo empleando para ello grandes bombas. Aunque el vertido del agua bombeada se suele realizar directamente en el río o el mar, en algunos casos, el vertido debe realizarse directamente en el sistema de alcantarillado.

No hay que olvidar que el depurado de aguas es un proceso complejo, en el que se acelera de manera artificial el tratamiento de desechos de origen orgánico. Para ello se emplean métodos basados en microorganismos mediante cultivos controlados en la planta de depurado. El bombeo y posterior vertido de agua “limpia” al sistema de alcantarillado causa un desajuste en la composición global del agua que llega a las plantas de tratamiento. Este desajuste puede ser importante en algunos casos. Y por ello es necesario un afinado constante de las condiciones de funcionamiento del proceso de depurado¹².

Por todo ello, en el momento de solicitar permiso para perforación de pozos de agua para realizar un bombeo de achique hay que pedir permiso al Ente encargado de la gestión del depurado del agua que deberá autorizar el vertido al sistema de alcantarillado, y pagar las correspondientes tasas de vertido¹³.

A modo de comentarios finales de esta sección, con respecto a la Tabla 1.3, se debe tener en cuenta que el papel de la Administración local únicamente es preceptivo en caso de que las ordenanzas municipales así lo indiquen. Normalmente se aplican si está involucrado una licencia de actividad dentro de un edificio o bien una obra de mejora dentro del inmueble. En el caso de la construcción de uno o varios pozos para riego, por ejemplo, el ayuntamiento, normalmente, no interviene.

Algo parecido sucede con respecto al Estudio de Impacto Ambiental. El que se solicite o no dependerá de la entidad del proyecto o de las circunstancias particulares de este, como por ejemplo su ubicación. La competencia de medio ambiente corresponde a las Comunidades Autónomas, sin embargo, las Cuencas Hidrográficas dependen del Ministerio correspondiente. Por tanto, en estos casos convergen los dos intereses y se suele aplicar la normativa más restrictiva.

12: Por supuesto, lo mismo ocurre en caso de fuentes lluvias en períodos de tiempo muy cortos.

13: Aunque el sondeo no tenga como objetivo la producción de agua para su aprovechamiento.

La discusión, en detalle, de la casuística legal está fuera del alcance y propósito de este texto, debiéndose estudiar en profundidad y de manera individual para cada caso concreto. Debe considerarse la Legislación aplicable como un ente “vivo” que está en constante evolución, con legislación que crece, cambia y “muere” al derogarse. Por tanto, hay que revisarla al comienzo de cada proyecto y no dar por hecho que es inmutable¹⁴ o permanente.

14: Todo proyecto está sujeto a las leyes y normativa en vigor en el momento de su tramitación administrativa. Nunca la normativa anterior ni la posterior.

1.4 Etapas constructivas de un sondeo

Más allá de los trámites legales, vistos en la sección 1.3, tanto las normas como los procedimientos se derivan, en mayor o menor medida, de los estándares de la *American Water Works Association (AWWA)* [9]. La mayoría regulan los siguientes aspectos:

Aspectos regulados por la normativa técnica [9]

- ▶ **Documentación** mínima a presentar para la obtención de las autorizaciones.
- ▶ **Ubicación** del sondeo. Distancias a edificios u otras instalaciones, ubicación en zonas inundables.
- ▶ **Entubado**. Se regula la calidad de los materiales, los modos de instalación, la estanqueidad de estos, el tipo de rejillas, filtros de gravas, etc.
- ▶ **Cementación**. Se regulan los métodos de cementación y las profundidades de esta, en función del tipo de acuífero y la calidad de los materiales empleados.
- ▶ **Verticalidad**. Se regulan los límites de verticalidad y alineación, así como los métodos de comprobación de esta.
- ▶ **Cierre de la cabeza del pozo y protección sanitaria**. Se regulan los sistemas de cierre de la cabeza del pozo, a efectos de garantizar su estanqueidad y su protección sanitaria.
- ▶ **Acabado y desinfección**. Se regulan los métodos de desarrollo, las sustancias a utilizar, su dosificación y modos de aplicación y los ensayos de bombeo.
- ▶ **Clausura**. Temoporal o permanente.

Todo sondeo, destinado a la explotación de agua o no, se realiza según una serie de etapas que emplean diferentes técnicas para la construcción de éste. Unas son de propósito general y otras son específicas para cada tipo de sondeos.

En el caso de los sondeos para explotación de acuíferos las fases para la construcción de un pozo son las indicadas en la Tabla 1.4.

En el caso de sondeos de extracción de agua para un uso diferente a su uso directo, no se puede generalizar, más allá de las fases obligatorias descritas en la Tabla 1.4.

En todos los casos esta información debe estar reflejada en el proyecto de legalización de los pozos. El proyecto debe ser presentado junto con un

proyecto, por separado, de Seguridad y Salud específico. Una vez aprobados ambos proyectos por las autoridades competentes en cada caso, y pagadas las correspondientes tasas de perforación se podrá comenzar con la perforación de los sondeos necesarios.

Etapas	Necesidad
Redactado del proyecto de perforación	Obligatorio
Redactado del proyecto de Seguridad y Salud	Obligatorio
Pagado de tasas de perforación	Obligatorio
Perforación según el método elegido	Obligatorio
Protección de la boca del pozo	Obligatorio
Revestimiento definitivo	Según casos
Revestimiento temporal	Según casos
Sistema de filtro	Según casos
Empaquetadura de grava	Según casos
Cementado	Según casos
Equipamiento del sondeo	Según casos*
Limpieza y acondicionado	Obligatorio
Higienizado	Agua potable

Tabla 1.4: Etapas en la construcción de un sondeo. Fuente: los autores.

* Si el pozo es artesiano, y tiene suficiente presión, no será preciso la instalación de un sistema de bombeo, aunque si otro tipo de equipamiento.

Cada una de estas fases se verá con más detalle a lo largo del texto. Señalando las partes más importantes sin perjuicio de una ampliación de contenidos posterior.

1.5 Equipamiento del sondeo

En general, casi todos los pozos para la captación de agua y para investigación hidrogeológica necesita equiparse con una serie de elementos auxiliares como son las bombas de extracción o los sensores para tomar diversas medidas.

Esta instalación de equipos auxiliares debe estar perfectamente detallado en el proyecto de perforación puesto que afectan directamente a varios aspectos del pozo en la etapa de construcción. El primero es de índole mecánico y geométrico mientras que el segundo tiene que ver con la infraestructura necesaria para que el sondeo cumpla su función. Así, para saber el diámetro del sondeo es necesario saber las dimensiones de la bomba que se va a emplear y otros aspectos como el tipo de tuberías que se emplearan para bombear el agua hasta la cota del suelo. Es importante saber si la bomba es eléctrica o con motor de combustión y la instalación de los elementos auxiliares propios de cada sistema.

Por otra parte, es necesario otro tipo de elementos que también forman parte del sondeo como son el contador de agua, para el control y la supervisión por parte de la Confederación Hidrográfica, así como otros elementos auxiliares: control de niveles, temporizadores, alarmas, sistemas de envío de señales de control, etc.

No se puede pasar a la siguiente fase, que es la puesta en servicio, hasta que el equipamiento del sondeo no se ha completado y se ha comprobado que funciona según lo esperado.

1.6 Puesta en servicio

Una vez que se la instalación de todos los elementos auxiliares y de control del sondeo están totalmente terminados y funcionan, es preciso realizar una serie de operaciones antes de poner el sistema en funcionamiento de manera oficial.

La primera de ellas es la fase de limpieza y acondicionado. En ella se eliminan restos del proceso de perforación, como restos de lodo bentonítico o polimérico¹⁵. Estos lodos forman la llamada “costra” y muchas veces hacen que la productividad del pozo disminuya notablemente al cegar parcialmente la capa de producción del acuífero.

Procesos de limpieza y acondicionado

- ▶ Eliminación de “costra” de lodos de perforación.
- ▶ Limpieza de detritus y dragado del fondo.
- ▶ Aumento de superficie útil de filtrado en el acuífero.
- ▶ Higienizado (en caso de agua potable).

15: En ocasiones se producen vertidos accidentales de aceite hidráulico o combustible en el interior del pozo, pero su eliminación no entra dentro del proceso denominado de “limpieza”, puesto que estos vertidos son accidentales y por tanto deben ser evitados. En este caso su eliminación se considera la reparación de una contingencia.

16: En ocasiones sea necesario realizar parte de estas operaciones antes de finalizar la construcción del sondeo.

17: Esto no exime de tratamiento posterior del agua con cloro u oxígeno activo en el depósito de almacenamiento.

En ocasiones el proceso de perforación genera detritus que obstruye parcialmente la capa productiva, en estos casos es necesario su retirada para que el agua pueda bombearse con eficacia. También se da el caso de que la capa productiva tiene poca superficie útil, por diversos motivos. Los tratamientos y operaciones para mejorar la superficie filtrante del sondeo son clasificadas como operaciones de acondicionado. Por su puesto estas operaciones se realizan sobre el terreno y no sobre la tubería de revestimiento¹⁶.

En caso de que el sondeo tenga como uso la producción de agua potable es preciso un tratamiento previo de higienización. Este proceso elimina los patógenos que pudieran contaminar el sondeo durante la construcción del pozo¹⁷.

Una vez limpio y acondicionado, y en su caso higienizado, se procede a la colocación del precinto en el contador de agua por parte de la Confederación Hidrográfica. En este punto se comienza a contabilizar el agua extraída y la instalación se ha puesto en servicio oficialmente. Estará en producción mientras no se solicite su baja en el sistema.

En este punto conviene distinguir entre un pozo inactivo y uno abandonado. Un pozo inactivo es aquel que es perfectamente capaz de producir agua, pero que por decisiones del propietario no lo hace. Para estos casos puede solicitarse una clausura temporal. No obstante, legalmente se considera un pozo abandonado, según el artículo 66.2 de la ley de aguas [8] cuando este lleve tres años consecutivos sin usarse.

Por tanto, lo más probable es que no esté en condiciones de emplearse para la extracción de agua o necesite una puesta a punto. En todos los casos se debe revisar su estado administrativo para decidir cómo proceder.



Proyecto de perforación

2

2.1 Documentos y estructura

2.1 Documentos y estructura . . . 11

2.2 Referencia legislativa . . . 14

Como ya se ha citado en el Capítulo 1, para solicitar un permiso de captación de aguas subterráneas es necesario presentar un proyecto ante la Confederación Hidrográfica correspondiente y ante la Dirección General de Minas.

Aunque cada proyecto es único por las características intrínsecas de la obra, se presenta una estructura de lo que cualquier proyecto de captación de aguas subterráneas debería contener. Las características y apartados descritos son de carácter general, ya que el texto no pretende ser exhaustivo en este asunto. Por el contrario, pretende dar una idea sucinta sobre el tema y algunas peculiaridades que suelen aparecer, de manera específica, en este tipo de documentos.

Como cualquier proyecto está formado por una serie de documentos. Constituyendo como mínimo de: memoria, pliego de condiciones, presupuesto y planos. Un proyecto, así como los documentos que lo integran, una vez firmado es legalmente vinculante. Según la norma UNE 157001:2014 [10], mientras no se especifique en el proyecto lo contrario, el orden de prioridad legal de estos documentos es el siguiente:

Orden de prioridad de los documentos

1. Planos
2. Pliego de Condiciones
3. Presupuesto
4. Memoria

En los planos se suelen incluir, como mínimo, los elementos que se muestran en la Tabla 2.1.

Se adjunta un plano catastral, en caso de estimarse oportuno, donde se indica la localización de los sondeos. Mientras que en el plano de detalle y el general se indica donde se encuentra la parcela donde se realizarán las perforaciones.

Descripción	Escala
Plano de situación general	E 1:50 000
Plano de situación detalle	E 1:10 000
Plano geológico	E 1:50 000
Sección constructiva del sondeo	Sin escala
Planos de la instalación de la bomba	Variable
Esquemas eléctricos de la bomba	Sin escala
Tendido eléctrico	Variable
Red de tuberías	Variable

Tabla 2.1: Planos mínimos a incluir en un proyecto de construcción de pozos de agua. Fuente: los autores.

El tendido eléctrico, para suministrar electricidad al sistema de bombas, puede ser aéreo o soterrado. En este último supuesto se debe añadir un plano de la sección transversal de la zanja por la que discurre la conducción eléctrica, indicando las medidas de protección y señalización de esta. Lo mismo ocurre si existe una red de tuberías en superficie para la canalización del agua.

En ocasiones, junto con los sondeos, se construyen depósitos de almacenamiento para el agua extraída. Es necesario adjuntar los planos necesarios de este tipo de instalaciones.

Como norma general, el número y tipología de los planos puede aumentarse en función del proyecto y de lo que indique la legislación. Aun así, la Administración puede solicitar información adicional si, a juicio de sus técnicos evaluadores, no está suficientemente claro algún punto o se aprecian errores o incoherencias en la documentación presentada. Dado que el tiempo de respuesta exigido para subsanar deficiencias suele ser de pocos días, es conveniente solicitar una cita previa con dichos técnicos para aclarar cualquier duda. Por supuesto esto debe hacerse antes de presentar el proyecto.

El pliego de condiciones debe contener la localización exacta de los sondeos a perforar, las características técnicas mínimas que debe cumplir la instalación, como el caudal mínimo y la presión de servicio, etc. También contendrá las verificaciones y las pruebas de servicio mínimas a realizar para comprobar la instalación. Y por último las especificaciones de los materiales a emplear en la construcción del sondeo, como el calibre de la empaquetadura de grava, el tipo de cemento o de bentonita, si se emplean sellos impermeables entre capas.

El presupuesto deberá contener el cálculo del precio, incluyendo el desglose de los impuestos. Para ello se detallan los precios unitarios por cada unidad de obra y su correspondiente medición, especificando la unidad de medida. También se indica la suma parcial de cada capítulo y el precio total del proyecto, incluida la forma de pago.

La memoria es el documento más extenso cuyo índice habitual es el siguiente:

Apartados de la Memoria

- ▶ Antecedentes y objeto del proyecto
- ▶ Intervinientes
- ▶ Legislación aplicable
- ▶ Localización y emplazamiento
- ▶ Hidrogeología
- ▶ Geología
- ▶ Construcción de los sondeos
 - Métodos de perforación
 - Programa de operaciones
 - Revestimiento
 - Engravillado
 - Limpieza e higienizado
- ▶ Anexos

En todo caso, la memoria del proyecto debe definir, como mínimo, los siguientes puntos:

Aspectos mínimos a clarificar [9]

- ▶ Profundidad total de la obra, diámetros de perforación y de entubación.
- ▶ Perfil litológico previsto e identificación de las formaciones acuíferas.
- ▶ Características de las tuberías de revestimiento y de los tramos filtrantes previstos, características de la cabeza del pozo (cimentación superficial y cierre), características de la solera entorno de la perforación y las medidas de drenaje y para evitar la acumulación de agua sobre la misma.
- ▶ Tramos a cementar y métodos de cementación.
- ▶ Definición de la testificación geofísica a realizar.
- ▶ Método de perforación.
- ▶ Dispositivo de cierre para sondeos surgentes.
- ▶ Nivel estático, nivel dinámico, caudal punta y caudal medio de explotación previstos.
- ▶ Métodos de desinfección y de desarrollo previstos. Ensayos de bombeo.
- ▶ Procedimiento de abandono de sondeos negativos o descartados por alguna causa.
- ▶ Uso de las aguas. Si es agrario indicar superficie de riego, dotación ($m^3/ha/año$); si es ganadero número de cabezas y su dotación. En general indicar las dotaciones para estimar el volumen de extracción anual previsto y en lo posible del régimen a lo largo del tiempo.
- ▶ Equipamiento electromecánico previsto para la extracción de aguas subterráneas.
- ▶ Medidas medioambientales (impermeabilización de la balsa de lodos de perforación, recogida selectiva de residuos producidos y medidas protectoras y correctoras frente a posibles derrames de productos contaminantes y actividades diversas durante la perforación, acabado y ensayos).
- ▶ Plan de control de calidad de los trabajos.

En la sección de localización y emplazamiento deben figurar las coordenadas de los sondeos. Para ello se empleara el sistema de coordenadas proporcionadas por el sistema de proyección universal transversal de *Mercator UTM*¹, el uso al que pertenece y la profundidad de cada perforación. El *datum* geodésico a emplear, para referenciar los sondeos, es el estipulado legalmente es ese momento. A día de hoy viene recogido en el Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio [11]². Una peculiaridad que destaca de este sistema de coordenadas es que se emplea el metro como unidad de medida, en lugar de los minutos y segundos de arco.

El sistema de referencia puede variar de una Comunidad Autónoma a otra, en función de su localización geográfica. De manera que el empleado en las Islas Canarias no tiene por qué coincidir con el usado en Castilla León, por ejemplo.

1: O en el sistema de proyección que lo sustituya, por ley.

2: No se debe usar ningún otro, porque esto ocasionaría la localización errónea de los sondeos. Por tanto, se recomienda emplear la herramienta, *on line*, que proporciona la Dirección General de Minas de cada Comunidad Autónoma para localizar los sondeos. Esta misma herramienta sirve para calcular las tasas de perforación.

2.2 Referencia legislativa

3: Las Directivas Europeas han sido traspuestas a la normativa nacional y por tanto no se hace referencia a ella de manera directa.

La sección de legislación aplicable, en la memoria, contiene un listado de referencias bibliográficas del conjunto de leyes, normativa y reglamentos que se aplican en el proyecto. Pueden abarcar un amplio abanico de temáticas, desde medio ambiente a seguridad y salud, pasando por tecnología minera. También se consideran las ITC correspondientes³. Siempre hay que considerar la redacción del proyecto caso por caso. Colocando siempre las leyes y las modificaciones ulteriores actualizadas hasta la fecha de presentación del proyecto.

En la actualidad, se necesita presentar un proyecto independiente sobre seguridad y salud. Debe ir firmado por personal con la debida acreditación académica y ser competentes para ello. Este documento será de carácter específico para los trabajos de perforación a realizar. Además, en caso de estar subcontratados o coordinados por un contratista principal existe la posibilidad de adherirse al plan de seguridad y salud general del proyecto, sin perjuicio de seguir presentando uno específico para las tareas no contempladas en el plan general.

En la biografía legal de este texto siempre se hace referencia al documento de legislación consolidada de una determinada ley, que se ha publicado en el BOE correspondiente. El documento de legislación consolidada es un recopilatorio de dicha ley, así como, las modificaciones, correcciones y derogaciones parciales hasta la fecha. Todo ello contenido en un único documento de carácter meramente informativo y sin valor legal. Esto significa que en la sección legislativa del proyecto deben figurar, además de la propia ley, todas y cada una de las normas que han modificado la ley original, por separado. La publicación en el BOE del documento de legislación consolidada, de una determinada ley, es una forma de facilitar el acceso a la normativa en vigor de manera sencilla.

Por supuesto, cada ley importante puede disponer de su propio documento de legislación consolidada que puede consultarse en el BOE correspondiente. Y una vez que una ley es derogada, el documento de legislación consolidada de dicha ley deja de tener utilidad.

El proceso natural de una ley con una larga lista de modificaciones culmina con la aparición de una “ley refundida”. En términos sencillos, es una nueva ley cuya redacción contenga todas las modificaciones del documento de legislación consolidada. Derogando a la ley anterior y sus respectivas modificaciones.

Para ilustrar esto con un ejemplo sencillo se considera la Ley de aguas actual. La ley de aguas anterior a la vigente es la Ley 29/1985, de 2 de agosto. Sufrió una serie de modificaciones, que figuraban en un documento de legislación consolidada. En 2001 entró en vigor el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, que derogó la Ley 29/1985, de 2 de agosto y todas sus modificaciones. Desde que entró en vigor el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, ha sufrido diversas modificaciones y estas se pueden consultar en el documento de legislación consolidada correspondiente [8].

Como se ha dicho anteriormente, cada proyecto tiene su propio alcance y por lo tanto se debe poner la referencia bibliográfica legal específica. A

modo de ejemplo se presenta en la Tabla 2.2 las leyes principales correspondientes a la temática de minería y agua respectivamente. Quedaría pendiente la legislación eléctrica y de seguridad mecánica, en caso de que el proyecto contemple también la instalación y puesta en funcionamiento de un sistema de bombeo eléctrico. Y en todos los casos se debe completar el listado con todas las modificaciones de las leyes vigentes.

Temática	Legislación
Minería	Ley de Minas <i>Ley 22/1973, de 21 de julio</i> [1]*
	Regl. Gral. para el Régimen de la Minería <i>Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto</i> [12]*
	Regl. Gral. de Normas Básicas de Seguridad Minera <i>Real Decreto 863/1985, de 2 de abril</i> [13]*
Agua	Ley de aguas <i>Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio</i> [8]*
	Regl. del Dominio Público Hidráulico <i>Real Decreto 849/1986, de 11 de abril</i> [7]*
	Explotación de aguas minerales y de manantial <i>Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre</i> [14]*

Tabla 2.2: Leyes principales correspondientes a la temática de minería y agua, de ámbito nacional. Fuente: los autores.

* La referencia bibliográfica se refiere al documento de legislación consolidada.

En aras de cumplir unas buenas prácticas en la redacción de cualquier proyecto se recomienda añadir normativa recomendada. Como normas UNE o incluso normativa propia de las empresas de suministro de energía. Por supuesto, no es suficiente con incluirlo en la memoria también es preciso cumplirlo en la ejecución.

Aparentemente, puede parecer una pérdida de tiempo y por tanto de dinero, pero prestar atención a este tipo de detalles, en ocasiones, puede marcar la diferencia entre un buen profesional y otro descuidado.

Por otra parte, en caso de conflicto o de dudas ante un concurso de licitación, los matices legales pueden exonerar a la empresa de responsabilidades o decantar la adjudicación a favor de ella, según el caso. La sola mención, durante un juicio, de que una empresa cumple más allá de lo establecido en la ley puede disipar cualquier duda, ante un tribunal. La atención al detalle, una vez cumplidos los objetivos, es la filosofía que se debería seguir para conseguir la excelencia en cualquier actividad que se realice profesionalmente.

En todo caso, debe primar el sentido común y saber compaginar un trabajo meticuloso con una cantidad de tiempo y de medios humanos limitado. Naturalmente alcanzar este punto de equilibrio suele ser cuestión de experiencia adquirida con el paso del tiempo.

A modo de ejemplo, se expone el listado completo de leyes que modifican la ley de Minas, incluyéndola. Este listado y el BOE en el que se publicó figura en la Tabla 2.3. En el momento de la redacción de este documento, la última modificación añadida al texto consolidado de la Ley de Minas [1] es el de 17 de octubre de 2014. Y como se puede observar al final de la Tabla 2.3 existe al menos una modificación posterior, que no se ha incluido todavía en la ley consolidada. Por tanto, siempre hay que

comprobar la legislación en vigor consultando el BOE y los boletines oficiales de cada Comunidad autónoma involucrada.

Tabla 2.3: Ley de Minas y sus modificaciones hasta la fecha. Ordenadas por orden de publicación en el BOE. Fuente: los autores.

Número de BOE	Legislación
BOE-A-1973-1018	Ley 22/1973, de 21 de julio - Ley de Minas
BOE-A-1975-15493	Decreto 1747/1975, de 17 de julio
BOE-A-1975-15824	Circular de 15 de julio de 1975
BOE-A-1978-29905	Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto
BOE-A-1980-25462	Ley 54/1980, de 5 de noviembre
BOE-A-1982-29687	Real Decreto 2994/1982, de 15 de octubre
BOE-A-1986-85	Ley 50/1985 de 23 de diciembre
BOE-A-1986-17241	Real Decreto Lvo. 1303/1986, de 28 de junio
BOE-A-1995-4152	Real Decreto 107/1995, de 27 de enero
BOE-A-1986-17241	Real Decreto Lvo. 1303/1986, de 28 de junio
BOE-A-1995-4152	Real Decreto 107/1995, de 27 de enero
BOE-A-2007-12869	Ley 12/2007, de 2 de julio
BOE-A-2009-9841	Real Decreto 975/2009, de 12 de junio
BOE-A-2009-20725	Ley 25/2009, de 22 de diciembre
BOE-A-2010-20049	Ley 40/2010, de 29 de diciembre
BOE-A-2014-7064	Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio
BOE-A-2014-10517	Ley 18/2014, de 15 de octubre
BOE-A-2016-7156	Real Decreto 294/2016, de 15 de julio

La cantidad de normativa legal que figura en la Tabla 2.3 es debida, sobre todo, a que la ley de minas es antigua. De hecho, es una ley preconstitucional. Además, algunos artículos de la ley están ligados a límites económicos, como es el caso de los recursos minerales que pertenecen a la sección A. Por ello se debe actualizar la ley, cada cierto tiempo, para ajustar los valores monetarios. Si a esto se añade el ingreso de España a la Unión Europea, los cambios en cuanto a normas de medio ambiente, evolución de la tecnología, etc. la cantidad de modificaciones de la ley son más frecuentes.

Esto lleva, de nuevo, a apelar al sentido común y a ser crítico nuevamente con el alcance del listado de leyes que lo afectan. Considerando únicamente las que tienen transcendencia e importancia en cada caso.

Por otra parte, aunque los productos minerales y el agua son propiedad del Estado, y por tanto se rigen por legislación nacional, también existe normativa de ámbito autonómico en este tema. Como una pequeña muestra está la Ley 3/2008, de 23 de mayo, de ordenación de la minería de Galicia, publicada en el BOE y en el DOG [15, 16].

La exposición de motivos de esta ley comienza de la siguiente manera:

"La minería en Galicia es un sector relevante desde el punto de vista socioeconómico que presenta, no obstante, hoy en día, una notoria incidencia sobre el medio ambiente y la ordenación del territorio, lo cual hace precisa una

adecuada conciliación del desarrollo del sector minero con la protección de los bienes jurídicos en juego. Para esta finalidad es necesario disponer de un marco normativo coherente y actualizado que tenga presente los cambios institucionales, tecnológicos y ambientales producidos en la sociedad desde la aprobación de la Constitución española y el Estatuto de autonomía.”

...

“Galicia, además de normas de fomento económico del sector minero, tiene aprobadas la Ley 9/1985, de protección de las piedras ornamentales, dirigida a la protección de los minerales que tienen su principal aplicación en la industria de la construcción, y la Ley 5/1995, de 7 de junio, de regulación de las aguas minerales, termales, de manantial y de los establecimientos balnearios. Sin embargo, esta normativa tiene un alcance sectorial y no proporciona un marco normativo general que permita desarrollar las competencias autonómicas en materia minera y dotar de un marco organizativo-institucional actualizado a la Xunta de Galicia.”

...

“El establecimiento de normas que regulen las actividades extractivas encaja en un sistema de distribución de competencias en el que corresponde al Estado, de acuerdo con el artículo 149.25 de la Constitución española, la fijación de las bases del régimen minero y a la comunidad autónoma, según el artículo 28.3 del Estatuto de autonomía, el desarrollo legislativo y la ejecución.”

...

Como se ha visto hay normativa minera de ámbito autonómico, aunque siempre con el concurso del Estado. Esta normativa también debe incluirse en la memoria del proyecto y, por supuesto, cumplirla.

Se puede concluir que la excesiva cantidad de regulación de todo tipo que se aplica actualmente, si bien da una cierta seguridad, también complica la tramitación de cualquier proyecto. Consumiendo gran cantidad de recursos en verificar y demostrar, al menos sobre el papel, que se cumple cada requisito y norma aplicable. Esto implica la dedicación de tiempo y esfuerzo y la necesidad de optimizar este empleando el sentido común. Y ante la duda, consultar siempre, al órgano competente de la Administración.



Esta página está en blanco intencionalmente.

3

Construcción de sondeos

La construcción de un sondeo depende de las condiciones tanto geológicas como hidrogeológicas. Esto implica una gran cantidad de variables que intervienen en el proceso y que hacen que no se pueda generalizar el procedimiento. Por tanto, hay que estudiar caso por caso y tener en cuenta las peculiaridades del subsuelo y las legales.

Por otra parte, hay una serie de operaciones básicas en la construcción que pueden describirse de una manera sistemática, como el emboquillado, el cierre y protección del sondeo, el filtro de grava, cementación, etc. Con el fin de ordenar todos estos aspectos se planifica un plan de actuaciones y que se plasma en el programa de operaciones. En él se enumeran, de manera ordenada y secuencial, las operaciones que se seguirán en el proceso de construcción.

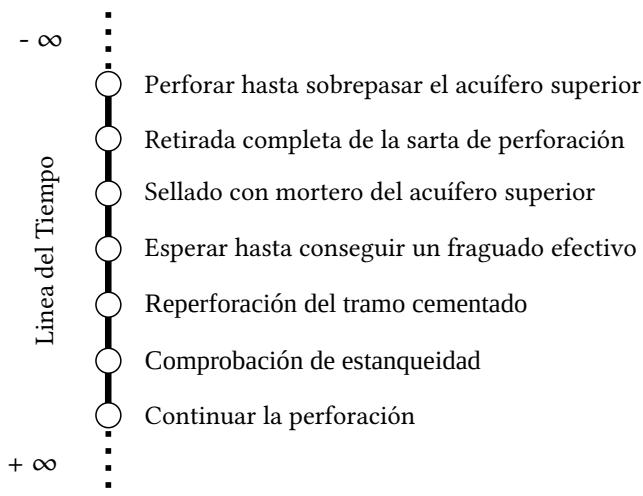
3.1 Programa de operaciones	19
3.2 Método de perforación	20
3.3 Diámetro del sondeo	22
3.4 Profundidad del sondeo	23
3.5 Emboquillado	24
3.6 Revestimiento temporal	26
3.7 Revestimiento definitivo	28
3.8 Ranurado	31
3.9 Engravillado	35
3.10 Sellado bentonítico	36
3.11 Cementado	37
3.12 Desviación del sondeo	40

3.1 Programa de operaciones

Un sondeo de captación de agua siempre empieza a construirse desde arriba hasta abajo y se termina desde abajo hasta arriba. Por tanto, primero se perforará el sondeo hasta llegar a la profundidad de diseño y posteriormente se irá completando su construcción desde el fondo hasta la coronación.

Para ello se realizan una serie de operaciones que deben figurar de manera secuencial y que comienza con el inicio de la perforación hasta la finalización del higienizado del pozo. Las operaciones pueden repetirse, tantas veces como sea necesario, de manera individual o en grupos.

A modo de ejemplo, si consideramos un sondeo que atraviesa dos acuíferos y solamente se va a explotar el de cota más baja, es necesario aislar el acuífero superior antes de perforar el inferior¹. Las operaciones sugeridas para este ejemplo aparecen en la Figura 3.1.



1: Conviene recordar, en este punto, que no se deben poner en contacto en ningún momento los dos acuíferos para evitar circulación de fluidos entre ellos.

Figura 3.1: Ejemplo de secuencia de operaciones de perforación, sellado y reperforación. Este tipo de operaciones se suele realizar en procesos de sellado y aislamiento de acuíferos para evitar contaminación cruzada con otros acuíferos situados en cotas más bajas. Fuente: los autores.

2: Normalmente se emplean como aditivos superplastificantes y bentonitas para minimizar la formación de burbujas de aire y reducir la permeabilidad del mortero al agua, respectivamente. Otros perforistas prefieren usar resinas *acuarreactivas*, a base de poliuretano, que se expanden con la presencia de agua cortando totalmente la circulación de esta.

Siguiendo dicho ejemplo se perforar, hasta sobrepasar el acuífero superior, con una sobre perforación que garantice el sellado posterior del acuífero. Después de la retirada completa de la sarta de perforación se procede al cementado del tramo del sondeo. Desde el fondo hasta sobrepasar el techo del acuífero, la cantidad que garantice su estanqueidad. Para este sellado se emplea mortero con los aditivos y adiciones adecuados².

Después de esperar el tiempo estimado para conseguir un fraguado que no dificulte el reperforado se procede introducir de nuevo la sarta de perforación y atravesar el tapón de mortero que se acaba de crear. Una vez atravesado y comprobado que el sellado es efectivo y estanco, se continua con las siguientes fases de la perforación, contenidos en el programa de operaciones.

El programa de operaciones puede ser muy simple, en caso de operaciones de perforación superficiales con una geología sencilla. Pero también pueden complicarse mucho si la geología es heterogénea o presenta problemas.

En todo caso, siempre debe existir una planificación previa contenida en el proyecto de perforación. Además, debe contener protocolos de actuación en caso de imprevistos, pero comunes, como contaminación por vertidos de aceite hidráulico o combustible, etc.

3.2 Método de perforación

A la hora de perforar un pozo de agua con técnicas modernas, existen una serie de factores que deben tenerse en cuenta y que determinarán finalmente la elección del método a emplear. Los más importantes son:

Factores para determinar el método de perforación

- ▶ La geología del terreno
- ▶ La profundidad del sondeo
- ▶ El diámetro de la perforación
- ▶ Las características de la máquina disponible

Sobre el papel, casi cualquier método de perforación está disponible, sin embargo, en la práctica no es así, puesto que hay que ajustarse al presupuesto asignado. Cualquier operación debe estar dentro de la horquilla de precios de mercado.

El transporte de maquinaria es caro y, salvo que se realicen un gran número de sondeos, la mejor opción es buscar máquinas disponibles en los alrededores de la zona de perforación. Además, las máquinas que están en esa zona, suelen ser las más adecuadas para trabajar en esa geología.

La profundidad del sondeo y su diámetro son parámetros críticos, pues determinan si una máquina puede realizar el trabajo o no.

La profundidad viene dada por la hidrogeología. Después de hacer un estudio se tiene una idea bastante aproximada de hasta qué profundidad

hay que perforar. Sabiendo la altura a la que hay que bombear y el caudal demandado se puede dimensionar la bomba de extracción de agua.

Las dimensiones de la bomba indicarán cuál es diámetro del sondeo, para que esta pueda instalarse en el interior del pozo. Para esta elección se debe consultar las hojas técnicas de las bombas consideradas que indican la distancia mínima de la rejilla de aspiración a la pared del sondeo. Es importante respetar estas especificaciones para evitar, entre otros problemas, que la bomba quede atascada en el pozo, la aparición de cavitación, arrastre de finos, etc.

Si el proyecto de perforación es de un pozo de gran diámetro y poca profundidad, las opciones de perforación son mucho más limitadas y en estos casos se suelen emplear máquinas de gran tamaño que colocan revestimiento de anillos de hormigón armado. Un ejemplo de este tipo de pozo aparece en la Figura 3.10. En estos casos el diámetro de la bomba no es un problema.

También existen pozos de gran diámetro antiguos, como el de la Figura 3.4. Estaban excavados a mano y recubiertos con mampostería. En estos casos se solía emplear mortero de cal, de fraguado lento, que resulta muy flexible en caso de sismos. El agua circula a través de los huecos dejados entre las piedras del revestimiento.

En otros casos se empleaban revestimiento de anillos metálicos como el de la Figura 3.2 o incluso amplias escalinatas, talladas en la piedra, que evitan tener que emplear poleas y cuerdas como se ve en la Figura 3.3.

Los diferentes métodos de perforación usados habitualmente para la construcción de un pozo vertical son:

Métodos de perforación más frecuentes en perforación de pozos

- ▶ RotoperCUSIÓN con martillo en fondo
- ▶ PercUSIÓN por cable
- ▶ RotaciÓN

El sistema de percusión por cable es eficiente, aunque lento. Permite diámetros medianos de entre 400 mm y 600 mm y garantiza que el sondeo no sufre desviaciones. Es muy útil en caso de existir materiales de diferentes durezas alternados, dispuestos en capas que presentan buzamiento respecto de la horizontal.

La perforación a rotación, con trialeta, es recomendable si se atraviesan capas de margas y arcillas. En estos casos, si se precisa el empleo de lodos, estos deben ser de naturaleza polimérica para permitir la floculación de los detritus.

En terrenos incoherentes o en los que hay presencia de rocas duras y poco frágiles lo aconsejado es el empleo de triconos. Hay que prestar mucha atención a la formación de costras de perforación en la zona de producción debido al empleo de lodos bentoníticos que impermeabilizan o ciegan parcialmente las paredes del sondeo.



Figura 3.2: Pozo tradicional de Kerala, en la India. El revestimiento está formado por anillos metálicos reforzados. Fuente: janeadamsart.wordpress.com.



Figura 3.3: Pozo escalonado en la India. Fuente: Victoria Lautman.



Figura 3.4: Pozo antiguo abandonado, con revestimiento de mampostería. Fuente: cbc.ca (Canadá).

3.3 Diámetro del sondeo

Como se ha visto en la sección 3.2, el diámetro efectivo del sondeo viene condicionado por las características de la bomba. Pero también por el revestimiento necesario para el sondeo.

El diámetro final del sondeo siempre será mayor que el de la tubería de revestimiento, como se ve en la Figura 3.5.

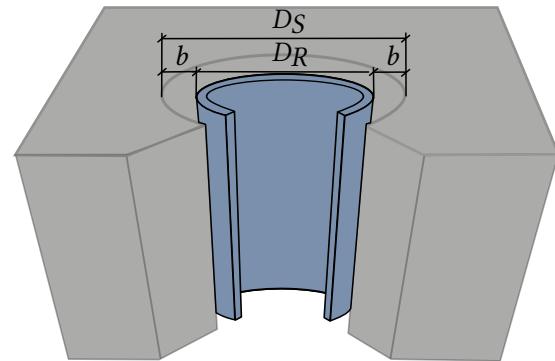


Figura 3.5: Concepto de Luz (b) de un sondeo. Fuente: los autores.

Para calcular este diámetro en función de las dimensiones de la tubería de revestimiento se establece el concepto de "luz". Que, como puede verse en la ecuación (3.1), es la mitad de la diferencia entre el diámetro del sondeo D_S y el diámetro exterior de la tubería de revestimiento D_R .

$$(Luz) \quad b = \frac{D_S - D_R}{2} \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

Tabla 3.1: Valores de luz (b) recomendados y rango de coeficientes (f) correspondiente. Siendo D_R el diámetro exterior de la tubería de revestimiento. Fuente: los autores y [17].

D_R [mm]	b [mm]	f
114 - 127	15	1.26-1.24
141 - 159	20	1.28-1.25
168 - 194	25	1.30-1.26
219 - 245	30	1.27-1.24
273 - 299	35	1.26-1.23
325 - 351	45	1.28-1.26
377 - 426	50	1.27-1.23

Las dimensiones de luz suelen variar en función del rango de diámetros externos de la tubería de revestimiento. Se puede tomar como referencia los valores contenidos en la Tabla 3.1. Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen factores como la desviación que ha sufrido el sondeo al perforarse o la empaquetadura de grava que pueden hacer variar estos valores.

Por otra parte, las tuberías suelen presentar determinados diámetros estandarizados, de manera que no existe un rango continuo de valores. Esto implica que en algún caso una tubería, en concreto, puede salirse de un valor adecuado de luz según los rangos recomendados. Lo mismo sucede si es necesario el empleo de tuberías de revestimiento temporal, cuyo diámetro se sitúa entre D_S y D_R .

Si se divide la luz de un sondeo entre su diámetro se obtiene el coeficiente de luz (i) expresado en la ecuación (3.2).

$$(\text{Coeficiente de luz}) \quad i = \frac{b}{D_S} = \frac{D_S - D_R}{2D_S} \quad (3.2)$$

Este coeficiente permite obtener el diámetro externo del sondeo D_S en función del diámetro exterior del revestimiento D_R , según la ecuación (3.3).

$$D_S = \left(\frac{1}{1 - 2i} \right) D_R = f D_R \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

$$f = \left(\frac{1}{1 - 2i} \right) \quad (3.4)$$

Conocido f y aplicando la ecuación (3.3) se puede calcular, rápidamente, el diámetro de la perforación en función del diámetro de la tubería empleada. Tomando este valor como punto de partida para ajustes ulteriores.

3.4 Profundidad del sondeo

Para definir la profundidad de un sondeo para explotación de agua y la de uno dedicado a la investigación se emplean criterios diferentes. En la investigación se persigue llegar a una cota donde poder medir una propiedad o característica. En la explotación del agua se busca optimizar las condiciones de la captación de esta. De hecho, existen fuentes de agua que, por sus características, no permiten ser explotadas mediante sondeos o pozos. Un ejemplo son las minas de agua, que captan el agua mediante la excavación de galerías horizontales. Su estudio queda fuera del alcance de este documento.

En cuanto a los sondeos, se procede de maneras diferentes dependiendo de la naturaleza del acuífero y de su geometría. La hidrogeología de una zona puede ser compleja, existiendo varios acuíferos a diferentes profundidades.

Un acuífero confinado, a grandes rasgos, consiste en una capa de terreno más o menos permeable por la que circula un flujo de agua. A techo y muro de esta formación se sitúan capas de terreno impermeable. Para explotarlo se debe atravesar por completo el acuífero y empotarse, al menos 0.5 m, en la capa impermeable, como se muestra en la Figura 3.6.

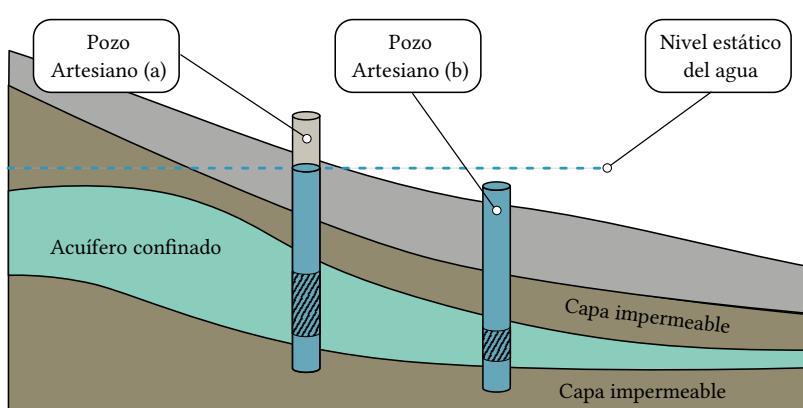


Figura 3.6: Profundidad de sondeo en acuíferos confinados. Ejemplo de pozos artesianos. En el pozo artesiano (a) el nivel estático del agua está muy por encima del techo del acuífero en ese punto. Por tanto, se reduce mucho la columna de agua a bombear. En el pozo artesiano (b) la potencia del acuífero es mucho menor que en el caso anterior. La geometría y posición del pozo hace que el agua rebose por la boca del pozo. No es necesario bombeo alguno para subir el agua a la superficie. En este caso, el nivel estático del agua es tan elevado porque una parte del acuífero, no representado en esta figura, está a una cota muy superior. Fuente: los autores.

Si el acuífero es especialmente delgado, rondando el metro de potencia, y no es artesiano, existen técnicas para explotarlo mediante sondeos, evitando la cavitación al bombear agua. Sin embargo, estas formaciones están muy cerca de los límites de explotabilidad. En estas circunstancias una variación en la permeabilidad o la transmisividad del terreno puede hacer que no sea viable su aprovechamiento con estas técnicas.

En algunos casos, el acuífero confinado presenta presión hidrostática elevada, de manera que el agua sube a través del sondeo. En casos extremos el agua puede salir a través de la boca del sondeo, como un surtidor. El motivo de este comportamiento es la diferencia de cotas del muro del acuífero. Si la cota en la zona de perforación es muy inferior a la cota de la cebecera del acuífero, el agua sube por gravedad a través del sondeo como se ve en la Figura 3.6.

Por otra parte, si el acuífero es abierto, el nivel freático variará en función de la cantidad de precipitaciones recibidas en los meses anteriores. Por tanto, cambia todos los años y también a lo largo del año hidrológico. En estos casos hay que asegurar que el nivel freático siempre esté por encima de la zona de captación del pozo. Para ello se hace un estudio estadístico de los niveles freáticos de, al menos, los diez últimos años. Colocando el comienzo de la zona de captación por debajo del menor nivel freático registrado. Esto da una cierta garantía de que el suministro de agua está asegurado.

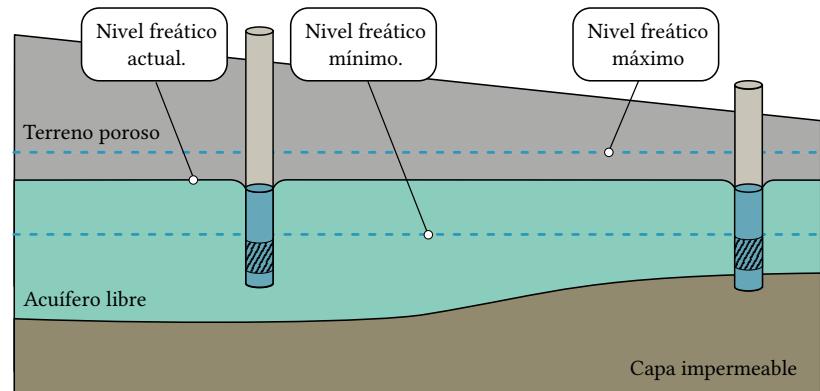


Figura 3.7: Profundidad de sondeo en acuíferos libres. En el pozo izquierdo no se llega a perforar hasta encontrar la capa impermeable, pero el enrejillado está por debajo del nivel freático mínimo histórico. En el pozo derecho se llega al empotramiento en la capa impermeable del acuífero, sobre pasando el muro de este.

Fuente: los autores.

A partir de ese punto se profundiza lo necesario para garantizar el caudal y régimen de explotación autorizado por la administración. Si se está muy cerca del lecho impermeable la tendencia es perforar hasta el, para garantizar la estabilidad del sondeo.

3.5 Emboquillado

Es un elemento de protección que corona el sondeo. Su función es la evitar el colapso de la boca de este. El derrumbe o cierre puede ser debido a diversos motivos como colocar peso o maquinaria demasiado cerca de la boca del pozo, sobre todo si el terreno es blando. De esta manera el terreno puede derrumbarse bajo el peso, incluso el de una persona, hacia la cavidad del sondeo. El diagrama esquemático del emboquillado de un sondeo aparece en la Figura 3.9. Suele ser de acero y está sellado al suelo mediante mortero de cemento.

Una función adicional del emboquillado es servir de anclaje o soporte tanto a la tubería de revestimiento definitivo como al sistema de bombeo. En el caso del revestimiento definitivo, reduce su pandeo al permitir mantenerla suspendida mientras se realizan las operaciones de engravidado y cementado final. Evitando que el revestimiento se apoye en el fondo y se deforme por acción de su propio peso.

En el caso de usar tubería rígida, para extraer el agua mediante una bomba, la tubería de emboquillado soporta el peso de toda la sarta de tubería de bombeo, el cable eléctrico y la propia bomba.

Como utilidad final, aunque no menos importante, es la de proveer de protección sanitaria al pozo frente a vertidos y contaminantes, tanto durante la construcción del pozo como en producción.

La longitud de la tubería de emboquille varía en función de las características específicas de cada sondeo.

No hay que confundir el emboquillado con un brocal, que figura en la Figura 3.8, cuya finalidad es distinta. Un brocal es un antepecho alrededor de la boca de un pozo que evita que las personas se caigan al mismo al intentar sacar agua. Hoy en día son, sobre todo, de carácter estético ya que el agua se extrae mediante bombas.

Los brocales pueden estar cubiertos por una tapa o rejilla metálica, de carácter estético en la mayoría de los casos, puesto que existe una plataforma inferior que evita el acceso al pozo por seguridad. Pero en la Edad Media su función era, en muchos casos, un asunto de seguridad militar. Muchas ciudades fortificadas dependían de pozos en el interior de la muralla como única fuente de agua potable en caso de un asedio. Las tapas metálicas evitaban que un posible enemigo infiltrado arrojara animales muertos al interior del pozo para envenenar el agua.

Si el pozo es de gran diámetro y se han empleado anillos de hormigón armado para su revestimiento, el anillo enrasado en la cota de superficie hará las veces de emboquillado. El anillo superpuesto actuará como brocal, como se puede ver en la Figura 3.10.



Figura 3.8: Brocal tradicional en *O Cebreiro* (Lugo). Fuente: Antonio Delgado Orden.

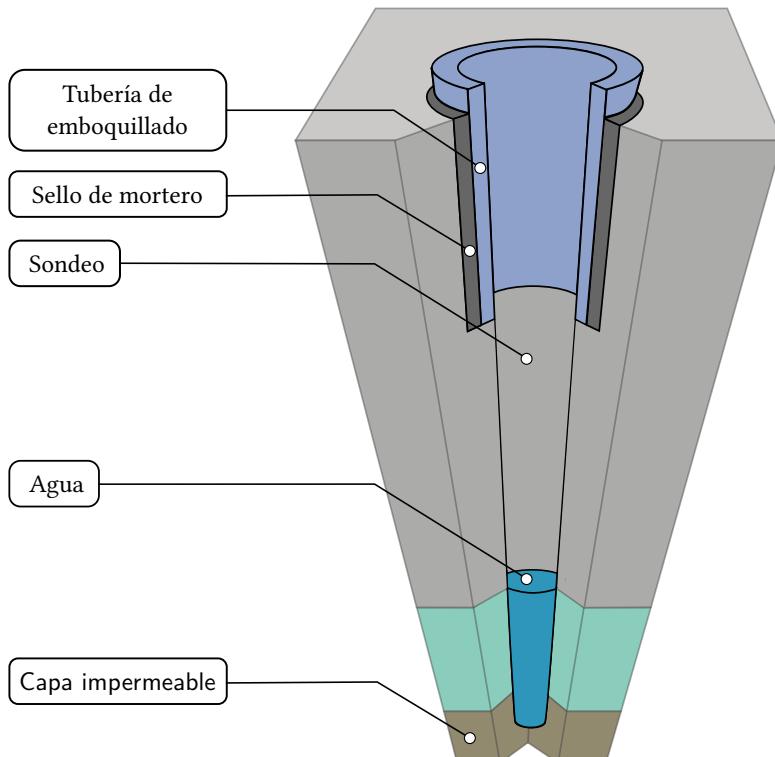


Figura 3.9: Esquema de emboquillado sencillo. Tubería de acero sellada al terreno con mortero de cemento. Fuente: los autores.



Figura 3.10: Imagen de pozo de agua en el desierto. Al estar revestido de anillos de hormigón se emplean los dos últimos para hacer de brocal y el emboquillado. Fotografía: Autor desconocido.

3.6 Revestimiento temporal

Cuando las paredes del sondeo son inestables durante la perforación, a menudo se suele emplear un método de perforación compatible con el empleo de lodos. Estos lodos de perforación ya sean bentonítico, poliméricos o de otro tipo, tienden a sostener las paredes evitando su cierre. En ocasiones esto no es suficiente si el terreno tiende al desprendimiento de parte de las paredes o de bloques. Un ejemplo típico de esto es la perforación de gravas poco consolidada. En estos casos se suelen emplear revestimientos temporales constituidos por tuberías de un diámetro superior al revestimiento definitivo.

Para emplear revestimiento temporal hace falta contar con una máquina de perforación especial que cuenta con dos cabezas de giro. La primera se encarga de la perforación y del giro de la sarta de perforación. La segunda hace girar la tubería de revestimiento temporal, que es exterior y concéntrica a la sarta de perforación. Ambas cabezas son independientes y concéntricas. Situándose la de perforación en la parte superior.

La tubería de revestimiento temporal, de acero al carbono, está formada

por secciones roscadas que permiten el ensamblado de una única tubería que se extrae, una vez finalizada la perforación y colocada la tubería de revestimiento por el interior. Presenta un espesor mucho menor que una tubería de perforación ya que su única función es el sostenimiento de algún elemento suelto desprendido de la pared del sondeo. A medida que se perfora, la tubería de revestimiento gira y desciende a la vez, sosteniendo la parte de sondeo recién perforado.

Perforando con el sistema de rotopercusión, si hace falta un revestimiento temporal, se suelen emplear sobre todo el sistema OD³ y el sistema ODEX⁴. El martillo ODEX se muestra en la Figura 3.11, y permite hacer el sondeo un poco más ancho, por debajo de la tubería de revestimiento, al extenderse. En este caso la tubería de revestimiento debe estar ligeramente por encima de excéntrica del martillo. Para retirar la sarta de perforación se hace girar está en el sentido contrario al de perforación y la excéntrica se retrae, disminuyendo el diámetro del martillo.



3: OD - (*Overburden drilling*). Es un sistema de perforación a rotopercusión, formado por la tubería de revestimiento y un martillo en fondo telescopio que se mueve por su interior. Permite recoger muestras, durante la perforación, a través del interior de la tubería de revestimiento como los sistemas de circulación inversa, siendo un sistema de circulación directa [18].

4: ODEX - (*Overburden Drilling with the Eccentric*). Sistema roto percusivo, cuyo martillo en fondo consta de una parte fija y una móvil extensible-retráctil, en función del sentido de giro de la sarta de perforación [19].

Figura 3.11: Martillo en fondo roto percutor ODEX. Fuente: Epiroc

Al contrario que la sarta de perforación, que puede subir, bajar o retirarse totalmente del sondeo, la de revestimiento temporal no debe retirarse hasta que la perforación ha concluido. Si la tubería de revestimiento temporal se retira antes de tiempo, el sondeo puede derrumbarse parcialmente y trabar la sarta de perforación.

Se coloca una corona o zapata de refuerzo en la punta del primer tramo de la tubería, que debe aguantar toda la perforación. Un ejemplo de este tipo elemento se puede ver en la Figura 3.12. Suelen ser de metal duro y estar reforzada incluso con insertos de *Widia*⁵ si el terreno es muy abrasivo.

En el caso de los sistemas OD la primera tubería de revestimiento va reforzada con insertos de *Widia* en forma de botón. Este sistema está diseñado para que el trepano de perforación y la cabeza de la tubería de revestimiento se ajusten perfectamente formando un sistema telescopico, que sella el interior de la tubería de revestimiento. De esta forma se pueden tomar muestras del frente de perforación, como si se tratase de un sistema de circulación inversa.

El resto de las tuberías de revestimiento temporal son de acero roscado. Una muestra de tubería de revestimiento temporal de 160 mm de diámetro puede verse en la Figura 3.13. En ocasiones pueden usarse como revestimiento definitivo, aplicando un cementado posterior.

5: *Widia* - Nombre comercial de un *composite* de carburo de tungsteno con un 10% de cobalto como aglutinante.



Figura 3.12: Zapata de tubería de revestimiento. Fuente: Drillit.shop



Figura 3.13: Tubería de revestimiento HWT de 3.9" (98.8 mm) \varnothing . Longitud entre 1.5 m y 3 m. Fuente: Dirimpex.

3.7 Revestimiento definitivo

Un sondeo de explotación de agua se reviste con tubería en la mayoría de los casos. Existen varios motivos para ello:

Funciones más importantes del revestimiento definitivo

- ▶ Estabilización a largo plazo de las paredes del sondeo.
- ▶ Evitar que el sondeo se llene de lodo y material de origen orgánico procedentes de las paredes de la perforación.
- ▶ Encofrado para el sellado con mortero de las paredes del sondeo.
- ▶ Protección de la bomba.
- ▶ Soporte estructural a la infraestructura del sondeo.

Se emplean diferentes materiales que dependen del uso, del presupuesto y del diámetro del sondeo. Los más comunes son acero, PVC y acero inoxidable. Para grandes diámetros, en ocasiones se recubre interiormente con pintura *epoxi*⁶, para evitar la corrosión.

A diferencia del revestimiento temporal, el revestimiento definitivo se coloca después de haber terminado la perforación y haber retirado la sarta de perforación del sondeo.

El método de unión entre tramos de tubería depende del material empleado, y del diámetro del sondeo. Es de tres tipos principales

Métodos de unión de tramos de tubería definitiva

- ▶ Roscado
- ▶ Adhesivo
- ▶ Soldadura

6: Grupo de resinas sintéticas pertenecientes al grupo de los *epóxidos*. Se emplean en forma de dos componentes que, una vez mezclados entre sí, reaccionan endureciéndose. Son la base de adhesivos y pinturas. Al completar la reacción química presentan buenas propiedades mecánicas, así como alta resistencia química y térmica.

Normalmente el sistema de adhesivo solo se emplea con PVC y frecuentemente se ve reforzado por un sistema de roscado adicional. El método de roscado en acero de pequeño diámetro se emplea con tuberías de revestimiento temporal. Y para diámetros más grandes (a partir de 160 mm de diámetro) se emplea la soldadura electrógena.

Al colocar la tubería de revestimiento final, se realiza un pequeño solape entre esta y la tubería del emboquillado. El solape es rellenado con mortero procedente del cementado de la tubería de revestimiento. La construcción final se muestra en la Figura 3.14.

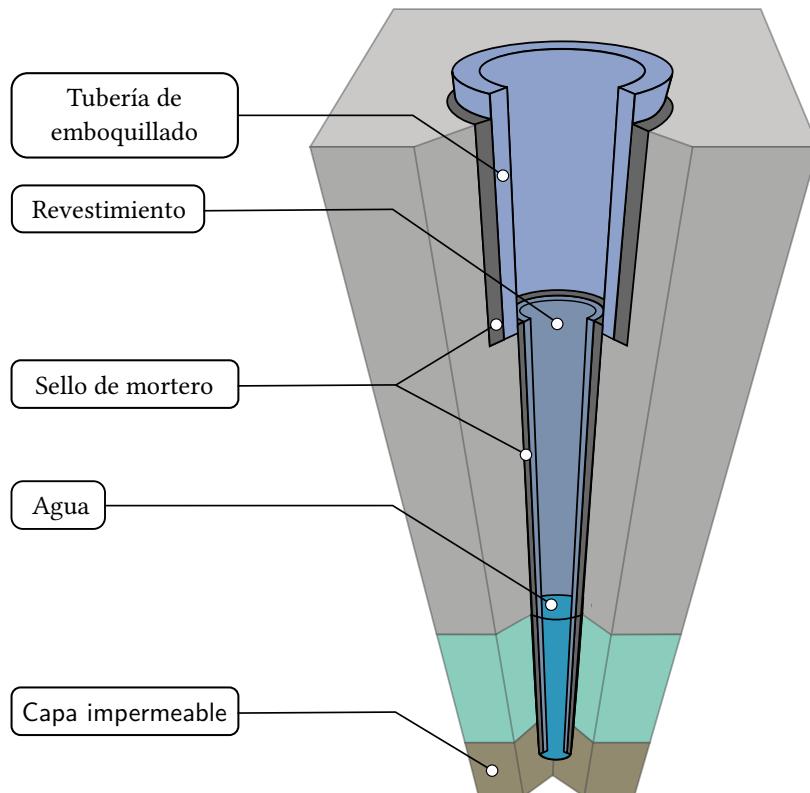


Figura 3.14: Esquema de revestimiento y emboquillado. Este proceso se emplea cuando es necesario realizar el emboquillado al principio de la construcción del sondeo. Obviamente el cementado no ocupa toda la longitud del sondeo y se ha representado así para una mayor sencillez y comprensión del proceso de cementado. Existe una zona de filtrado, no mostrada en este diagrama, por la que el agua llega al interior del tubo de revestimiento del sondeo. Fuente: los autores.

Si un sondeo va a revestirse no se suele emboquillar al principio del sondeo. Sino que se aprovecha el entubado final para el emboquillado. Permitiendo que parte de la tubería sobresalga del suelo.

En caso de ser necesario emboquillar desde un principio se realiza la colocación de dos tuberías telescópicas. Primero el emboquillado con una profundidad de entre uno y tres metros y después, por el interior, se realiza el resto de la perforación con un menor diámetro.



Figura 3.15: Revestimiento definitivo de gran diámetro helicoidal. Fuente: TBH (Taller Barragán Hermanos).

En el diagrama de la Figura 3.14 no se representa la zona de filtrado por donde se recoge el agua procedente del acuífero. Esta zona está compuesta por una ranurado de la tubería de revestimiento definitiva y por una empaquetadura, o copa de grava, que actúa de filtro. Esta capa de grava está situada entre la superficie del sondeo y la superficie externa del tubo de revestimiento. Esta zona recibe el nombre de *luz* y su espesor depende del diámetro del sondeo. Todos estos temas se verán con más detalle en las secciones 3.8 y 3.9.

Las tuberías de PVC se fabrican por extrusión, mientras que para las tuberías de acero y acero inoxidable se emplean otras técnicas. El sistema más resistente es la tubería helicoidal, que se fabrica en continuo a partir de bobinas de chapa de acero y soldadura automática. También existen tuberías fabricadas a partir de chapas rectangulares conformadas en forma de cilindro y soldadas longitudinalmente. Cada tramo se suelda transversalmente al siguiente con un giro de 90 grados. De esta manera aumenta su resistencia estructural. Los espesores mínimos recomendados, según profundidad y diámetro, se pueden consultar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Tabla de espesores de tuberías metálicas de revestimiento recomendados en función de la longitud (L) y de su diámetro. Fuente: [9].

L [m]	Diámetro nominal de la tubería de revestimiento [mm]									
	203	254	305	356	406	457	508	559	610	762
0-30	4	4	4	5	5	6	7	8	8	8
30-60	4	4	5	6	6	7	7	8	8	8
60-90	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9
90-120	4	5	6	7	7	8	8	8	9	9
120-180	5	5	6	7	7	8	8	9	10	10
180-240	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11
240-300	6	6	7	7	8	9	9	10	11	12
300-450	6	7	7	8	8	9	10	11	—	—
450-600	6	7	8	8	9	10	11	11	—	—

En ambos casos, los tramos de tuberías comercializadas tienen una longitud máxima de entre 3 m y 6 m para facilitar su transporte y manejo. Y su espesor es como mínimo de 4 mm de espesor. Esto significa que permite soldadura con electrodos o soldadura continua. En todos los casos es preciso contar con un soldador con experiencia y pericia, pues es necesario que las soldaduras sean estancas y sin defectos. Las soldaduras no deben disminuir la resistencia estructural del conjunto.



Figura 3.16: Tapa circular metálica soldada al final de la tubería de revestimiento. Fuente: Sondeos Puebla.

Cuando un sondeo ha sido perforado y se empotra en la capa impermeable, normalmente 0.5 m, no suele ser necesario sellar el fondo del sondeo por motivos hidráulicos, ya que el agua del acuífero no entra por el fondo de la tubería de revestimiento. Sin embargo, no es mala idea hacerlo para facilitar el dragado y limpieza del fondo del sondeo. Con el tiempo las partículas de material en suspensión en el seno del agua decantan en el fondo del sondeo y es conveniente retirar este material con regularidad. Esto evita que el material sea absorbido por la bomba.

La sobre perforación del sondeo no suele pasar del metro de longitud. Existiendo dos técnicas principales para su sellado. La primera es soldar una tapa metálica al fondo de la tubería de revestimiento. Como se muestra en la Figura 3.16. Esta operación se realiza en superficie sobre el tramo final de tubería, que es el primero en colocar.

Como la soldadura es estanca, al introducir la tubería sellada, esta flota sobre el agua por el principio de *Arquímedes*. Por tanto, es conveniente inundarla con agua usando una manguera desde la superficie, al menos hasta que el agua del pozo penetre por el enrejillado. En otros casos interesa lo contrario para manejar mejor la tubería mientras se suelda, debido al peso excesivo de esta [20]. Si la tubería es de PVC se suelen usar tapones ciegos roscados.

La segunda técnica, es el cementado del fondo del sondeo. Para ello se vierte lechada de cemento con un acelerante de fraguado. El vertido debe realizarse, por bombeo a través de una tubería, directamente sobre el fondo del sondeo.

La capa de sellado debe tener un espesor no menor de 30 cm. Siendo la formulación de la lechada recomendada de una parte de agua por cuatro partes de cemento *Portland* en peso (1:4). Esta proporción evita que el cemento se segregue y la lechada sea estable.

Para aumentar su estabilidad química, es recomendable que el cemento sea tipo SR⁷. Como acelerante, la opción más económica, es la adición de entre un 2% o un 3% de silicato sódico⁸ sobre el peso del cemento.

En caso de soldadura, es recomendable que las tuberías estén biseladas con una inclinación de 45°. De esta forma se facilita la soldadura.

3.8 Ranurado

En la Figura 3.17 se muestra la sección inferior del sondeo de ejemplo representado en la Figura 3.14. Se puede apreciar que la tubería de revestimiento presenta un ranurado en la zona que atraviesa el acuífero. No ocupa toda esa zona de la tubería, sino la que se estima necesaria para captar el agua.

La función del ranurado es triple. En primer lugar, deja pasar el agua a través de la tubería de revestimiento para que la parte final del sondeo se mantenga inundado y la bomba pueda elevar el agua hasta el exterior del sondeo. La segunda función es evitar que el terreno o la grava procedente del filtro engavillado pase al interior del pozo. Por tanto, las ranuras son lo suficientemente finas para que pase el agua y no material arrastrado. Por último, el enrejillado contribuye al ralentizado del agua, de manera que una vez que el pozo se ha acondicionado, no se producen más arrastres de finos.

Se define como velocidad optima v la del agua que entra al sondeo a través de las ranuras de la tubería de revestimiento. Se considera el área completa de las ranuras, sin ser tapado parcialmente por la empaquetadura de grava, y se expresa en cm^2 .

Walton [21], en prueba de laboratorios, estimo que la velocidad optima de entrada del agua está promediada en 3 cm/s. Relacionando los valores óptimos de la velocidad de entrada con los de la permeabilidad del suelo mediante la ecuación (3.5) se obtienen los valores de la Tabla 3.3.

$$A_e = 100 \left(\frac{Q}{\lambda v} \right) \quad [\text{cm}^2] \quad (3.5)$$

7: SR – Sulforresistente. Si el agua es salobre el cemento debe ser resistente a las sales, para evitar su descomposición.

8: – Na_2SiO_3 – También llamado Meta silicato sódico o "vidrio soluble" y que puede encontrarse fácilmente en almacenes especializados. Suele comercializarse en forma de líquido viscoso. El efecto del silicato sódico en la lechada hace que el lavado del cemento sea prácticamente nulo y endurezca al tacto rápidamente.

Tabla 3.3: Velocidad optima del agua a través de las ranuras v en función de la permeabilidad del suelo K (Conductividad hidráulica). Fuente: [21].

K [m/día]	v [cm/s]
>240	6.0
240	5.5
200	5.0
160	4.5
120	4.0
100	3.5
80	3.0
60	2.5
40	2.0
20	1.5
<20	1.0

El parámetro A_e es el área abierta efectiva del ranurado. Depende de la forma y orientación de la ranura y de la forma y granulometría de la grava empleada en el filtro. Lo habitual es que la mitad del área de las ranuras quede cegada. Por tanto, puede estimarse el valor de A_e como un 50% del área libre del ranurado.

Al calcular el área de las ranuras, la orientación es importante. Si la ranura es horizontal se considera la longitud del arco descrito por la ranura en la tubería y nunca su cuerda. Si la ranura es vertical la longitud es la de la recta que la define. En caso de una ranura oblicua, como las de la Figura 3.17, hay que calcular la longitud de la curva descrita sobre la superficie de la tubería. El ancho dependerá de la herramienta empleada para realizar el corte en la tubería.

Por último, Q es el caudal del pozo expresado en [l/s] y λ es la longitud óptima de la rejilla expresado en [cm]. Mediante los valores de v obtenidos de los datos de permeabilidades de la Tabla 3.3 introducidos en la ecuación (3.5) se puede despejar el valor de λ y poder completar el diseño del ranurado y su dimensionado:

$$\lambda = \frac{100Q}{vA_e} \quad [\text{cm}] \quad (3.6)$$

Hasta aquí se ha estudiado el criterio hidrogeológico, pero existen otros criterios:

Velocidad de entrada del agua en el pozo [9]

- ▶ Criterio hidrogeológico: 3 cm/s.
- ▶ Criterio Roscoe Moss: máximo 150 cm/s.
- ▶ Criterio AWWA: máximo 45 cm/s.

Hay que compaginar estas recomendaciones con criterios económicos con el fin de no aumentar mucho los costes. En acuíferos con intrusión salinas próximas hay que tener un especial cuidado.

El criterio de colocación del enrejillado varía según las circunstancias, una vez considerada la longitud total de la abertura que debe tener. En acuíferos libres la rejilla se situará en la parte inferior de la zona saturada y cubriendo entre la mitad y un tercio de esta. En acuíferos confinados es aconsejable colocar la rejilla cubriendo entre el 70% y el 80% del espesor de la capa [9].

Existen diferentes tipos de rejilla para fabricar tuberías filtrantes, pero los más conocidos son los siguientes:

Tipos de ranurados más usados

- ▶ Tubo ranurado
- ▶ Puentecillo
- ▶ Johnson
- ▶ Persiana

En el primer tipo, practicar ranuras en el tubo de revestimiento disminuye la resistencia mecánica del mismo. Si la resistencia disminuye demasiado, el tubo no podrá soportar la presión del terreno y colapsará. Existen diferentes patrones geométricos de ranurado, que será elegido en función del empuje del terreno atravesado, el material del que está hecho el revestimiento, el diámetro y el espesor de la tubería, el flujo de agua necesario por metro de tubería, etc.

Una vez seleccionado el patrón se realiza el ranurado *in situ*, normalmente empleando una sierra circular. Si la tubería es muy gruesa, algunos perforistas emplean un soplete de acetileno-oxígeno para practicar las ranuras. Este método no es muy recomendable debido a las irregularidades en el ancho de la ranura obtenida.

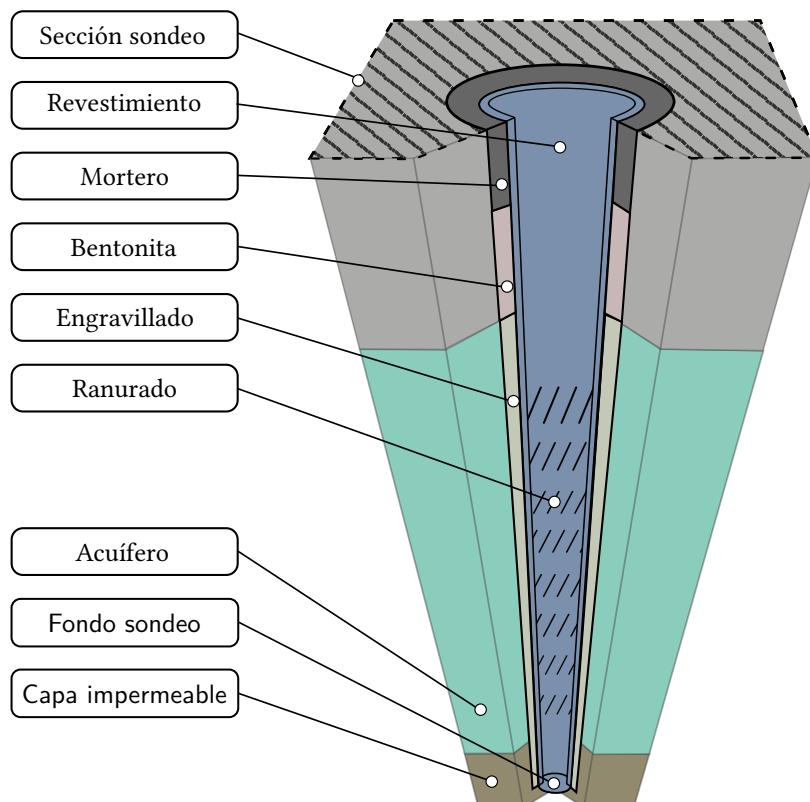


Figura 3.17: Esquema de ranurado y cementado. En esta figura se observa la sección inferior de un sondeo para captación de agua. Está compuesta por la tubería de revestimiento con el ranurado situado en la zona de captación de agua. En el trasdós de la tubería de revestimiento se sitúa el sellado al terreno, que en este caso consta de una capa de mortero de cemento, un sello de bentonita y el engravillado en la zona de producción. En esta figura no se muestra el agua que penetra a través del ranurado para mayor claridad del gráfico. Fuente: los autores.

En terrenos arenosos las ranuras presentan muy poca superficie. Se intenta minimizar el arrastre de finos. En estos casos es necesario un gran número de ranuras, pero, como se ha visto, estas reducen mucho la resistencia mecánica de las tuberías. Para remediar el problema se desarrolló el sistema de "puentecillo". Este sistema presenta gran cantidad de ranuras finas que debido a su diseño aumentan la rigidez de la tubería en vez de debilitarla. Además, ralentiza la entrada de agua, puesto que la dirección de entrada al tubo es tangencial en lugar de radial. Pueden observarse ejemplos de este tipo de ranurado en la Figura 3.18, apreciándose una doble ranura por cada lámina de tubería.

Es un sistema que hay que construir en fábrica y soldar en el momento de la instalación a la tubería de revestimiento. Se construye por cizalladura y conformado de bandas de la tubería de revestimiento. Se emplea para ello maquinaria hidráulica.



Figura 3.18: Detalle del filtro puentecillo. Fuente: THB (Taller Barragan Hermanos).



Figura 3.19: Tubería de filtro de alambre continuo tipo *Johnson*. Fuente: www.carbotecnia.info.

El resultado es un aumento de inercia de la estructura resultante y por tanto una mayor rigidez de la tubería. Como inconveniente es más caro y suele emplearse solo cuando es necesario.

Otro sistema para obtener agua de alta calidad en ambientes arenosos es el filtro de alambre continua tipo *Johnson* que aparecen en la Figura 3.19 y Figura 3.20. En este caso su precio es mayor dado que se realiza en acero inoxidable.

Por último, está el sistema de filtro de persiana, en el que se troquelan una serie de hendiduras orientadas hacia abajo, como aparecen en la Figura 3.21. Al igual que en el sistema de puentecillo la tubería aumenta su rigidez debido al troquelado, lo que permite emplear chapa de acero inoxidable más fina.

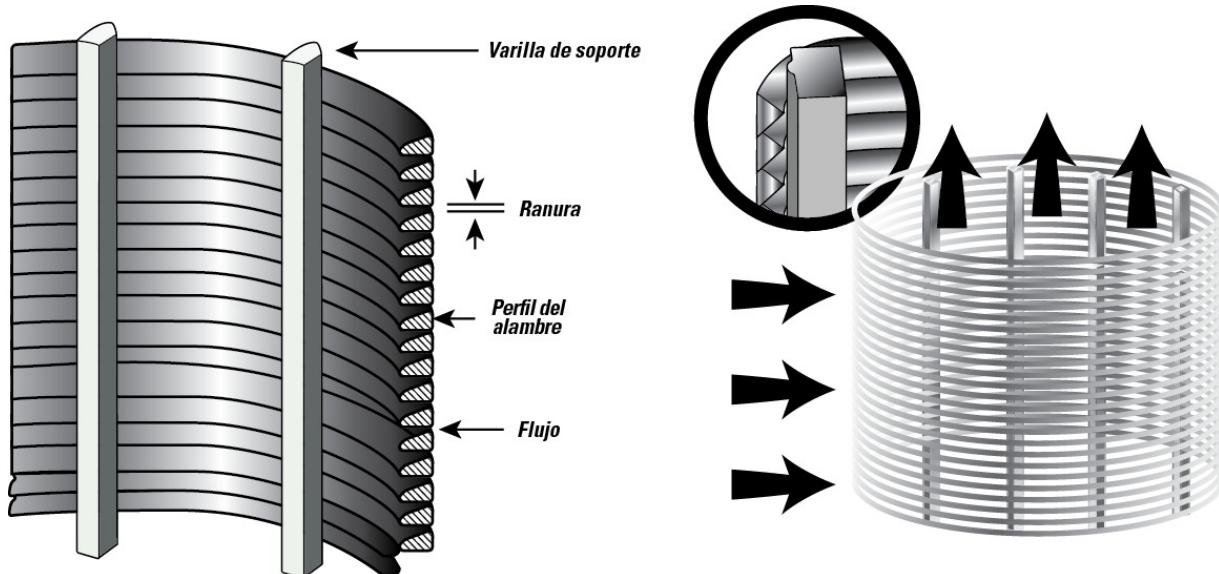


Figura 3.20: Detalle del esquema de filtro de alambre continuo tipo *Johnson*. Fuente: www.carbotecnia.info.



Figura 3.21: Tubería de filtro de persiana. Fuente: [9].

3.9 Engravillado

La función de la empaquetadura de grava es doble. Por un lado, evitar que el material procedente de las paredes del sondeo se desprendiera por acción del flujo del agua. Obturando de esta manera el ranurado de la tubería de revestimiento. Por otro lado, ralentiza la velocidad del paso del agua reduciendo su capacidad de arrastre de finos.

La grava debe ser de rodadura. Esto permite que se comporten como pequeñas esferas y se distribuyan de manera homogénea. Dejando pasar el agua por igual en todas las direcciones. Además, se evita un excesivo compactado del árido.

El diámetro de las partículas del filtro arena-grava suele oscilar entre 0.6 mm y 5 mm de diámetro, según la tabla Tabla 3.4. Se determina según el diseño del pozo y la geología de la zona. Debe ser grava silícea que garantiza la estabilidad química, la resistencia mecánica de la empaquetadura y alarga la vida útil del sondeo. Por supuesto también condiciona el diseño de las ranuras del revestimiento.

Al ser grava de rodadura, en lugar de machaqueo, su origen es natural y por tanto no puede fabricarse. Se obtiene mediante cribado de grava natural en una cantera de áridos. El calibre final depende de granulometría de la zona de producción [17]. Para garantizar su homogeneidad lo más posible se debe cumplir que, con la granulometría que se determine, el coeficiente de uniformidad (C_u)⁹ debe ser inferior a 2.5 [17]. En todo caso es una fracción pequeña, dado su reducido tamaño, y por tanto es un árido caro. Existen sustitutos sintéticos como esferas de cerámica o vidrio, pero su precio es muy superior.

Suele venir en sacas de rafia sintética de un metro cúbico de capacidad. Fáciles de transportar y de manejar con una grúa de camión.

El engravillado es la primera capa de revestimiento que se coloca una vez instalada la tubería de revestimiento definitiva. Para su colocación se vierte desde la superficie entre la pared del sondeo y la tubería de revestimiento. Dependiendo de la cantidad a emplear se emplean carretillas de mano, camiones o la manga inferior de descarga de las sacas de transporte. Si el pozo dispone de un emboquillado previo, la grava se vierte entre el tubo del emboquillado y la tubería de revestimiento. En ambos casos, debe cubrir completamente el tramo de filtro de rejilla de la tubería de revestimiento.

Como no se puede medir desde la superficie es preciso saber de antemano la cantidad de grava a necesitar. Para calcular el volumen de grava a verter, expresado en [l], se emplea la ecuación (3.7). Siendo L la longitud del sondeo a engravillar, expresado en [m]. Tanto D_S y D_R vienen expresados en [mm], y corresponden a los diámetros del sondeo y del exterior de la tubería de revestimiento, respectivamente.

$$Vol = \frac{\pi}{4 \cdot 10^3} (D_S^2 - D_R^2) L \quad [l] \quad (3.7)$$

En caso de que la zona de filtro sea de varios metros de largo y si el sondeo presenta zonas de sobre excavación, en lugar de esponjamiento, será preciso aumentar esta cantidad.



Figura 3.22: Gravilla blanca de rodadura. Imagen de autor desconocido.

9: Se define como $C_u = D_{60}/D_{10}$, que es el cociente entre el diámetro correspondiente al 60% de las partículas y el diámetro correspondiente al 10% de las partículas de la fracción de árido elegida.

Tabla 3.4: Tabla de ancho de la rejilla y engravillado en función de la granulometría del suelo. Todas las dimensiones están expresadas en [mm]. Fuente: [9].

Cuadro de selección por rango [mm]		
Partículas de suelo	Calibre de grava	Ancho de la rejilla
0.10 — 0.60	0.60 — 1.20	0.60
0.20 — 0.80	1.00 — 1.80	0.75
0.30 — 1.25	1.60 — 2.50	1.00
0.40 — 2.00	2.00 — 3.50	1.50
0.50 — 3.00	3.00 — 5.00	2.00



Figura 3.23: Tubería de PVC recubierta de grava. Fuente: STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH.

En terrenos arenosos, donde la grava puede ser "lavada" por la corriente de agua, existe un sistema más moderno que emplea tuberías de revestimiento de PVC ranuradas y recubiertas con un engravillado fino. Estas tuberías son roscadas y el engravillado está adherido a la tubería empleando resinas *epoxi*, como se muestra en la Figura 3.23. El proceso industrial al que se han sometido garantiza el paso del agua a través del filtro y la adherencia de la grava a la tubería.

Presenta otras ventajas como filtrar partículas de menor granulometría al estar revestida de grava de menor diámetro. En condiciones normales esta grava sería absorbida por la bomba de impulsión, ya que su diámetro es menor que las dimensiones del ranurado. Aunque, su coste es más elevado su instalación es mucho más fácil y rápida, ahorrando muchas horas de trabajo y reduciendo así costes en mano de obra.

Si la tubería es de gran diámetro y de acero, existen otros métodos, como el doble revestido. En este sistema se realiza un revestimiento doble colocando la grava entre las dos tuberías. Un ejemplo de este tipo de revestido puede observarse en la Figura 4.1. Este tipo de dispositivo es una muestra de cómo la industria se adapta a las necesidades específicas en determinadas circunstancias hidrogeológicas. De esta forma se reduce el tiempo de ejecución y se facilita la operación.

3.10 Sellado bentonítico

Al perforar con la intención de obtener agua mediante un sondeo se atraviesan diversas capas de material. Su composición química puede variar y en ocasiones puede contener sustancias que no interesa que entren en contacto con el agua. No tienen por qué ser tóxicas, basta con que cambien la salinidad, el pH o la composición química del agua del acuífero a explotar u otros que sean atravesados por el sondeo.

La solución para evitar esto es un sellado y una reperforación de la zona a aislar. Sin embargo, si se emplea lechada de cemento o mortero el sellado no será impermeable. Dada la naturaleza porosa de estos materiales con el tiempo se producirá la contaminación del acuífero. Este proceso es más probable si el bombeo es intenso o muy frecuente.

Otro problema surge cuando se ha colocado el filtro de grava y se procede a cementar sobre él para llenar el resto del sondeo. La presión hidrostática de la lechada de cemento hace que se filtre entre los huecos de la empaquetadura de grava cegándola y haciendo inservible el pozo. En este caso se debe colocar, antes, una capa de separación para evitar que el cemento llegue al engravillado.

La bentonita es un tipo de arcilla muy usada en perforación, por sus propiedades tixotrópicas, para elaborar lodos. Por ello consigue fácilmente en almacenes de material de perforación. Al ser un material arcilloso es impermeable y evita que cualquier contaminante atravesie disuelto en agua procedente de las capas superiores.

Para su colocación se procede de la misma manera que con el engravidado, vertiendo la bentonita en forma de *pellets* (Figura 3.24) o perdigones por el anillo entre sondeo y tubería. Estos *pellets* son de naturaleza plástica y se compactan por acción de la gravedad, formando un sello impermeable y químicamente estable.

Existen arcillas expansivas que se hinchan con la acción del agua. Su uso no está recomendado porque pueden deformar la tubería de revestimiento. Con el peso del material de relleno vertido sobre la bentonita para su terminación y la humedad natural del suelo se consigue una compactación completa.

El espesor del sello depende de cada pozo, pero no se recomienda una capa de menos de un metro de espesor. Por supuesto hay que tener en cuenta la reducción del volumen cuando se produce la compactación, y se reduce el esponjamiento del suelo.

3.11 Cementado

El cementado de un pozo tiene como función el sellado de la tubería definitiva de revestimiento al suelo llenando el hueco entre la pared del sondeo y la superficie externa del revestimiento. Suele realizarse mediante una bomba de tornillo, como la mostrada en la Figura 3.25, o con una de pistón.

Contribución del cementado al sondeo

- ▶ Evitar conexiones entre acuíferos a través del hueco entre sondeo y tubería de revestimiento.
- ▶ Aumenta la resistencia mecánica del entubado.
- ▶ Protege de la corrosión en el *trasdos* del entubado.

El tipo de material a emplear en el cementado depende de la composición química del suelo. Siendo recomendable emplear siempre cemento resistente a los sulfatos y sulfuros. Y resistente a los cloruros en caso de existir acuíferos de agua salobre o intrusiones marinas.

Si el cementado se produce en forma de lechada, como mínimo se debe emplear una proporción en peso (1:3) agua-cemento. En todo caso es recomendable la adición de un 3% en peso de bentonita en polvo respecto del cemento empleado, para mejorar el comportamiento de esta evitando segregaciones.

Si la luz del pozo lo permite, se puede cementar empleando mortero de cemento. Este último emplea como árida arena silícea de granulometría adecuada. La formulación del mortero puede variar según la experiencia



Figura 3.24: Bentonita en forma de *pellets*. Fuente: Steber Lester.



Figura 3.25: Bomba de tornillo para inyección de mortero. Nota: Esta bomba, en particular, no está homologada y carece de las medidas mínimas de seguridad exigibles, pero permite ver el mecanismo de tornillo en su interior. Fuente: los autores.



Figura 3.26: Centrador metálico soldado a tubería de revestimiento, junto a un filtro de tipo puente. Fuente: Sondeos Puebla S.L.

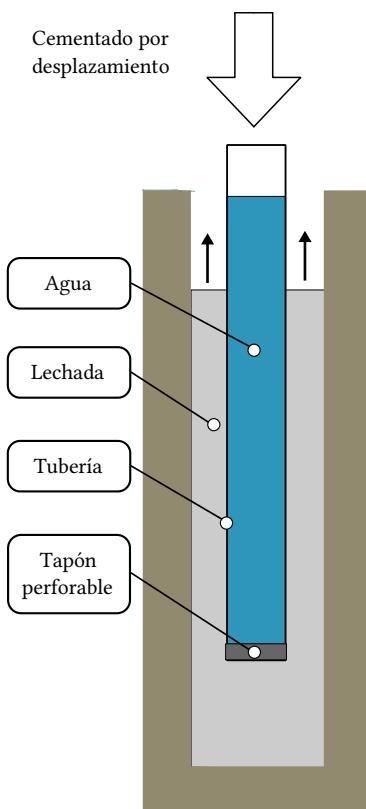


Figura 3.27: Se presiona el tubo de revestimiento tapado y lleno de agua. El mortero desplazado sube por el anillo. Fuente: Los autores.

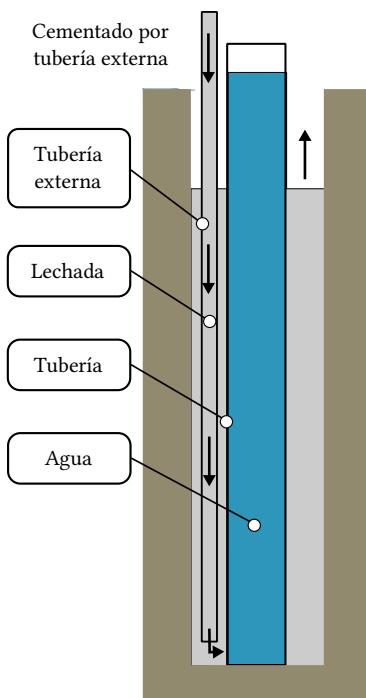


Figura 3.28: El tubo de revestimiento sellado, se presiona contra el fondo. Se cementa mediante inyección de lechada por tubería externa en el fondo del anillo. Fuente: Los autores.

y necesidad del sondista. Se recomienda añadir también superplastificantes para conseguir un mortero autocompactante. Evitando así la inclusión de burbujas de aire que hacen el mortero mucho más poroso.

Con el fin de lograr un grosor homogéneo de la capa de cementado es aconsejable el empleo de centradores. Si se emplean sellos de bentonita o si la luz es reducida su uso es obligatorio. Soldados a la tubería si son metálicas o empleando centradores de plástico en caso de tuberías de PVC, tal y como se muestra en la Figura 3.26.

Existen varios métodos para el cementado, dependiendo de la profundidad, el volumen a cementar y la presión necesaria. No se emplean solamente en pozos de agua, sino en cualquier tipo de sondeos que lo precise. Algunas de las técnicas de cementado más empleadas son las siguientes:

Métodos de cementado al sondeo

- ▶ Cementado por desplazamiento.
- ▶ Inyección con tubería auxiliar externa.
- ▶ Inyección con tubería auxiliar interna con sello superior.
- ▶ Inyección con tubería auxiliar interna con zapata inferior.
- ▶ Método de desplazamiento con tapón separador.
- ▶ Método de obturadores y válvulas manguito de cementado.

El cementado por desplazamiento es el más sencillo de ellos, pero su utilidad está limitada por el empuje necesario para bajar la tubería de revestimiento. Se suele usar solamente en el emboquillado, cuando este se realiza al principio del proceso de construcción. Se perforan los primeros metros del sondeo. Se rellena con la cantidad estimada para completar el anillo de mortero y se introduce la tubería de revestimiento con un tapón perforable en el fondo. A continuación, se presiona sobre la tubería y el mortero desplazado por el revestimiento sube por la luz del pozo. Sellando la tubería al terreno como se muestra en la Figura 3.27. Para facilitar la operación se llena el tubo del revestimiento tapado en el fondo con agua para aumentar su peso. Una vez que el mortero ha fraguado se puede realizar una perforación telescopica por el interior del emboquillado para continuar la perforación del sondeo.

El segundo método puede verse en la Figura 3.28 y consiste en inyectar la lechada o el mortero, empleando una tubería flexible externa, desde el fondo del sondeo. El fluido de mayor densidad llena todos los huecos y hace flotar cualquier material menos denso hasta salir por la parte superior del sondeo. La inyección se realiza, a una velocidad cercana al litro por segundo. El fondo de la tubería de revestimiento esta sellada con una tapa de metal, o se ha sellado previamente con un tapón de mortero desde el interior. Al igual que en el caso anterior se emplea agua o fluido de perforación para contrapesar la tubería de revestimiento y disminuir su flotabilidad.

Este método presenta una variante colocando la tubería externa de bombeo por el interior del tubo de revestimiento. El tubo de revestimiento, que atraviesa una tapa metálica en el fondo, está lleno de agua o de todo de perforación y presenta un sello temporal en la parte superior de

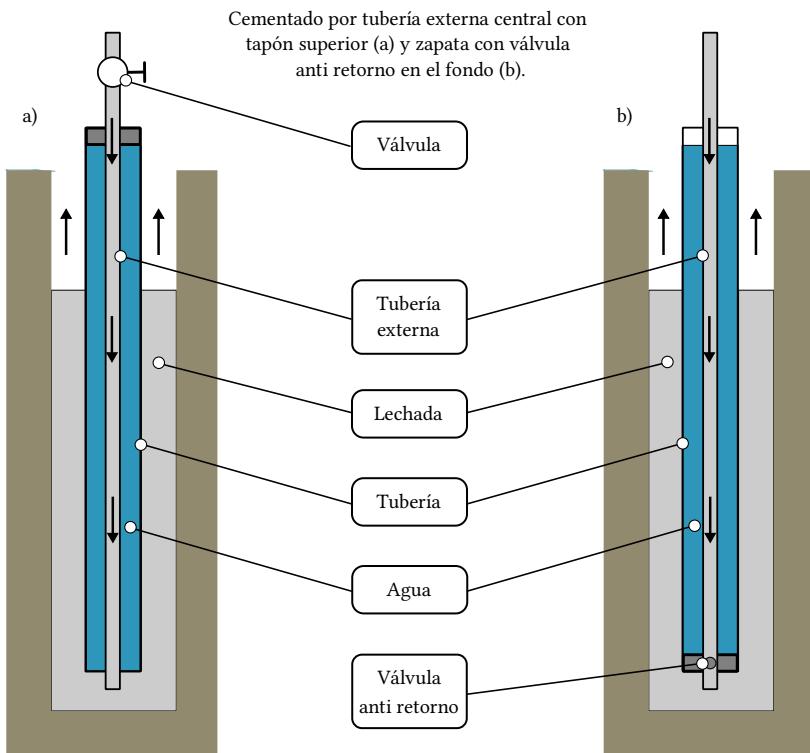


Figura 3.29: Métodos de cementado con tubería externa por el interior del revestimiento. En ambos casos la tubería de revestimiento se llena con agua para contrarrestar la diferencia de presión hidrostática con el exterior. El sondeo se llena con lodo bentonítico o agua (no se muestra en el dibujo), que es expulsada por diferencia de densidad al inyectar la lechada desde el fondo. La principal diferencia entre ambos métodos es que el caso (a) el tapón se sitúa en la parte superior de la tubería de revestimiento después de llenar esta con agua. En el caso (b) el tapón se instala en la parte final del revestimiento y es perforable. Fuente: los autores.

la tubería. Este sello evita la deformación de la tubería de revestimiento por la presión hidrostática ejercida por el anillo de lechada que se va formado durante el bombeo. La lechada sigue la zona de menor presión saliendo por debajo de la tubería de revestimiento y llenando el anillo exterior hasta completar el sellado tal y como se muestra en la Figura 3.29 a). En casos de una menor profundidad, y si se pretende colocar una tubería telescópica, se sitúa una zapata selladora (perforable) en el fondo del sondeo, en lugar del sello superior. El efecto conseguido es el mismo y puede verse en la Figura 3.29 b).

Alternativamente se puede evitar el uso de tubería flexibles de gran longitud bombeando el volumen de lechada estimada en el fondo del sondeo a través de la tubería de revestimiento que está abierta en el fondo. Con un tapón separador en la parte superior de la tubería que es desplazado por agua bombeada a presión sobre él. Este último actúa de émbolo o pistón y empuja la lechada por el espacio anular a cementar como se observa en la Figura 3.30. El separador es perforable y puede ser desmenuzado por la boca de perforación si se pretende cementar varios tramos de tubería telescópicamente.

Existen también sistemas de cementado mediante el uso de obturadores hinchables (*packers*), que permiten sellar la tubería de manera selectiva usando válvulas de inyección exteriores (manguitos) en el tubo de revestimiento. Es una técnica que tiene múltiples variantes y es llevada a cabo por especialistas. No se trata en este documento en profundidad por estar fuera del alcance de este.

En todos los casos es necesario una gran pericia en la ejecución y considerar aspectos tan importantes como la presión hidrostática, la viscosidad de la lechada para evitar rotura hidráulica del terreno y la consiguiente pérdida de fluido, velocidad del bombeo, etc.

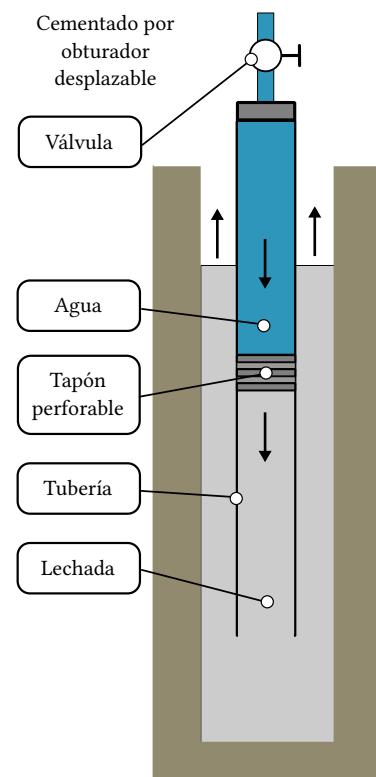


Figura 3.30: Cementado por obturador de desplazamiento. El obturador, o tapón, separa el agua de la lechada y se desplaza por el interior de la tubería de revestimiento empujado por el agua a presión bombeada desde la superficie. La cantidad de lechada y de agua inicial se calcula para obtener un completo sellado de la tubería. El tapón es perforable. Fuente: Los autores.

Un aspecto importante es el manejo de las tolerancias de presión de las tuberías y en la medida de lo posible intentar compensar hidráulicamente estas presiones. Para ello, aunque no se ha representado en las figuras correspondientes, para una mayor claridad, el sondeo se suele mantener inundado con agua o fluido de perforación mientras se cementa. Este método permite reducir mucho la diferencia entre la presión interna y externa de las tuberías involucradas en la cementación.

De esta manera se minimiza el efecto de la presión hidrostática y se trabaja dentro de los límites de tolerancia que aguanta el material. La diferencia de densidades hace que todo aquel material que sobra flote sobre la lechada, pudiendo retirarse al llegar al emboquillado del pozo.

3.12 Desviación del sondeo

Existen dos parámetros contemplados por las normas para medir la desviación de los sondeos de agua.

Parámetros de desviación de un sondeo de agua

- ▶ Verticalidad
- ▶ Alineación

La verticalidad indica el grado de inclinación del sondeo. Se mide con una plomada o péndulo. En el caso de la alineación se miden las variaciones respecto del eje del sondeo con respecto a una línea recta. Se mide con un inclinómetro como el mostrado en la Figura 3.31.



Figura 3.31: Imagen de un inclinómetro comercial. Fuente: *Soil Instruments*.

Un sondeo puede estar perfectamente alineado si su eje no sufre ninguna desviación, por tanto ser perfectamente recto, y sin embargo estar desviado de la verticalidad 5° . Por el contrario, puede ser perfectamente vertical, pero serpentejar a lo largo de su longitud. En ambos casos el sondeo está desviado y puede no ser válido según la normativa que se aplique.

Naturalmente se admite un grado de tolerancia para que estas desviaciones sean aceptables. Los grados de tolerancia varían según las normativas aplicadas.

Criterios de tolerancia [9]

- ▶ Desviación máxima respecto a la profundidad.
- ▶ Desviación máxima respecto a la profundidad y el diámetro del sondeo.

Como ejemplo del criterio de desviación de la verticalidad en función de la profundidad, la UE permite una desviación en la cámara de bombeo menor de los 0.5° por cada 50 m de profundidad. En la zona filtrante se admite hasta 1° por cada 50 m de profundidad.

La AWWA introduce el efecto del diámetro del sondeo en lugar de un ángulo. Admitiendo un desvío máximo de dos tercios del diámetro de la tubería por cada 100 pies de profundidad (unos 30 m).



Esta página está en blanco intencionalmente.

4

Acondicionado y limpieza

Una vez terminado el proceso de construcción del sondeo es preciso una limpieza de este. La limpieza consiste en eliminar los restos de lodos y materiales desprendidos durante la perforación. Este proceso dependerá de la estructura geológica del terreno atravesado por el sondeo y de los métodos de perforación empleados.

También hay que conseguir la máxima productividad del pozo, lo que permite reducir costes de bombeo y tiempo de funcionamiento.

Por último, es necesario una desinfección del pozo para eliminar de este cualquier tipo de bacteria o microorganismo introducido por el proceso de perforación, cementado o acondicionado del pozo.

4.1 Limpieza

El proceso de limpieza consiste en una serie de operaciones rutinarias a realizar después del cementado e instrumentación del pozo, que pueden resumirse en:

Fases de la limpieza después de la perforación

- ▶ Eliminación de los restos de lodos y escombros
- ▶ Reparar daños y obstrucciones
- ▶ Extracción de finas del filtro de grava
- ▶ Las características de la máquina disponible

Cuando se usan lodos de perforación, ya sean bentoníticos o poliméricos, quedan restos adheridos a las paredes del sondeo. Este problema es especialmente importante si se produce en las paredes del acuífero. Para eliminar estos restos se emplean reactivos y un bombeo intenso con el fin de sacarlos del pozo. En el caso de lodos bentoníticos se emplea algún tipo de floculante que permite que los restos se desprendan fácilmente de las paredes permitiendo el paso del agua.

Para lodos poliméricos se suele emplear hipoclorito sódico o cálcico. Al tratarse de azúcares de cadena muy larga del tipo galactosa, la lejía concentrada los descompone formando cadenas más cortas. Así pierden sus propiedades tixotrópicas y pueden bombearse fácilmente hacia el exterior.

La eliminación de las partículas procedentes de la perforación, como detritus, o los finos desplazados del suelo por las vibraciones, se eliminan por un bombeo intenso, hasta que el agua bombeada sale limpia. Lo mismo sucede para las partículas y finos acumulados en el filtro de grava.

Por supuesto si el acuífero es un banco arenoso¹, no se puede pretender eliminar todas los granos de arena. Sino solo aquellas que obstruyen el

4.1 Limpieza	43
4.2 Desarrollo	44
4.3 Higienizado	46

1: El agua procedente de bancos de arena pose una calidad excelente a pesar de los inconvenientes del filtrado.

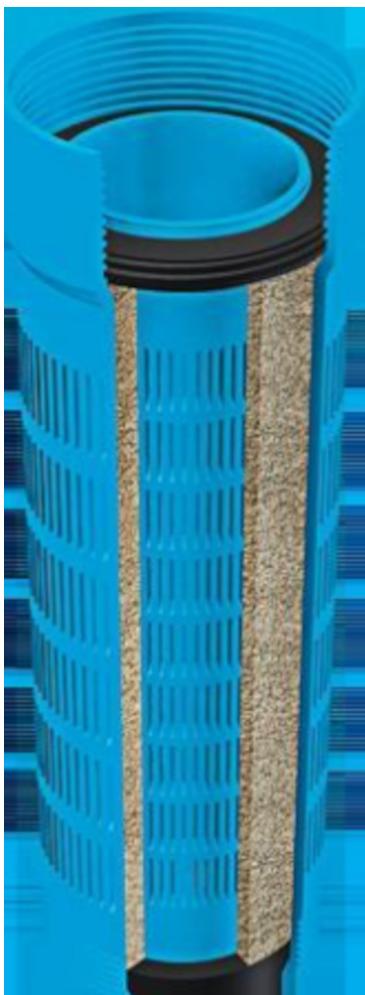


Figura 4.1: Ejemplo de filtro de doble enrejillado. En este caso la doble tubería de enrejillado está fabricada en PVC, pero puedes estar fabricadas en acero inoxidable u otros materiales. Fuente: [9].

filtro de grava. Normalmente en estas instalaciones se suele emplear un dispositivo de filtrado externo adicional, fuera del pozo, para eliminar alguna partícula dispersa en el agua. En ocasiones se emplean sistemas de filtro de grava entre una doble tubería de revestimiento, como el mostrado en la Figura 4.1.

4.2 Desarrollo

La fase de desarrollo de un pozo tiene como objetivo obtener la máxima cantidad de agua posible dentro de los parámetros que circunscriben el diseño del pozo.

Para ello se emplean diferentes técnicas en función de la geología de la zona y del equipamiento del pozo. Se fundamentan en una limpieza de todo el material que tapona las vías de entrada de agua a la cámara de bombeo y a la creación de vías adicionales para conseguir más caudal.

En pozos abiertos sin revestimiento

- ▶ Explosivos
- ▶ Fracturación hidráulica
- ▶ Acidificación
- ▶ Técnica *Air lift*

En este tipo de pozos se emplean pequeñas explosiones o el empleo de sistemas de alta presión para generar una fracturación hidráulica del terreno.

Los explosivos aumentan las fracturas naturales de una roca con juntas separadas, de forma que se aumenta el caudal al aumentar las vías de entrada de agua.

En caso de roca compacta con juntas muy finas y de poco espesor, la fracturación hidráulica por sí misma no es suficiente. Una vez que se producen fracturas en la roca por la acción de agua a presión, dichas fracturas adicionales se cierran si la presión desciende. Por ello es necesario generar las fracturas empleando una pulpa de agua y arena sílice. De manera que los granos de arena evitan que las fracturas se cierren una vez que la presión de rotura cesa. Es un método muy caro y se emplea en casos muy especiales.

La acidificación permite disolver y desincrustar determinados minerales se obstruyen las juntas. En caso de rocas de tipo calcáreo se puede emplear disoluciones de ácido clorhídrico o de ácido sulfámico² (mucho menos corrosivo) para atacar los bordes de las grietas, aumentando su espesor. En determinadas condiciones de acidez también permite eliminar hidróxidos de hierro y magnesio.

En ocasiones se emplean polifosfatos. Estos son agentes limpiadores más propios del mantenimiento de los pozos, para quitar incrustaciones, que del proceso de desarrollo de un pozo. En todos los casos, su uso viene acompañado de una agitación vigorosa del agua para realizar la desincrustación.

2: El ácido sulfámico es un compuesto químico emparentado con el ácido sulfúrico y las aminas, con la fórmula H_3NSO_3 .

Si la roca es de naturaleza silícea se emplea ácido fluorhídrico. Es una técnica peligrosa que requieren un conocimiento y unas medidas de seguridad importantes. Es muy raro su empleo en pozos de agua, salvo situaciones especiales.

La técnica del *Air lift* es más benigna. Consiste en el bombeo de agua y una corriente de aire a presión formándose así un líquido aireado de menor densidad que el agua. Este fluido penetra en las grietas de la roca y limpia los restos de finos y arcilla que los obturan. Al ser menos denso que el agua del entorno, son arrastrados hacia la superficie, donde son bombeados al exterior.

Si se emplea revestimiento, en terrenos incoherentes, existen también una serie de técnicas de uso común:

En pozos con revestimiento

- ▶ Técnica *Air lift*
- ▶ Acidificación
- ▶ Uso de hielo seco
- ▶ Proceso de pistoneo
- ▶ Técnica *Water jet*

A demás de las ya mencionadas técnicas de *Air lift* y de la acidificación, existen otras que pretenden eliminar las fracciones más finas del acuífero en la proximidad de la cámara de bombeo.

El empleo de hielo seco se usa tanto para limpieza como para desarrollo del pozo. Es especialmente usado en pozos profundos. Produce un buen arrastre de finos y es un método muy barato. Se basa en la sublimación del CO₂ en estado sólido (-78 °C). En contacto con el agua burbujea produciendo dióxido de carbono gaseoso lo que produce el arrastre y limpieza de residuos y finos de las superficies subyacentes. Este gas penetra en las grietas arrastrando el material situado en ellas.

La transferencia de calor entre el agua del pozo y el hielo seco es lo que marcará la intensidad de la producción de gas. A medida que el hielo carbónico baja, va aumentando la presión y puede provocar desplazamientos de grandes volúmenes de burbujas. Por debajo de los 42 m de columna de agua, la presión hidrostática hace que la sublimación cese y se pase a la fusión. Como el dióxido de carbono es muy soluble en agua la transferencia de calor aumenta bruscamente, acelerando el proceso. Si la velocidad de transformación es mayor que la velocidad de escape de las burbujas se puede producir una columna de agua que vacíe el sondeo, expulsando agua y suciedad por la emboquilladura, tal y como se observa en la Figura 4.2.

Como efecto secundario el anhídrido carbónico aumenta ligeramente la acidez del agua, lo que puede ser útil en pozos con suelos calcáreos.

Por último están los métodos de pistoneo y *Water jet*, que al igual que el método anterior son más usados en labores de mantenimiento y limpieza que en desarrollo propiamente dicho. El sistema de pistoneo cierra herméticamente el pozo mediante empleo de membranas y alterna el aumen-



Figura 4.2: Fotograma de columna de agua vaciando un sondeo profundo por la adición de hielo seco. El revestimiento es de unos 60 cm de diámetro y se han añadido 500 kg de hielo seco en bloques. Fuente: @MicanaldeyoutubeNETO.

to de presión y despresurización. Busca de esta manera la desobstrucción de las vías de entrada de agua al sondeo.

Por su parte el *Water jet* consiste en unos chorros de agua dirigidos (radiales al eje del sondeo) que arrastran incrustaciones y restos minerales adheridos al enrejillado.

La duración de las operaciones de desarrollo de un pozo es variable en función del sistema de perforación empleado. Siendo 16 h el tiempo promedio si el sondeo se perfora a rotación y alrededor de 8 h el resto de los sistemas de perforación [17].

4.3 Higienizado

Las aguas de origen natural pueden presentar sales disueltas que imposibiliten su uso para beber o para la agricultura. Desde un punto de vista biológico, no suelen presentar contaminantes que hagan que animales o personas enfermen tras su ingesta. Sin embargo, al poner en contacto el acuífero con el exterior se pueden causar contaminación cruzada. Por eso es fundamental el empleo de agentes desinfectantes después de terminadas las operaciones de perforación, acondicionado y limpieza.

Para la desinfección del pozo se suele utilizar una solución concentrada de cloro, mediante disolución de hipoclorito cálcico o sódico (lejía). Podría hacerse con cloro gaseoso, pero es extremadamente peligroso y nada aconsejable.

A modo de ejemplo se establece en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2 la cantidad de lejía a emplear en función del cloro libre disuelto y de las dimensiones del pozo.

Tabla 4.1: Cantidad de lejía [ml] requerida por cada metro de columna de agua, en función del diámetro y de los mg/l de cloro libre que se desee añadir al agua. Se usa lejía al 5% en peso. Fuente: [9].

∅ pozo [cm]	Volumen de lejía (al 5% en peso) necesaria [ml]				
	Agua/m [l]	50 mg/l	100 mg/l	150 mg/l	200 mg/l
6	3	3	5	8	10
11	9	9	18	27	37
13	14	14	28	42	56
16	20	20	40	59	79
18	27	27	53	80	106
21	34	34	69	103	138
61	292	292	583	875	1167
76	456	456	912	1367	1823
91	656	656	1313	1969	2625

Durante el funcionamiento del pozo es preciso mantener el entorno limpio de contaminación biológica externa. Para ello hay que instalar una adecuada protección en superficie. Normalmente consiste en un cierre del emboquillado mediante una tapa atornillada, con un sello sanitario (junta de goma) que evite la entrada de agua contaminada al interior del sondeo.

Para evitar un cierre estanco, y los problemas asociados a la presurización, se provee de un pequeño tubo de ventilación con un sifón invertido, que evita la entrada de agua de lluvia. Este tubo suele tener un diámetro

∅ pozo [cm]	Volumen de lejía (al 12% en peso) necesaria [ml]				
	Agua/m [l]	50 mg/l	100 mg/l	150 mg/l	200 mg/l
6	3	1	2	3	4
11	9	4	8	11	15
13	14	6	12	17	23
16	20	8	16	25	33
18	27	11	22	33	44
21	34	14	29	43	57
61	292	122	293	365	486
76	456	190	380	570	760
91	656	273	547	820	1094

Tabla 4.2: Cantidad de lejía [ml] requerida por cada metro de columna de agua, en función del diámetro y de los mg/l de cloro libre que se desee añadir al agua. Se usa lejía al 12% en peso. Fuente: [9].

de una pulgada. Todo el conjunto debe ir protegido dentro de una arqueta o bien una caseta. En algunos casos se emplea el brocal como arqueta por motivos estéticos.

Una vez que se ha procedido con el higienizado de toda la instalación, no será necesario volver a realizar la operación si el pozo no es abierto para su mantenimiento.

Toda fuente de agua natural dispone de microorganismos, que normalmente son inocuos. Aunque en algunas ocasiones no sea así, especialmente si el agua está estancada. Uno de ellos es la *Legionella pneumophila* que es una bacteria que puede infectar a los seres humanos. Se encuentra en forma de colonias en todas las aguas de origen natural, pero permanece en estado de letargo por debajo de los 25 °C. Para su desarrollo necesita alimento, que puede encontrar fácilmente en un entorno natural, y tiempo para desarrollarse. Por lo tanto, el agua que corre procedente de un torrente o desde una fuente no presenta este problema.

Se contagia por inhalación, lo que significa que si alguien se ducha con agua tibia contagiada de legionela puede contraer la enfermedad. Es una enfermedad grave que puede resultar mortal debido a que puede producir una neumonía severa. Afortunadamente si el agua se calienta por encima de 70 °C destruye la legionela en segundos.³

Las medidas de seguridad anti legionela implementadas en todos los equipos de agua caliente sanitaria en hoteles, hospitales y hogares están reguladas por el RITE[22] (Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios) y su cumplimiento estricto protege de este y otros problemas sanitarios. Este problema también afecta a grandes sistemas de aire acondicionado en edificios del sector terciario. Por este motivo se realizan inspecciones de manera periódica en todos ellos.

Debido a esto, en el caso de que se quiera emplear el agua de un pozo para consumo humano y sanitario en una vivienda, es recomendable el empleo de un depósito de almacenamiento del agua. De esta forma se puede tratar, periódicamente, para mantenerla en óptimas condiciones.

Además, es preciso seleccionar de forma adecuada el emplazamiento del pozo, considerando la cercanía de fosas sépticas, alcantarillados, granjas, etc. que pueden contaminar las aguas subterráneas de la zona.

3: Como es obvio, nadie se puede duchar a 70 °C. En vez de ello se somete a los termostos de almacenamiento de agua caliente a esa temperatura de manera periódica. El agua se usa mezclada (automáticamente) con agua fría hasta conseguir la temperatura de servicio de 38 °C.



Esta página está en blanco intencionalmente.

5

Sistemas de elevación de agua

En este capítulo se trata, brevemente, la tecnología involucrada en el bombeo de agua. Es un tema apasionante y con mucha historia. No obstante, en este caso, es conveniente ceñirse al uso que se hace de las bombas en la actualidad.

Por ello se tratan las dos tecnologías genéricas que se emplean en la elevación de agua en los sondeos, el tipo de tuberías usadas y un repaso de los conceptos mínimos de mecánica de fluidos necesarios para entender cuál de las dos tecnologías usar y porqué.

5.1 Tecnologías de bombeo

Actualmente existen muchas tecnologías para el bombeo de fluidos, pero en el ámbito de la captación de aguas y su posterior elevación hasta la superficie, se usan sobre todo dos grandes grupos de bombas, las volumétricas y las centrífugas:

Algunas tecnologías de bombeo de agua [20]

- ▶ Bombas volumétricas
 - Alternativas
 - * De émbolo
 - * De diafragma
 - Rotativas
 - * De anillo líquido
 - * De tornillo o engranaje
 - * De paletas y excéntrica
 - * De pistones múltiples
- ▶ Bombas centrífugas
 - De superficie
 - Girostáticas
 - Sumergidas

Naturalmente con el paso de los años se realizan nuevos desarrollos tecnológicos en este campo, existiendo múltiples variaciones y mejoras, centrados sobre todo en la eficiencia energética. Sin ánimo de ser exhaustivos se describe a continuación, de forma muy simplificada, el principio de funcionamiento de los dos grandes grupos.

Por un lado, las bombas volumétricas se basan en una carcasa hermética en cuyo interior se sitúa un elemento que produce un desplazamiento alternativo dentro del depósito estanco. En otros casos el elemento se mueve de manera rotativa (como las bombas de tornillo) en el interior del depósito estanco. En este desplazamiento se produce una aspiración

5.1 Tecnologías de bombeo	49
5.2 Bombas volumétricas	50
5.3 Bombas centrífugas	52
5.4 Sistema de tuberías	52
5.5 Elementos auxiliares	54

seguido de una compresión de manera reiterativa. Este mecanismo, ayudado por un conjunto de válvulas, genera una impulsión del agua. Un ejemplo muy simple y esquemático basado en un pistón dentro de un cilindro se muestra en la Figura 5.1. Ilustra el principio de funcionamiento de este tipo de bombas, en este caso en pistones, que es el más empleado dentro de esta tipología de bombas.

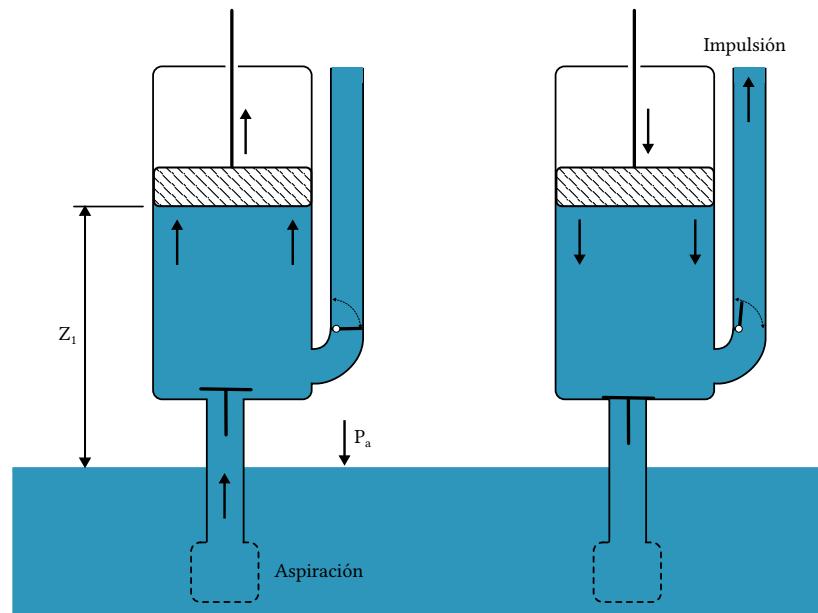


Figura 5.1: Esquema conceptual de funcionamiento de una bomba volumétrica. El embolo se mueve de forma alternativa mediante un mecanismo de biela, no dibujado en el esquema. Se produce una fase de aspiración seguida de una de impulsión. Cerrándose y abriéndose las válvulas de admisión e impulsión de manera alternativa. Siendo Z_1 la diferencia de cotas del líquido en la aspiración y P_a la presión atmosférica sobre la superficie del líquido externo. Fuente: [20] Modificado.

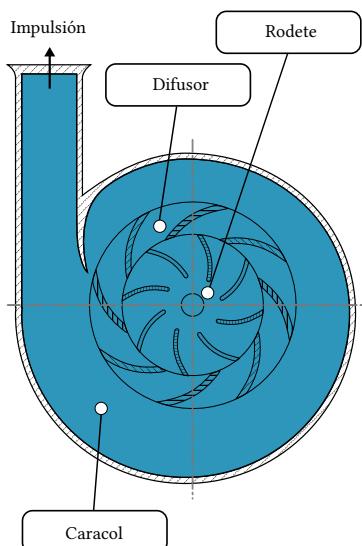


Figura 5.2: Esquema conceptual de los elementos de una bomba centrífuga. Fuente: [20] Modificado.

El segundo grupo es el de las bombas centrífugas, basadas en un rodete que gira a gran velocidad impulsando el agua radialmente. Este rodete lleva instaladas unas superficies alabeadas radiales, que empujan el fluido aumentando su energía cinética al girar. Rodeando el rodete está el difusor que es un elemento fijo que dirige el agua a impulsar en la dirección adecuada, como se muestra esquemáticamente en la Figura 5.2. El agua entra por el eje del rodete y sale por la tobera de impulsión después de recorrer el "caracol".

Son bombas con un mantenimiento muy bajo, al carecer de válvulas y equipo mecánico adicional. Presenta una transmisión directa sin necesidad de mecanismos biela-manivela. El rango de caudales de impulsión es muy amplio [20].

5.2 Uso de bombas volumétricas

Las bombas volumétricas impulsan el líquido con etapas consecutivas de aspiración e impulsión. En la fase de aspiración puede alcanzarse la presión de vapor y esto provoca que cambie de estado de líquido a vapor, formando burbujas o "cavidades", lo que se conoce como cavitación. Si se forman burbujas de vapor se puede cortar la continuidad del fluido dentro de la tubería de aspiración y la bomba deja de bombear. Cuanto menor sea la presión atmosférica (P_a) más fácil es llegar a alcanzar la presión de vapor.

Eso significa que la altura manométrica máxima (Z_1) depende de la altura sobre el nivel del mar a la que se coloque la bomba. Siendo menor la altura de bombeo en alta montaña que a pie de playa.

Para calcularlo se procede de la siguiente manera [20]:

Las presiones, en este caso, se miden en metros de columna de agua [mca]. Siendo una atmósfera equivalente a 10.33 mca.

Una vez purgada la bomba de aire residual, cuando el embolo sube por el pistón de la Figura 5.1 se produce una supresión en los puntos de la superficie de dicho embolo.

Considerando un equilibrio de presiones en un punto de la superficie del embolo se tiene:

$$\text{Presión externa} = \frac{P_a}{\gamma} \quad [\text{mca}] \quad (5.1)$$

Siendo γ la densidad del líquido.

$$\text{Presión interna} = \frac{P}{\gamma} + Z_1 \quad [\text{mca}] \quad (5.2)$$

Igualando ambas expresiones:

$$Z_1 = \frac{P_a - P}{\gamma} \quad [\text{mca}] \quad (5.3)$$

Siendo Z_1 la altura de aspiración, su valor máximo es cuando $P=0$. Considerando la densidad del agua a 4 °C igual a 1000 kg/m³ resulta que:

$$Z_1 = P_a = 10.33 \quad [\text{mca}] \quad (5.4)$$

Naturalmente el valor de P no es nulo, puesto que hay pérdidas de carga debidas al rozamiento, la altura de la instalación, la temperatura del agua, etc. La variación de la densidad del agua hace que sea necesario realizar ajustes.

En la Tabla 5.1 se muestra una comparativa de pérdidas de carga debido a la altura de la instalación. En la Tabla 5.2 se muestra una comparativa de pérdidas de carga debido a la temperatura del agua.

A efectos prácticos se suelen considerar entre 5 m y 6 m la altura máxima de Z_1 . Por tanto, estas bombas no se suelen usar más que para pozos muy superficiales o para vaciar zanjas o sótanos inundados. Existen bombas eléctricas y también conectadas a un motor de combustión interna, de dos tiempos.

Las bombas acopladas a un motor de combustión interna no se deben colocar, nunca, sobre una plataforma en el interior del pozo. El motivo es evitar el riesgo de un posible vertido de combustible o de aceite, en caso de fuga o avería.

Tabla 5.1: Tabla de pérdidas de carga, expresado en mca, debido a la altura sobre el nivel del mar. Fuente: [20]

Altura [m]	Perd. carga [mca]
0	0.000
100	0.125
200	0.250
300	0.375
400	0.500
500	0.625
600	0.750
700	0.870
800	0.990
900	1.110
1000	1.220
1100	1.330
1200	1.440
1300	1.550
1400	1.660
1500	1.770
1600	1.880
1700	1.990
1800	2.090
1900	2.190
2000	2.290
2200	2.490
2400	2.680
2600	2.870
2800	3.050
3000	3.230
3500	3.650
4000	4.060

Tabla 5.2: Tabla de pérdidas de carga, expresado en mca, debido a la temperatura del agua. Fuente: [20]

Temp. [°C]	Perd. carga [mca]
10	0.125
15	0.173
20	0.236
25	0.320
30	0.430
35	0.570
40	0.740
45	0.970
50	1.250
60	2.040
70	3.160
80	4.800
90	7.150
100	10.330

5.3 Uso de bombas centrífugas

Las bombas centrífugas permiten el bombeo de grandes caudales. Se produce un pequeño vacío en la zona admisión producido por el desplazamiento del agua impulsada por el rodete. En este tipo de bomba también existe el problema de la cavitación producido en las palas del rodete, especialmente en las que tienen una velocidad de giro muy grande.

Para evitar este problema es necesario que tanto máquinas horizontales o sumergidas dispongan una columna de agua lo suficientemente amplia para contrarrestar la presión reducida en los álabes. En máquinas antiguas esta columna de carga podría suponer una altura de 3 m o 4 m de agua. Hoy en día con las modernas bombas de turbina el problema casi no existe. En todo caso es necesario consultar con el fabricante antes de instalar una bomba.

La tendencia actual, en perforación, es construir sondeos lo más estrechos posibles, lo que ha llevado a desarrollar bombas de cada vez más estrechas, llamadas bombas de "lápiz".

En caso de necesitar elevar caudales en sondeos estrechos y profundos y no existir bombas que den esas prestaciones se pueden conectar bombas en serie separadas por tramos de tubería entre ellas. Siempre y cuando se haga un cálculo preciso del funcionamiento de ambas simultáneamente para evitar cavitación. El caudal bombeado será el mismo, pero la altura de bombeo aumentará considerablemente y también las pérdidas de carga debido al rozamiento.

Las bombas sumergidas presentan la ventaja de que se refrigeran por el agua que bombean. El inconveniente estriba en el funcionamiento en vacío. Pudiéndose quemar por falta de refrigeración. Un buen sistema de control de nivel es fundamental para evitar accidentes.

El pH o la salinidad del agua a bombeo también es importante, puesto que si se trata de aguas acidas de mina o agua marina es preciso emplear metales resistentes a la corrosión como aleaciones de bronce de aluminio¹, que además presenta alta resistencia al rozamiento. Muy empleado en la fabricación moderna de hélices de barco y bombas para agua de mar. Con una dureza parecida al acero y una resistencia química muy superior.

5.4 Sistema de tuberías

El bombeo de agua requiere de un sistema de conducciones para canalizar el agua, allí donde sea preciso. El sistema de conducciones primario es el que transporta el agua desde la zona de producción, en el fondo del pozo, hasta la superficie.

Este primer tramo tiene la función principal de elevar el agua hasta la superficie. El desnivel que tiene que salvar se conoce como "columna de agua" y es un parámetro directamente relacionado con el dimensionado de la bomba a emplear.

El segundo parámetro es el caudal que es el volumen de agua bombeado por unidad de tiempo. Se suele medir en [l/s] o [m³/h].

1: El bronce de aluminio es un grupo, genérico, de aleación cuyos componentes principales son el cobre y el aluminio.

Tipos de tuberías para conducción de agua

- ▶ Flexibles
- ▶ Semiflexibles
- ▶ Rígidas
 - Plásticas
 - Metálicas

La flexible tiene la ventaja de su bajo coste y peso. Para grandes secciones se fabrican con lona o rafia sintética recubiertos por una capa interna y externa de caucho vulcanizado. Para diámetros de 1 o 2 pulgadas se emplea plástico flexible con un refuerzo interno de malla de nailon (*nylon*). Este tejido, de la familia de las poliamidas, aumenta mucho las prestaciones en cuanto a resistencia a la presión, limitando la deformación de la tubería. Las semirrígidas son de polímero plástico corrugado con refuerzo en espiral de hilos metálicos. Todas estas canalizaciones se unen a los elementos de conexión mediante abrazaderas de tornillo. Se suelen emplear en instalaciones temporales.

Las conducciones rígidas son para instalaciones definitivas o grandes presiones. Permiten mayores prestaciones en función del material con el que se fabriquen. Las de material plástico son de PVC para uso general y de Polietileno (PE) si se emplean para la conducción de agua potable. La elección del tipo de tubería depende de los diámetros y presiones nominales requeridas [23]. Las presiones máximas están entre 16 bar y 20 bar. Si se emplea PE sus uniones se realizan por soldadura a tope, Figura 5.3, o empleando acoplos de compresión, como el de la Figura 5.4. Se usa roscado y adhesivos en caso de tuberías de PVC.

Las conducciones metálicas permiten presiones mucho mayores, lo cual es necesario para pozos de mucha profundidad. Además, posibilitan servir como elemento estructural que soporte el peso de la bomba. En caso de emplear tuberías flexibles, suponiendo que soporten la presión de trabajo, es preciso suspender la bomba mediante el empleo de un arnés y una cuerda, o cadena, desde la superficie. Con tuberías rígidas, la propia tubería se emplea como soporte de la bomba y el cable de alimentación eléctrica.

Los tramos de tubería metálica pueden unirse de diferentes maneras [24], pero si se colocan en vertical en el interior del pozo, se suelen soldar un aro de cuello (*stub end*) en los extremos del tramo de tubería y se atornillan mediante bridases locas (*lap joint*). Para evitar fugas se colocan juntas de caucho, o algún tipo de sellador, entre cada unión. Esto facilita el mantenimiento de la bomba y de la propia tubería y evita que el agua entre en contacto con las bridases metálicas y los tornillos de sujeción. Este sistema está normalizado y permite un amplio catálogo de tuberías [25], así como diferentes materiales como acero al carbono, acero inoxidable o aluminio. Se puede observar una bridase loca y un aro de cuello en la Figura 5.5 y su resultado final, una vez atornillada, en la Figura 5.6.

El procedimiento operativo para colocar la bomba en su posición, unidad a la tubería, es parecida a la de las sartas de perforación. Se introduce la bomba atornillada al tramo final de tubería y se va descendiendo poco



Figura 5.3: Elementos de una tubería de PE termosoldados a tope. Fuente: Grupo Hidráulica.



Figura 5.4: Acoplos de presión para unión de tuberías de PE. Fuente: Grupo Hidráulica.



Figura 5.5: Aro de cuello y bridase loca. Fuente: DNBRida.



Figura 5.6: Unión de tuberías mediante aro de cuello y bridase loca. Fuente: Grupo Hidráulica.

a poco añadiendo más tramos de tubería en la parte superior. Todo ello con la ayuda de una grúa.

5.5 Elementos auxiliares

En función del uso para el que se ha destinado la instalación, pueden ser necesarios algunos elementos adicionales como los siguientes:

Algunas elementos auxiliares en instalaciones de bombeo

- ▶ Controladores de nivel
- ▶ Control electrónico de la bomba
- ▶ Valvulas antirretorno
- ▶ Acumuladores de presión
- ▶ Bombas de presión instantánea

Como se ha visto, una de las características que poseen las bombas más usadas en la actualidad es que emplean el agua que bombean como sistema de refrigeración del motor eléctrico. Si la bomba se queda sin agua, puede llegar a quemarse en un periodo de tiempo muy corto. Para evitar eso se emplea un sistema de control de nivel, que básicamente son dos sondas piezométricas.

El funcionamiento es muy simple: cada sonda cierra un circuito eléctrico en contacto con el agua del sondeo. La primera sonda indica el nivel máximo y la segunda el nivel mínimo del agua en el pozo. La separación entre ambas sondas es ajustada por el personal de mantenimiento del pozo y dependerá de la producción de agua del pozo y de la demanda de agua de la bomba.

Se parte de una situación en que la bomba está sumergida, junto con las dos sondas. A medida que la bomba extrae agua el nivel desciende hasta situarse por debajo de la sonda superior, dejando el primer circuito abierto. En este punto la bomba sigue bombeando y el nivel sigue descendiendo. Cuando la segunda sonda queda por encima del nivel de agua se abre su circuito y la bomba se detiene. El nivel del agua comenzara a subir lentamente. Cuando la segunda sonda vuelve a tocar el agua se cierra su circuito, pero la bomba no arranca. La bomba no comienza a funcionar de nuevo hasta que el nivel llegue hasta la primera sonda, cerrando su circuito. Por tanto, los límites de bombeo están marcados por la altura a la que se colocan las dos sondas.

Esta disposición permite disminuir la cantidad de arranques y paradas de la bomba. Si se emplease una única sonda, la bomba pararía al llegar al nivel de esta para ponerse en marcha pocos segundos después y así continuar hasta quemarse por sobrecalentamiento, al no dar tiempo a una refrigeración efectiva.

Existe un mecanismo que integra el control de estos dos niveles, de forma más tosca. Consiste en un flotador hueco que dispone de un inclinómetro electrónico en el interior. El flotador está conectado directamente a la bomba mediante un cable corto. Si el flotador está flotando totalmente



Figura 5.7: Bomba de achique de agua sumergible con flotador de control de nivel. Fuente: Amazon.

lo hace en posición vertical. A medida que baja el nivel del agua, el ángulo disminuye, hasta alcanzar la horizontal. En ese momento la bomba se para y reanudará su funcionamiento cuando el nivel sube y el flotador vuelve a estar en posición vertical. Se puede controlar, hasta cierto punto, el margen de funcionamiento mediante la longitud del cable. Se emplea en bombas de achique de pequeño tamaño empleadas en drenado de zanjas o zonas inundadas como la de la Figura 5.7. En obra recibe el nombre popular de "chupa charcos".

Las bombas con instalación fija no vienen con cable, ni disponen de fuente de alimentación propia, ni de sistema de control integrado. Es necesario instalar un cable eléctrico de la longitud específica para cada instalación. En función de su potencia pueden ser trifásicas o monofásica, si son de poca potencia. Por todo esto es necesario que la instalación la realice un técnico especializado y con acreditación.

Para realizar la conexión se emplean cables especiales recubiertos de caucho y a prueba de agua. La conexión eléctrica entre el cable principal y la bomba son recubiertas por cinta aislante de caucho autovulcanizable que garantizan la estanqueidad total de la conexión efectuada.

Por tanto, si se quiere alimentar eléctricamente, efectuar el control de niveles, control de funcionamiento horario, etc. es preciso conectar la bomba a un control electrónico como el de la Figura 5.8. Estos cuadros de control, además de estar homologados y disponer del marcado CE, disponen de sistemas de seguridad que protegen a la bomba de sobretensiones, cortocircuitos, etc.

También los sistemas hidráulicos tienen su importancia y uno de ellos son las válvulas antirretorno. Cuando se bombea agua desde un pozo, la tubería se llena de agua. Si cesa el bombeo la gravedad hace que esta columna de agua baje por la tubería hasta el pozo. Esto tiene dos efectos perniciosos: el primero es que hace girar el rodamiento de la bomba en sentido contrario. Esto puede producir una avería en la bomba, y corrientes eléctricas parasitas, por hacer funcionar el motor de la bomba como generador (depende de la tecnología del motor). El segundo efecto es que puede subir el nivel de agua del pozo lo justo para que la bomba comience a funcionar de nuevo en muy poco tiempo. Si el sistema estuviera conectado a un depósito de almacenamiento podría darse el caso de que la succión del agua de la tubería arrastrase el contenido del depósito, vaciando el depósito y desbordando el pozo.

Todo esto se soluciona empleando una sencilla válvula antirretorno que evita que el fluido circule en sentido contrario, manteniendo la tubería llena de agua en todo momento. Existen varios mecanismos en función del diámetro de la tubería, pero las más comunes son las de resorte cuyo esquema puede observarse en la Figura 5.9.



Figura 5.8: Cuadro de control para bombas trifásicas. Fuente: Zuendo.com.

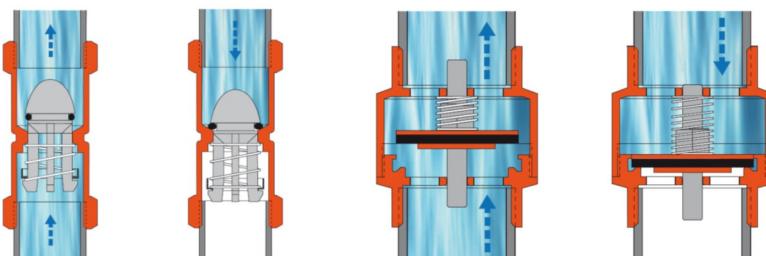


Figura 5.9: Esquema de válvulas antirretorno de resorte. Permiten la circulación del fluido en un sentido, pero se obturban si el fluido intenta ir en sentido contrario. Fuente: standardhidraulica.com.

2: Un presostato es un dispositivo cierra o abre un circuito eléctrico en función de la presión de un fluido.



Figura 5.10: Imagen de un presostato electromecánico para bombas de banco. Fuente: Zerodis.

Hasta ahora se ha tratado de bombas sumergidas, pero una vez que el agua está en superficie se suele almacenar en un depósito intermedio para su acopio y tratamiento sanitario. De este depósito se emplea una segunda bomba para su distribución. Este tipo de bombas no suele ser una bomba de inmersión sino de banco. Y cómo funcionan bajo demanda no se activan por diferencias de cota sino mediante presostatos² como el de la Figura 5.10. Cuando la presión desciende por debajo de un valor, preestablecido por ajuste, el presostato conecta el motor de la bomba hasta alcanzar de nuevo la presión de trabajo. El sistema de control de este sistema es similar al de las sondas de nivel de las bombas sumergidas, pero con dos niveles de presión ajustables. Los elementos básicos de control y conexión pueden verse en la Figura 5.11. La bomba está conectada, aguas arriba, a un circuito hidráulico presurizado y, aguas abajo, al depósito de almacenamiento, como se ve en la Figura 5.12.

En estos casos la bomba funciona bajo demanda, pero en este caso la demanda no viene fijada por el dimensionado de la bomba y el caudal que aporta el acuífero, sino que dependerá de la necesidad de agua en cada momento. Al ser la demanda imprevisible es difícil un dimensionado de la bomba efectivo. El problema surge cuando se presenta una demanda corta pero repetida con intervalos cortos de separación entre uso y uso. Esto puede llevar a un sobrecalentamiento del sistema, y sobre todo, a un gasto de energía desproporcionado por operaciones de arranque y parada constantes.

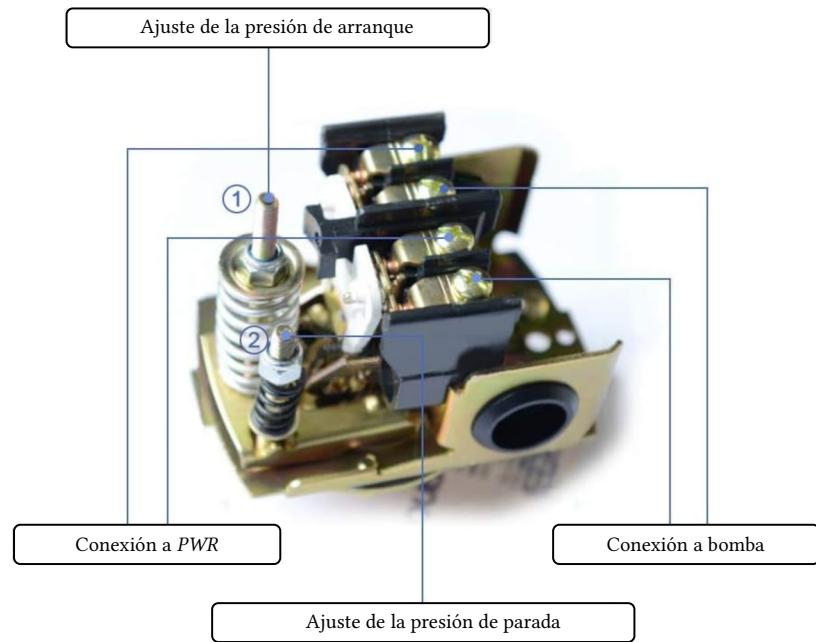


Figura 5.11: Partes de un presostato electromecánico. Fuente: Zerodis. (Traducido).

Las primeras bombas de este tipo disponían de lo que se denomina "acumuladores de presión", que evitan esta situación. Son depósitos metálicos, normalmente en forma de esfera, que disponen de una membrana de caucho en el interior. Una parte del depósito se llena con aire a presión mediante el empleo de una válvula neumática antirretorno. Se fija como presión la nominal de la instalación por diseño (o por normativa). La otra parte del depósito se conecta, en paralelo, a la tubería de salida de la bomba.

Cuando hay demanda de agua la presión desciende más despacio porque el acumulador actúa como amortiguador soltando agua del depósito. Esta agua está empujada por la membrana de caucho que tiene aire a presión del otro lado. Cuando la esfera se vacía de agua, la presión comienza a descender y la bomba comienza a funcionar nuevamente. Esta vez funciona durante más tiempo porque debe atender a la demanda de agua y volver a recargar el acumulador de presión de agua. De esta manera se aumentan los tiempos de funcionamiento y los tiempos de inactividad, haciendo un sistema más eficiente energéticamente. Se puede observar un acumulador de presión de acero inoxidable instalado en una bomba de banco en la Figura 5.12.

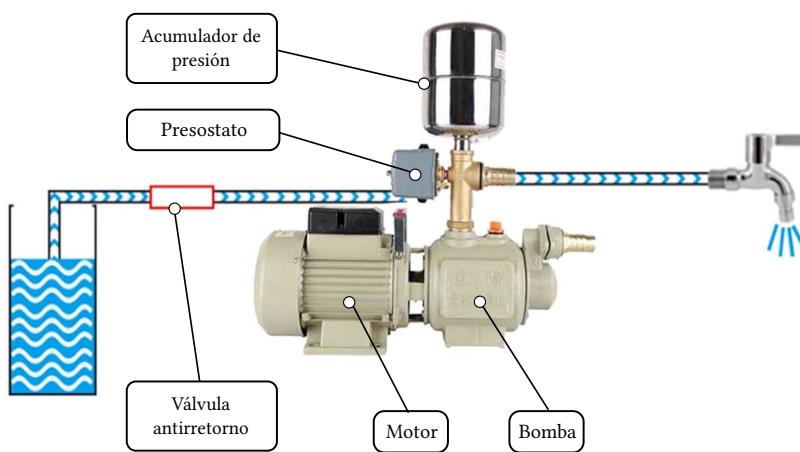


Figura 5.12: Esquema de una bomba de banco controlada por un presostato electromecánico y mejorada con acumulador de presión. Fuente: Zerodis. (Modificado).

En la actualidad el diseño de bombas ha mejorado mucho en cuanto eficiencia energética y se han desarrollado bombas con control electrónico que permiten una demanda de presión instantánea sin necesidad de acumuladores de presión y sin calentamiento de la bomba.



Esta página está en blanco intencionalmente.

Clausura de un pozo

Se estudian una serie de factores antes de proceder al sellado físico de un pozo de agua. Algunos de ellos son la vulnerabilidad del medio ambiente circundante, la proximidad de otros pozos y el coste y materiales a emplear en su clausura. Por supuesto en todos los casos la geología e hidrogeología de la zona son importantes.

6.1 Procedimiento de clausura 59

Otros factores que se deben tener en cuenta son: el diámetro del sondeo, su profundidad, el nivel freático existente y si hay revestimiento en el sondeo. En caso afirmativo, hay que estudiar si es necesario retirar el revestimiento total o parcialmente.

6.1 Procedimiento de clausura

El procedimiento que se debe seguir dependerá de si la clausura es temporal o definitiva. O bien que una clausura temporal se convierta en definitiva de manera obligatoria, dependiendo de las circunstancias.

Para proceder a una clausura temporal:

Clausura temporal

- ▶ No debe haber riesgo de contaminación superficial.
- ▶ El sondeo no puede comunicar diferentes acuíferos entre sí.
- ▶ Hay que señalizar visualmente el sondeo a clausurar.

Si cumple estas condiciones se puede proceder a su clausura que, por su carácter temporal, no debe consistir en obturar el sondeo si no en ponerle un cierre. Puede ser simple como la colocación de una tapa metálica. También puede ser más complejo como la construcción de una fábrica de ladrillo con viguetas, en el caso de un pozo de gran diámetro revestido con anillos de hormigón. En todos los casos es interesante instalar algún acceso, con cierre, para poder acceder mediante una sonda piezométrica¹ y controlar el nivel de agua del pozo mientras está clausurado. En el resto de los casos, la clausura es definitiva.

Algunas de estas decisiones se toman cuando las investigaciones para la captación de aguas dan resultados negativos. Según las características del sondeo y la fase de construcción se procede a la paralización del proceso constructivo, retirada del revestimiento si lo hubiera, relleno con áridos y un cementado, en superficie, para evitar filtraciones.

Otro supuesto es la paralización de la obra, o la clausura del sondeo ya terminado, por causas administrativas o judiciales. En estos casos además suele haber importantes multas por parte de la administración.

Se emplean diferentes materiales para sellar el sondeo. Los materiales de relleno pueden ser permeables o impermeables. El hormigón, el mortero y la lechada de cemento son porosos y permeables. Para que sean

1: Una sonda piezométrica es un instrumento de medida que permite saber a qué distancia de la superficie está el nivel de agua subterránea en el interior de un tubo piezométrico. El modelo más sencillo consiste en un cable doble, que lleva marcada una escala métrica que permite saber a qué profundidad está la punta de la sonda. En superficie los dos cables están conectados con un zumbador o una señal luminosa. En el fondo del sondeo los extremos de los dos cables están separados. Al bajar por el sondeo y encontrar agua el circuito eléctrico se cierra indicando que se ha llegado al nivel del agua.

impermeables necesitan aditivos y adiciones que reduzcan su porosidad. En todo caso, depende de las circunstancias y necesidades concretas para poder considerarlos "impermeables". Los materiales totalmente impermeables, de forma natural, están compuestos por arcillas y bentonitas.

Algunos de estos materiales, empleados como carga o relleno, son: áridos naturales o reciclados que no tengan presencia de materia orgánica u otros materiales que pueden degradarse. Deben tener la granulometría adecuada para que puedan compactarse fácilmente sin dejar huecos o producir atascos. En todo caso, los materiales empleados deben cumplir las siguientes características:

Características de los materiales de relleno [26]

- ▶ No deben ser peligrosos para la salud de los trabajadores.
- ▶ Su manipulación debe ser sencilla.
- ▶ Deben ser fácilmente depositables donde sea necesario situarlos, ya sea dentro de la tubería de revestimiento o en el espacio anular entre el suelo y esta última.
- ▶ Deben ser mecánicamente resistentes a las condiciones de depósito definitivas.

Cada país tiene su propia normativa en cuanto al cierre y clausura de pozos de agua. Dependiendo de si el sondeo este revestido o no.

La primera fase es la retirada de la instalación del sondeo, como el sistema de bombeo, instalación eléctrica, etc. También se retira cualquier material que pueda haber caído al interior del pozo durante el periodo de inactividad. Para ello se emplean las herramientas de pesca² habituales en los procesos de perforación. Empleando los mismos métodos que cuando se produce algún incidente como las caídas accidentales de herramientas o material al interior del sondeo.

Una vez limpio se comienza con la medida del nivel del acuífero en el momento de la clausura del pozo. Se emplea una sonda piezométrica. Dicho dato se adjunta al informe final del expediente de clausura.

En caso de un pozo sin revestimiento, se rellenar el sondeo desde el fondo con el material de sellado elegido. Empleando una tubería de bombeo que llegue hasta abajo. Después se bombea el material de sellado lentamente hasta completar su sellado.

Este procedimiento permite que se consigan dos objetivos: el primero es que no se formen huecos ni burbujas en el interior del sello y el segundo es que se compacten las paredes del sondeo por la presión hidrostática de la columna de material inyectado. Si algún material se desprende en el proceso, flota sobre el mortero y es expulsado por la cabecera del sondeo. Adicionalmente este sistema evita que las capas atravesadas por el sello estén en contacto unas con otras. Si hay alguna capa especialmente critica se debe usar material totalmente impermeable.

Por el contrario, en algunas zonas de la capa productiva, puede interesar alternar capas de mortero con capas de grava limpia para evitar que el

2: Se define "pesca" como la operación de recuperación de elementos depositados en el fondo del sondeo de manera accidental.

acuífero vea mermada la transmisividad del agua. Estos factores están determinados por la hidrogeología de la zona que se conoce de los estudios previos.

Una vez completada la cementación se cubre con un montículo de tierra o áridos, con el fin de proteger la zona hasta que fragüe y sea suficientemente resistente. Aunque se use arcilla o bentonita como componente principal del material inyectado, siempre es recomendable emplear un consolidante como el cemento *portland* con el fin de dar resistencia mecánica a la inyección. Si además se añaden áridos como material de carga, el precio de la inyección se reducirá considerablemente.

Si el pozo está entubado es necesario la destrucción de la tubería antes de su sellado. A modo de ejemplo, una tubería de PVC se puede reperforar con un tricono en un diámetro un poco mayor, triturando completamente el revestimiento plástico, pero sin retirar la capa de mortero del sello del revestimiento. Otra opción es emplear un escariador que use como guía el pozo antiguo y reperfore, destruyendo totalmente el sondeo original.

Para tuberías metálicas y de pequeño diámetro existen máquinas de perforación tipo *Auger* de gran diámetro modificada. En las que se ha instalado una tubería central a modo de cuchara. Van equipadas con cuchillas en la punta y barren una zona en forma de corona cilíndrica concéntrica con el sondeo. Esto permite recoger el tubo de revestimiento entero, así como una pequeña capa de mortero residual adherido a este, por el interior de la tubería hueca de la perforadora.

En el caso de tuberías metálicas donde no es posible, o no es conveniente, su retirada se suele emplear una serie de herramientas que perforan orificios a lo largo de la totalidad de la tubería. El objetivo es que el material de inyección penetre en el revestimiento previo de la tubería. Se suelen realizar, un mínimo, de dos perforaciones cada 30 cm de profundidad.

Se suele emplear máquinas hidráulicas que funcionan por punzonamiento y que se descuelgan a través del tubo de revestimiento hasta completar el punzonado. Son baratas y de bajo mantenimiento, como la mostrada en la Figura 6.1. Su efecto en una tubería, en ensayo de laboratorio, se observa en la Figura 6.2. Existen otros sistemas, de aplicación en otros países, que emplean pequeñas cargas explosivas direccionales. Dada la situación actual, los permisos y medidas de seguridad adicionales necesarias hacen que no sea una solución, viable económicamente, en España.

Un caso singular se da en el sellado de pozos artesianos. Si el pozo presta una surgencia de agua, el primer paso es añadir una extensión de tubería temporal que permita superar el nivel de agua en reposo. De esta manera se puede trabajar sin que salga agua por la boca del pozo. Una vez superado el primer problema se estudia cual es la forma de proceder para su sellado, en función de geología de la zona.

Al igual que en los casos anteriores de pozos no artesianos, se cementa desde el fondo empleando lechada de cemento, mortero, hormigón o bentonita. En este caso no existirá corriente de agua que produzca lavados, puesto que la posible corriente de agua se ha detenido mediante la extensión de la tubería de revestimiento. Las fases de este proceso se muestran en la Figura 6.3, donde se cierra la válvula del agua, se instala una extensión de tubería por encima del nivel estable de agua y finalmente se sella como cualquier otro pozo.

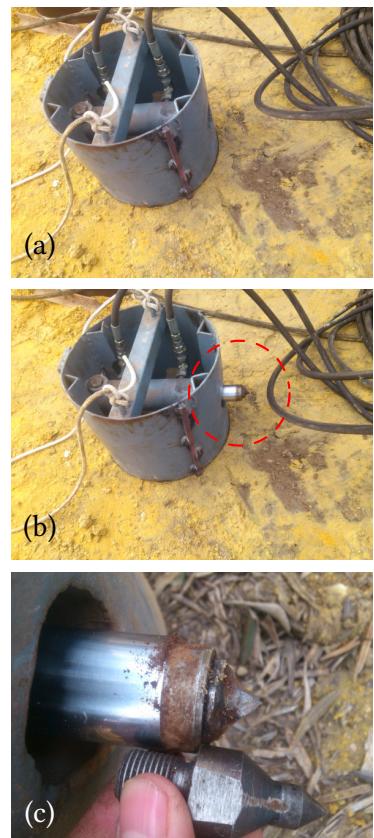


Figura 6.1: Fotografía de un punzonador hidráulico de tuberías. Con el punzón retraído (a) y extendido (b). Detalle del punzón (c). Fuente: Los autores.



Figura 6.2: Ejemplo de tubo punzonado hidráulicamente en pruebas de laboratorio. Se aprecia la deformación de la tubería por efecto del punzón. Fuente: Los autores.

3: La taladrina es un producto compuesto por emulsiones de aceites minerales y agua.

Con niveles de agua en reposo muy altos, respecto de la boca del pozo, el método de añadir una extensión de tubería puede no ser operativo. Un ejemplo, esquemático, del proceso a seguir se explica en la Figura 6.4. En este caso se emplea una tubería con un obturador inflable en su exterior (*packer*). Se introduce por el interior del sondeo y una vez colocada en la posición adecuada se infla mediante el empleo de un fluido hidráulico como la taladrina³, que se inyecta a través de una conducción auxiliar. Al inflar el obturador se tapona el flujo del agua y se puede inyectar por la tubería del centro el material de sellado.

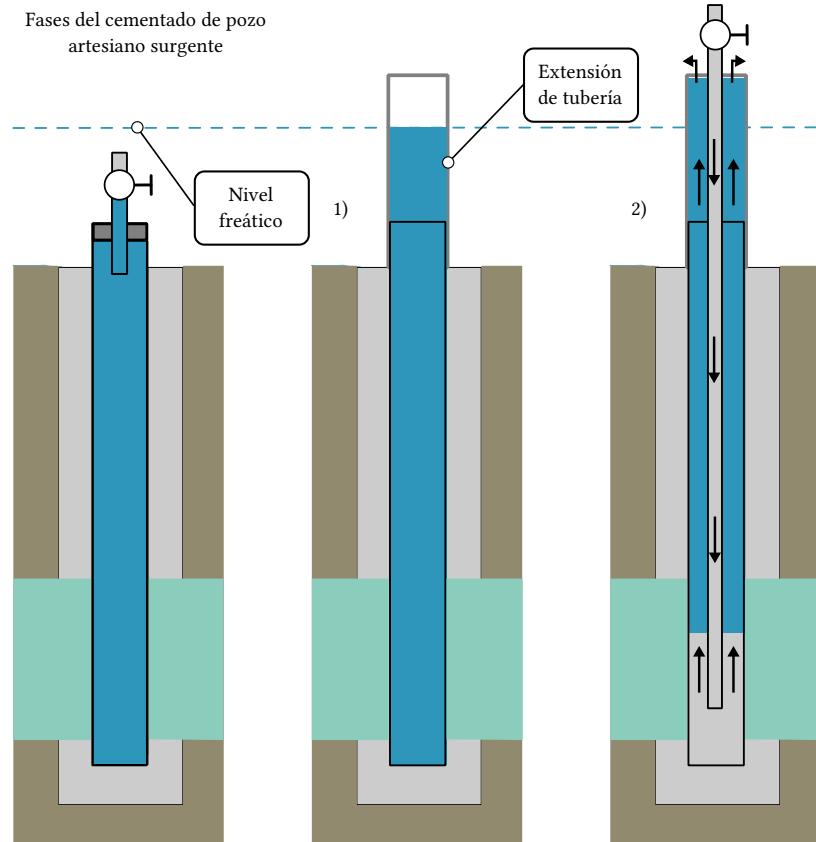


Figura 6.3: Ejemplo de sellado de un pozo artesiano surgente mediante extensión de tubería e inyección de mortero de cemento. En la fase (1) se añade un tramo de tubería exterior que sobrepase el nivel freático estable del pozo. Cessando la corriente de agua surgente. En la fase (2) se inyecta lechada o mortero de cemento desde el fondo que desplaza el agua sobrante por diferencia de densidad. No se produce lavado del mortero debido a la ausencia de corriente de agua. Una vez completado el sellado se retira la tubería. Después del fraguado se recorta el sobrante de tubería y mortero. Fuente: los autores.

Con ambas técnicas, si el acuífero confinado corre el riesgo de perder transmisividad, se puede llenar la parte productiva con gravas y después cementar el resto. Teniendo en cuenta que se ha neutralizado la corriente de agua la posibilidad de lavado del cemento se reduce drásticamente.

En el cementado con obturador inflable, en la primera fase del sellado, el agua contenida en el pozo siempre se expulsa al acuífero, junto con una pequeña cantidad de cemento. Aunque la cantidad del cemento es mínima, dependiendo de las circunstancias, puede no ser admisible como solución.

Una opción, mostrada en la Figura 6.5, es el relleno inicial de la zona productiva del pozo con grava esterilizada. Empleando la tubería de inyección. Después se sella la parte superior con resina acuarreactiva hasta cortar la corriente de agua surgente. Terminando con un relleno de mortero hasta colmatar el pozo.

Si no está disponible la resina acuarreactiva, o existe alguna pega por motivos medioambientales, siempre se puede recurrir al silicato sódico, siguiendo el mismo esquema que el de la Figura 6.5. En este caso la dosificación es del 50% en peso de cemento y otro 50% de silicato sódico.

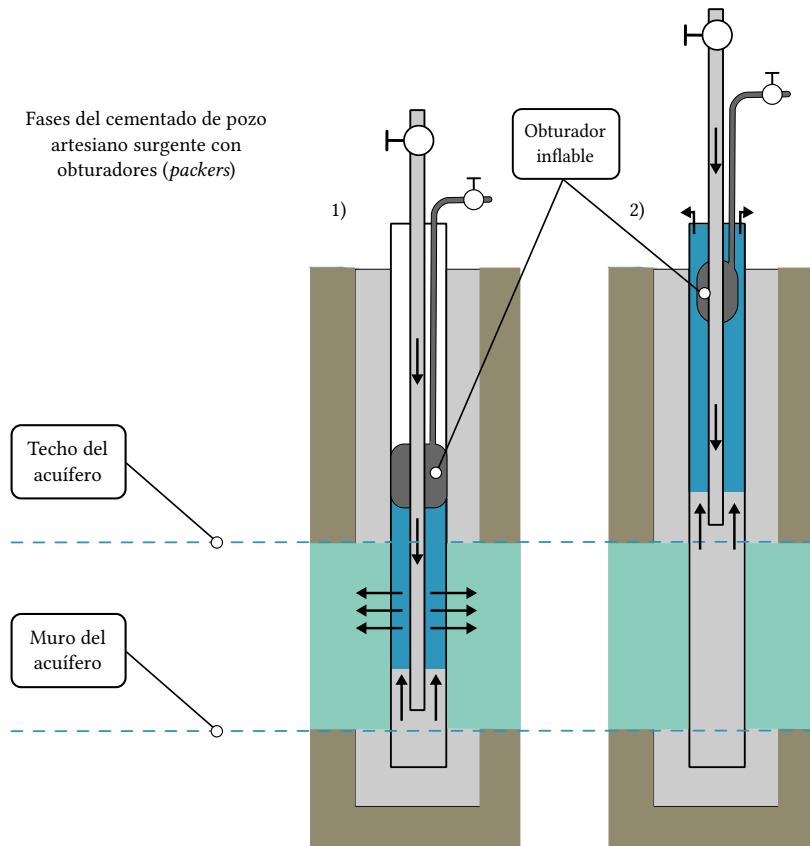


Figura 6.4: Ejemplo de sellado de un pozo artesiano surgiente mediante inyección de mortero de cemento y obturador inflable. En este ejemplo se coloca un obturador anular externo a la tubería de inyección. En la fase (1) el obturador se infla con taladrina hasta cortar el flujo de agua surgiente por la tubería de revestimiento. Después se comienza con la inyección de cemento. El agua sobrante es desplazada dentro de la zona productiva. Se espera hasta conseguir un fraguado parcial y en la fase (2) se desinfla el obturador, se sube la tubería hasta dejarla por encima del techo de la capa productiva y se reanuda la inyección con el obturador desinflado. De esta forma se desaloja el agua residual por la boca del pozo y se completa el llenado. Retirando, por último, el resto de la tubería. Fuente: los autores.

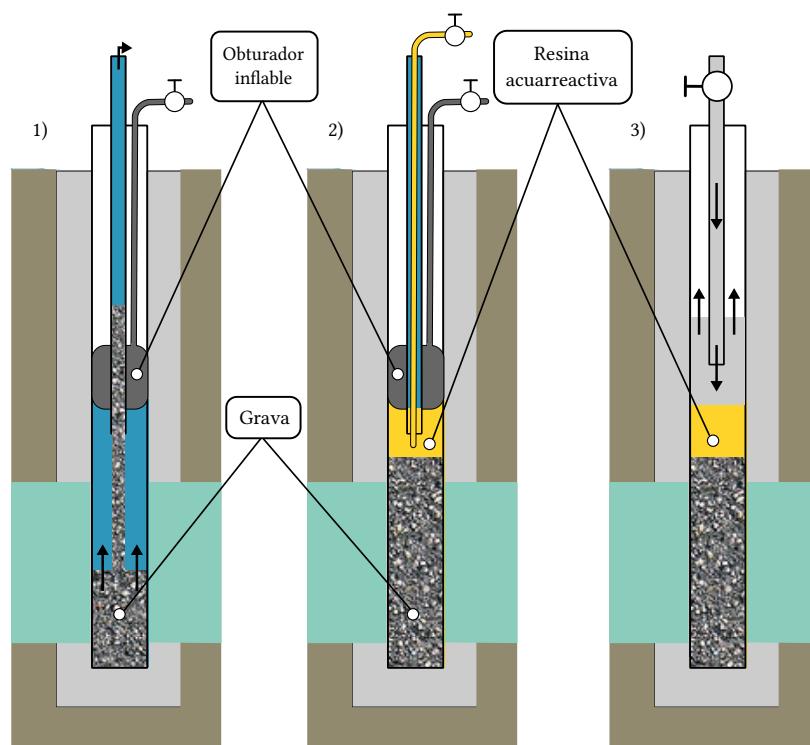


Figura 6.5: Ejemplo de sellado de un pozo artesiano surgiente mediante: engrillado, resina acuarreactiva e inyección de mortero de cemento. En este caso se siguen tres fases: (1) primero se coloca un obturador anular externo a la tubería de inyección. El obturador se infla con taladrina hasta cortar el flujo de agua surgiente. Así, solamente sale agua por la tubería de inyección. Después se comienza el llenado de la zona de producción con grava por gravedad. El agua sobrante sale por la tubería de inyección a contracorriente con respecto a la grava. En la siguiente fase (2), con el obturador hinchado, se introduce un tubo capilar a través de la tubería del obturador hasta llegar a la grava y se comienza a inyectar resina. En segundos deja de salir agua por la tubería. Se desinfla el obturador y se desinstala el sistema. Por último, en la tercera fase (3) se rellena el hueco que queda con lechada de cemento o mortero, desde el fondo. Desplazándose, por flotación, los restos que pudieran quedar. Fuente: los autores.

Esta mezcla fragua instantáneamente por lo cual no sería posible un bombeado de la mezcla. La solución es el bombeo por separado de ambos productos puros por dos tuberías independientes. Si se juntan ambas boquillas los líquidos se mezclan a la salida fraguando y creando un tapón que obtura de manera permanente la capa de grava del acuífero.

El procedimiento se puede llevar a cabo empleando dos tubos de plástico fino unidos en su extremo. Se introducen por la tubería de inyección, que en ese momento es la salida del agua surgente del pozo a sellar, una vez llenado con grava. Se comienza a bombear los dos líquidos a la vez y en pocos segundos, el agua dejará de fluir por la tubería al haberse formado un tapón en el fondo.

Una vez retirado el obturador y las tuberías auxiliares, se procede a terminar el cementado rellenando el sondeo desde el fondo, como en el caso de un pozo no artesiano.

No obstante, en estos casos se suelen emplean siempre aditivos como superplastificantes, acelerantes e impermeabilizantes. Las propiedades finales del mortero dependen de la dosificación de los aditivos. Por otra parte, en ocasiones se emplea materia de carga como arenas o gravas.

Nunca se debe olvidar que debe ser material inerte. Un ejemplo de ello es la imposibilidad de añadir serrín o derivados celulósicos. Si bien, estos materiales se usan con frecuencia como carga en mortero inyectado para el control de vías de aguas, en obras bajo nivel freático. El proceso de sellado definitivo de un pozo no admite esta posibilidad, para evitar la contaminación del acuífero.

Por este motivo, si se emplea grava o arena limpia para el llenado parcial del acuífero, es recomendable siempre esterilizar los áridos antes de inyectarlos. Para ello se emplea lejía, al igual que en los procesos de higienización.

Estas son algunas de las técnicas más usadas, pero depende de la geología o de las características del sondeo. No existiendo una única solución para un problema dado.



Bibliografía

Referencias por orden de citado.

- [1] Jefatura del Estado. Gobierno de España. *Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Legislación Consolidada*. Jul. de 1973. URL: <https://www.boe.es/eli/es/l/1973/07/21/22/con> (vid. págs. 2, 15).
- [2] M.J. Kirkby R.P.C. Morgan, ed. *Erosión de suelos*. 1ª ed. México D.F., México: Limusa S.A., 1984, pág. 375. ISBN: 968-18-1699-4 (vid. pág. 3).
- [3] Juan José Ibáñez. *Erosión del Suelo por Sufusión Piping o Tubificación - Un Universo invisible bajo nuestros pies*. URL: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/07/30/142877> (vid. pág. 3).
- [4] E. Verachtert et al. «Soil loss rates due to piping erosion». En: *Earth Surface Processes and Landforms* 36.13 (13 oct. de 2011), págs. 1715-1725. doi: [10.1002/esp.2186](https://doi.org/10.1002/esp.2186) (vid. pág. 3).
- [5] Environment Canterbury Regional Council, ed. *Tunnel gully erosion control Where do tunnel gullies occur? How do tunnel gullies form?* Jul. de 2001. URL: <https://ecan.govt.nz/advice/your-business/farming/Pages/tunnel-gully-erosion-control.aspx> (vid. pág. 3).
- [6] Josh Williams. *California Flora Nursery - Juncus effusus*. URL: <https://www.calfloranursery.com/plants/juncus-effusus> (vid. pág. 4).
- [7] Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Gobierno de España. *Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Legislación Consolidada*. Abr. de 1986. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1986/04/11/849/con> (vid. págs. 6, 15).
- [8] Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de España. *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, de Aguas. Legislación Consolidada*. Jul. de 2001. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rdlg/2001/07/20/1/con> (vid. págs. 6, 10, 14, 15).
- [9] Alfredo Barón Pérez. «Construcción y clausura de pozos para extracción de agua subterránea: Técnicas comparadas y gobernanza». En: *IX CURSO HISPANOAMERICANO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA*. Propuesta del Grupo Español de la IAH sobre Normas para la construcción y clausura de pozos. OEA. Montevideo, Uruguay, dic. de 2016 (vid. págs. 8, 13, 30, 32, 34, 36, 41, 44, 46, 47).
- [10] AENOR. *UNE 157001:2014 Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico*. URL: <https://tienda.aenor.com/norma-une-157001-2014-n0052985> (vid. pág. 11).
- [11] Ministerio de la Presidencia. Gobierno de España. *Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, Sistema Geodésico. Legislación Consolidada*. Ago. de 2007. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/27/1071/con> (vid. pág. 13).
- [12] Ministerio de Industria y Energía. Gobierno de España. *Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería. Legislación Consolidada*. Ene. de 1979. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1978/08/25/2857/con> (vid. pág. 15).
- [13] Ministerio de Industria y Energía. Gobierno de España. *Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. Legislación Consolidada*. Jul. de 1985. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1985/04/02/863/con> (vid. pág. 15).
- [14] Ministerio de la Presidencia. Gobierno de España. *Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, de aguas minerales y de manantial. Legislación Consolidada*. Jul. de 2010. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2010/12/30/1798/con> (vid. pág. 15).
- [15] Comunidad Autónoma de Galicia. *Ley 3/2008, de 23 de mayo, de ordenación de la minería de Galicia. Legislación Consolidada*. Mayo de 2008. URL: <https://www.boe.es/eli/es-ga/l/2008/05/23/3/con> (vid. pág. 16).

- [16] Comunidad Autónoma de Galicia. *Ley 3/2008, de 23 de mayo, de ordenación de la minería de Galicia*. Mayo de 2008. URL: https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2008/20080606/Anuncio26DC6_es.pdf (vid. pág. 16).
- [17] Juan Herrera Herbert y Jorge Castilla Gómez. *Utilización de técnicas de sondeos en captaciones de agua*. Ed. por Juan Herrera Herbert. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, mar. de 2012, pág. 214. doi: [10.20868/UPM.book.10518](https://doi.org/10.20868/UPM.book.10518) (vid. págs. 22, 35, 46).
- [18] Víctor Yepes Piqueras. *El sistema de perforación OD*. Nov. de 2015. URL: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/11/06/el-sistema-de-perforacion-od/> (vid. pág. 27).
- [19] Víctor Yepes Piqueras. *Sistema de perforación ODEX*. Nov. de 2015. URL: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/11/09/sistema-de-perforacion-odex/> (vid. pág. 27).
- [20] Alberto Benítez. *Captación de aguas subterráneas. Nuevos métodos de prospección y cálculo de caudales*. 2^a ed. Madrid, España: Editorial Dossat, S.A., jun. de 1972, pág. 619 (vid. págs. 31, 49-51).
- [21] W. C. Walton. *Groundwater resource evaluation*. New York, USA: McGraw-Hill, 1970, pág. 664 (vid. págs. 31, 32).
- [22] Ministerio de la Presidencia. Gobierno de España. *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. Jul. de 2007. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/20/1027/con> (vid. pág. 47).
- [23] Aliaxis company. *Tuberías de Polietileno (PE)*. 2016. URL: <https://www.aliaxis.es/website/aliaxis-es/downloads/flexipol/masa-tubo-agua-push-fast-cables-tarifa-2018.pdf> (vid. pág. 53).
- [24] Grupo Hidráulica. *Tipos de unión de tuberías más eficientes en conducción de fluidos*. Jul. de 2022. URL: <https://grupohidraulica.com/noticias/2022/07/27/tipos-union-de-tuberias-mas-eficientes-conduccion-de-fluidos/> (vid. pág. 53).
- [25] DNBRida. *Brida Loca y Aro cuello DIN-2673 PN-10*. 2024. URL: <https://www.dnbrida.com/brida-loca-aro-cuello-din-2673-pn10.php> (vid. pág. 53).
- [26] Administrativando abogados. *¿Cómo sellar un pozo de agua?* - Administrativando abogados. Mar. de 2023. URL: <https://administrativando.es/como-sellar-un-pozo-de-agua/> (vid. pág. 60).
- [27] Manuel Bustillo Revuelta et al. *Manual de Sondeos. Aplicaciones*. Ed. por Carlos López Jimeno. Madrid, España: ETSI de Minas - Universidad Politécnica de Madrid, 2001, pág. 407. ISBN: 8493129232.
- [28] Carlos López Jimeno et al. *Manual de sondeos. Volumen I Técnología de Perforación*. Ed. por Carlos López Jimeno. Madrid, España: ETSI de Minas - Universidad Politécnica de Madrid, 2006, pág. 699. ISBN: 8496140180.
- [29] P.P. Kliméntov y V.M. Kónonov. *Metodología de las investigaciones hidrogeológicas*. 1^a ed. Moscú, URSS: Mir, 1982, pág. 448.
- [30] L. Mijailov. *Hidrogeología*. 1^a ed. Moscú, URSS: Mir, 1989, pág. 288. ISBN: 5-03-000661-3.
- [31] María del Milagro Escribano Bombín, Carmen Mataix González y Carlos López Jimeno. *Manual de aspectos ambientales de los túneles*. 1^a ed. Madrid, España: ETSI de Minas y Energía - Universidad Politécnica de Madrid, 2015, pág. 302. ISBN: 978-84-96140-53-0.
- [32] Cortes Generales. Gobierno de España. *Constitución Española. Legislación Consolidada*. Dic. de 1978. URL: [https://www.boe.es/eli/es/c/1978/12/27/\(1\)/con](https://www.boe.es/eli/es/c/1978/12/27/(1)/con).
- [33] GMD - Xiamen Good Mining y Drilling Equipment Company. *Broca de botón de rosca, consumibles de martillo superior, proveedores y fabricantes de brocas Dth y fábrica - Xiamen Good Mining and Drilling Equipment Co., Ltd.* URL: <https://www.win-win-drill.com/>.
- [34] Epiroc. *ODEX / Epiroc*. URL: <https://www.epiroc.com/es-es/products/rock-drilling-tools/geotechnical-drilling-tools/casing-advancement-systems/odex>.
- [35] Kevin M. Hiscock y Victor F. Bense. *Hydrogeology. Principles and Practice*. 2^a ed. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Blackwell Science Ltd., 2014, pág. 564. ISBN: 978-0-470-65662-4.

- [36] F. Anguita et al., eds. *Curso internacional de hidrogeología subterránea. Hidrogeología, estado actual y prospectiva*. Barcelona, España: Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería, 1991, pág. 453.
- [37] Office of Legislative Counsel. B.C. GROUNDWATER PROTECTION REGULATION. Mayo de 2023. URL: https://www.bclaws.gov.bc.ca/civix/document/id/crbc/crbc/39_2016.
- [38] Scottish Environment Protection Agency - SEPA. *Good practice for decommissioning redundant boreholes and wells*. 2005. URL: <https://www.sepa.org.uk/media/34618/decommissioning-redundant-boreholes-and-wells.pdf>.
- [39] ASTM. *D5299/D5299M Standard Guide for Decommissioning of Groundwater Wells, Vadose Zone Monitoring Devices, Boreholes, and Other Devices for Environmental Activities*. Dic. de 2018. URL: https://www.astm.org/d5299_d5299m-18.html.
- [40] ZBC. *Resina sellado de pozos*. URL: <https://zbc.es/blog/resina-para-sellado-de-pozos-metodo-rapido-y-economico>.

Esta página está en blanco intencionalmente.

Lista de acrónimos

A

AWWA *American Water Works Association.* 8, 32, 40

B

BOE *Boletín Oficial del Estado.* 14–16

D

DOG *Diario Oficial de Galicia.* 16

I

IGME *Instituto Geológico y Minero de España.* 5

ITC *Instrucciones Técnicas Complementarias.* 14

P

PE *PoliEtileno.* 49

PVC *PoliVinyl Chloride* - Cloruro de polivinilo. 28–31, 49, 57

R

RITE *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.* 45

U

UE *Unión Europea.* 40

UNE *Una Norma Española.* 11, 15

UTM *Universal Transverse Mercator.* 13



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE MINAS
Y ENERGÍA