

Centrales subterráneas españolas

Por GREGORIO VALERO BERMEJO
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Las centrales subterráneas que se encuentran hoy en explotación en España totalizan una potencia de 617.700 KVA., que representa el 12 por 100 de la potencia hidroeléctrica del país. Cuando se pongan en servicio las grandes instalaciones de este tipo, actualmente en construcción (Aldeadávila, Bao-Puente Bibey, Belesar, Miranda y Sau), el 30 por 100 de la potencia hidroeléctrica española estará instalada bajo tierra.

Por su potencia y por su número, nuestras realizaciones ocupan un lugar importante entre las centrales subterráneas mundiales.

Centrales subterráneas de más de 200 MW.
de potencia.

CENTRAL	País	Potencia MW
Bersimis	Canadá,	1 050
Kemano	Canadá,	835
Aldeadávila	España.	720
Cubatao	Brasil.	465
Harspranget	Suecia.	380
Stornorrforss	Suecia.	375
Nilo Pecanha	Brasil.	355
Bao-Puente Bibey	España.	328
T-1 Snowy Mountains	Australia.	320
Santa Massenza	Italia.	302
T-2 Snowy Mountains	Australia.	280
Somplago	Italia.	275
Soverzene	Italia.	220
Belesar	España.	215
Innertkirchen	Suiza.	210
San Giacomo	Italia.	200
Harrsele	Suecia.	200

A la vista de lo anterior, creemos que puede afirmarse que España se encuentra plenamente incorporada al movimiento de desarrollo de este tipo de instalación, que se observa hoy en todo el mundo, mediante el cual, al liberarse el técnico de la topografía, cobra un nuevo grado de libertad para proyectar..., siempre que la geología, en cuyo reino se adentra, se lo consienta.

En el adjunto cuadro se resumen algunas características de los saltos españoles con central subterránea, clasificados según sus esquemas.

¿Podemos abstraer alguna característica típica de nuestras realizaciones? Veámoslo, pasándoles revista.

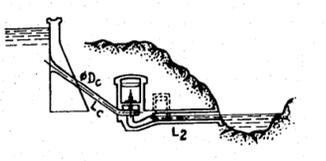
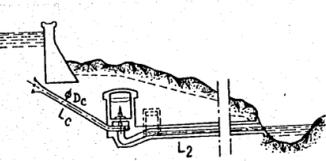
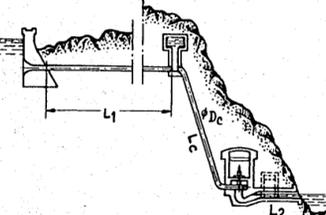
Esquema del salto.

En cierto modo, puede considerarse como típica la variedad de los esquemas de los saltos españoles con central subterránea. Tenemos centrales de cada uno de los esquemas posibles, consecuencia de las variadas características geo-morfológicas de nuestro suelo. El esquema II-B (tipo Innertkirchen), correspondiente a saltos de gran altura con problemas en la conducción forzada, es el más repetido. Le sigue el I, que es el esquema de los saltos al pie de grandes presas, construídas en angostas cerradas, en ríos caudalosos. Podríamos tal vez reivindicar este tipo como tipo español, ya que a él corresponden varias realizaciones nuestras, importantes a escala mundial (Aldeadávila, Belesar, Canelles y Escales), siendo por otra parte poco frecuentes fuera de España. Finalmente, tenemos dos centrales subálveas del esquema II-A (tipo sueco), con el que la concentración de potencia se logra soslayando los inconvenientes que se presentan para el esquema clásico de conducción, con central en el extremo inferior del tramo. Estas dos centrales están alimentadas por hiperembalses construídos para riegos, donde el nivel de aguas arriba varía ampliamente en largos períodos, lo que determina, por un lado, la conveniencia técnica de incorporar un desnivel constante del tramo de río subsiguiente, para reducir la variación relativa del salto. Y, por otro, la económica de evitar la costosa chimenea de equilibrio a que da lugar la referida variación de nivel.

Razones del diseño subterráneo.

Puede observarse cómo las razones que han dado lugar al diseño subterráneo de nuestras centrales son puramente técnicas y, en términos generales, análogas dentro de cada esquema; que falta por completo la motivación de protección del paisaje y la de las condiciones climáticas para la ejecución del trabajo, que han privado en algunos proyectos extranjeros; y que la defensa contra acciones bélicas aéreas no ha figurado en ningún caso como razón decisoria, y solamente en uno (Caldas), como razón adjetiva. Esto último es completamente normal, ya que sería ilusorio pretender una ventaja

CARACTERISTICAS DE LAS CENTRALES SUBTERRANEAS ESPAÑOLAS EN EXPLOTACION O EN CONSTRUCCION

ESQUEMA DEL SALTO	CENTRAL	PROPIETARIO	Fecha puesta en servicio	Razones del diseño subterráneo	Salto bruto	Potencia total y número de grupos — KVA.	CAZ	S O C A Z	A C C E S O	Subestación de transformación	Forma y dimensiones caverna central — Metros	Total excavaciones subterráneas — m. ³	TERRENO
I. Saltos sin conducción.													
<p>Se incluyen en este grupo aquellos saltos en que no se dispone una conducción para aumentar apreciablemente el salto de pie de presa.</p> 	Escalles.	ENHER.	1955	Falta de espacio para disponer la central en la superficie a causa de la estrechez del cauce.	117,50	45.000 (3)	Conducción forzada con blindaje metálico. $L_c = 107,40$ m. $D_c = 3,30$ m. Válvulas en la caverna principal.	Túnel en superficie libre. $L_2 = 515$ m.	Galería inclinada, 5,5 %, 172,4 m.	Transformadores en caverna separada. Salida de la energía por cables, por la galería especial.	Rectangular, abovedada, 31 X 12 X 16.	65.000	Caliza cretácica.
	Cánelles.	ENHER.	1959	Falta de espacio para disponer la central en la superficie a causa de la estrechez del cauce.	135,60	120.000 (3)	Conducción forzada con blindaje metálico. $L_c = 140,70$ m. $D_c = 4,00$ m. Válvulas en la caverna principal.	Túnel bajo carga. $L_2 = 157,70$ m.	Galería horizontal, 30,20 m.	Transformadores en caverna separada. Salida de la energía por galerías separadas.	Rectangular, abovedada, 56,5 X 16 X 39.	222.900	Caliza cretácica turonense.
	Aldedadávila.	Iberduero.	En montaje.	Falta de espacio para disponer la central en la superficie del cauce, y además, la carrera de más de 30 m. del nivel del río en avenidas, que hubiera obligado a una costosa protección de la central en la superficie. Se ganan 13,50 m. de salto.	139,50	756.000 (6)	Seis conducciones forzadas ϕ 5 a 4 m. con blindaje metálico. Sin válvulas. $L_c = 184$ m.	Chimenea de equilibrio. Dos túneles bajo carga. $L_2 = 495$ y 527 m. Sección, 136,7 m. ²	Galería inclinada, de 650 m.	Transformadores en caverna separada. Aparellaje exterior. Salida por cables en pozo de 320 m.	Rectangular, abovedada, 139 X 18 X 20,50.	497.800	Granito compacto.
	Belesar.	FENOSA.	Terminada excavación.	Falta de espacio para disponer la central en la superficie a causa de la estrechez del cauce. Se ganan 13,50 metros de salto.	138,50	264.000 (3)	Tres conducciones forzadas, ϕ 4 m., con blindaje metálico. $L_c = 160$ m. Válvulas en la caverna principal.	Túnel en superficie libre. $L_2 = 1.161$ m. Sección, 85 m. ²	Galería inclinada, de 216 m.	Exterior. Salida de energía por cables en pozo de 130 m.	Rectangular, abovedada, 49 X 17,50 X 20,50.	183.600	Granito compacto.
II. Saltos con conducción.													
II-A. Central aguas arriba.													
	Tranco de Beas.	Sevillana.	1953	Concentración, potencia y economía respecto a solución largo túnel a presión y gran chimenea de equilibrio.	111,50	49.750 (3)	Conducción forzada ϕ 3,40, con blindaje metálico. $L_c = 284$ m. Válvulas en la caverna principal.	Chimenea de equilibrio. Túnel de funcionamiento hidráulico mixto. $L_2 = 3.104$ m. Sección, 20,5 m. ²	Pozo vertical de 30 metros.	Exterior. Salida de la energía por pletina desnuda, por el pozo de acceso.	Rectangular, abovedada, 54,85 X 13,9 X 14.	129.615	Calizas y margas del lias inferior, infra-lías y trias. Intercalaciones yesíferas en el socaz.
	Sau.	Hidroeléctrica de Cataluña.	Terminada excavación.	Concentración, potencia y economía respecto a solución largo túnel a presión y gran chimenea de equilibrio.	97,04	70.000 (2)	Dos conducciones forzadas, ϕ 3,7 m., con blindaje metálico. $L_c = 94,42$ m. Sin válvulas.	Chimenea de equilibrio. Túnel bajo carga, $L_2 = 1.900$ m. Sección, 42 m. ² , ovoide.	Pozo vertical de 63 metros.	Exterior. Salida de la energía por cables en el pozo de acceso.	Rectangular, abovedada, 13 X 19 X 22.	100.000	Cristalino granitoide.
II-B. Central aguas abajo.													
	Barasona.	Hidro Nitro Española.	1949	Estrechez del cauce en el lugar, obligado, de restitución de las aguas.	69,00	26.000 (2)	Galería a presión. Chimenea de equilibrio; conducción forzada. $L_1 = 1.891$ m.	Desagüe directo a un canal de riegos.	Galería horizontal, 50 m.	Exterior.	Rectangular, abovedada, 45 X 12 X 16.	50.000	Caliza cretácica.
	Sta. Marina.	Hidroeléctrica de Galicia.	1958	Economía en la conducción forzada.	85,42	24.000 (2)	Canal en superficie libre, conducción forzada en pozo blindado. $L_1 = 12.000$ m. $L_c = 85$ m. ϕ 3,40 Válvulas en la caverna principal.	Túnel de funcionamiento hidráulico mixto. $L_2 = 360$ m. Sección, 14,2 m. ²	Galería inclinada, 9 %, 152 m.	Exterior. Salida de energía por pletinas en la galería de acceso.	Cilíndrica, 50 X ϕ 16,50.	23.400	Pizarras paleozoicas.
	Puente de Montañana.	ENHER.	1958	Economía en la conducción forzada.	179,75	56.000 (2)	Canal en superficie libre y conducción forzada. $L_1 = 23.500$ m. $L_c = 448,16$ m. D_c de 3,10 a 2,60 m. Válvulas en la caverna principal.	Túnel en superficie libre. $L_2 = 458,26$ m.	Galería inclinada, 7 %, 250 m.	Transformadores en caverna principal. Salida de energía por cables en galería especial.	Ovoidal, 57 X 13,50 X 16,5.	32.000	Moladas oligocenas.
	Caldas.	ENHER.	1958	Defensa de la central contra los aludes de nieve.	483,35	42.400 (2)	Galerías a presión. $L_1 = 9.850$ m. Chimenea de equilibrio y conducción forzada. $L_c = 841$ m. $D_c = 1,642$ a 1,36 m. Válvulas en la caverna principal.	Túnel en superficie libre. $L_2 = 240$ m.	Galería inclinada, 3 %, 230 m. Salida de socorro.	Transformadores en caverna separada. Salida de la energía por cables en galería.	Rectangular, abovedada, 44,60 X 12,50 X 13,60	100.000	Calizas devónicas.
	Zadorra.	Aguas y Saltos del Zadorra.	1957	Economía en la conducción forzada.	329,00	105.000 (2) previsto en 2. ^a etapa.	Galería a presión. Chimenea de equilibrio; conducción forzada. $L_1 = 16.053$ m. $L_c = 540$ m. $\phi_e = 3,1$ a 2,9 Válvulas en caverna separada.	Desagüe en superficie libre. $L_2 = 1.024$ m.	Galería inclinada, 6 %, 756 m.	Transformadores en caverna principal. Aparellaje de alta exterior. Salida de energía por cables en galería especial.	Ovoidal, 90,45 X 17,25 X 16.	754.252	Margas cretácicas albeses. Intercalaciones yesíferas en galería de acceso y de cables.
	S. Agustín.	Moncabril.	1961	Economía en la conducción forzada y falta de espacio por estrechez del cauce para disponer la central en la superficie.	387,00	81.600 (2)	Galería a presión; chimenea de equilibrio, conducción forzada. $L_1 = 7.404$ m. $L_c = 855$ m.; ϕ 2,45 a 2,20 m. Válvulas en caverna principal.	Chimenea de equilibrio. Túnel bajo carga. $L_2 = 1.690$ m. Sección, ϕ 3 m.	Galería inclinada, 6 %, 575 m.	Exterior. Salida de la energía por cable, en pozo de 227 m.	Rectangular, abovedada, 36 X 15,30 X 25.	182.000	Gneis compacto.
	Bao-Puente Bibey.	Salto del Sil.	Excavación avanzada.	Economía en la conducción.	362,00	410.000 (4)	Galería a presión. Chimenea de equilibrio. Conducción forzada. $L_1 = 8.889$ m. $L_c = 371$ m. $\phi_e = 4$ a 3,70 m. Válvulas en la caverna principal.	Desagüe en superficie libre. $L_2 = 1.792$ m.	Galería inclinada.	Exterior. Salida de energía por cables, en pozo de 300 m.	Ovoidal, 81,80 X 17 X 17,50.	406.190	Gneis.
	Miranda.	Hidroeléctrica del Cantábrico.	Excavación avanzada.	Economía en la conducción forzada.	397,00	75.400 (4)	Galería de presión; chimenea de equilibrio y conducción forzada. $L_1 = 617$ m. ϕ_e de 2,5 a 2,2 m. Válvulas en la caverna principal.	Desagüe en superficie libre. $L_2 = 2.600$ m.	Galería inclinada, 11 %, 300 m.	Exterior. Salida por cables en la galería de acceso.	Ovoidal, 68 X 15 X 18.	252.400	Cuarcita ordoviciense.

en tal sentido en la mayor parte de nuestras instalaciones, en las que, por lo menos, una pieza fundamental, como es la presa, es inevitablemente vulnerable a los actuales medios de destrucción.

Conducciones.

Ninguna característica especial encontramos en las conducciones de nuestras centrales subterráneas, en las que se han empleado los diseños y dispositivos en uso fuera de España.

Nos vamos a referir exclusivamente a la conducción forzada en galería con blindaje metálico, que puede decirse que es el único elemento típico del diseño subterráneo, en lo que se refiere a la conducción. La determinación de la capacidad de colaboración del terreno con el blindaje, para la resistencia a la presión interior del agua, se lleva a cabo, normalmente, mediante reconocimientos geofísicos aplicados a la galería una vez abierta. Se determinan de esta forma, no sólo las constantes elásticas previas del macizo rocoso (módulo de Young y coeficiente de Poisson), sino también las de la zona alterada por la perforación y zonas anormales próximas, que quedan además definidas en posición y espesor. Los blindajes se han proyectado con estos datos, obteniéndose frecuentemente importantes economías por la reducción del "coeficiente de ignorancia" que había de aplicarse para obtener la seguridad necesaria empleando métodos empíricos de cálculo. Se han podido recetar además tratamientos, locales o generales, de inyecciones, o de empernado, cuando por ellos era obtenible una regeneración de la zona alterada o anormal. Las cargas virtuales de trabajo del blindaje, suponiendo que la colaboración de la roca fuera nula, han alcanzado así en el Salto de Miranda el límite elástico; en Caldas, Escuales y Canelles, 2.000 Kg./cm.²; en el Tranco, 1.800 Kg./cm.²; en Aldeadávila, 1.700 Kg./cm.², etcétera.

Como precaución contra el aplastamiento, por presión hidrostática exterior con tubería vacía, se han utilizado normalmente aros de refuerzo soldados por la parte de afuera. En el Tranco se empleó el sistema de anclaje que hoy se denomina de "espina de erizo", y se hormigonó por inyección del árido grueso precolocado (Prepakt). Este método de hormigonado se ha aplicado también en otras conducciones (Escales, Canelles y otras).

En cuanto a la disposición de las válvulas de los grupos, solamente en Zadorra se ha tomado la medida de seguridad de llevarla a cabo en una caverna separada. En las demás centrales las válvulas quedan dentro de la caverna principal. En Aldeadávila y Sau, en que hay una conducción por grupo, se ha prescindido de estas válvulas.

En el socaz o parte de la conducción situada

aguas abajo de la central, se ha utilizado el desagüe en superficie libre, cuando ha sido posible. La gran carrera del nivel del agua en el punto de desagüe, ha llevado a la solución de túnel de carga con chimenea de equilibrio en origen, en algunos casos. En otros se ha adoptado el régimen mixto. Así, en el Tranco, funciona normalmente en superficie libre, poniéndose en carga cuando el río, en el punto de desagüe, lleva un caudal superior a un determinado valor, vertido por el aliviadero del embalse. Este valor de transición de régimen produce unos fenómenos de inestabilidad que deben ser evitados, lo que se consigue controlando el caudal por medio de las alzas del aliviadero. En el Salto de Santa Marina el socaz se pone en carga al rebasar el agua determinado nivel del embalse de Bárcena donde descarga, pudiendo llegar a producirse una contrapresión de 7 m.

Acceso a la central.

El acceso en galería inclinada, con la ventaja que depara la posibilidad de que los vehículos lleguen a la propia central, particularmente para su excavación, ha sido adoptado en todos los casos a excepción de las centrales del tipo II-A, donde tendría un excesivo desarrollo, prefiriéndose por ello el acceso en pozo.

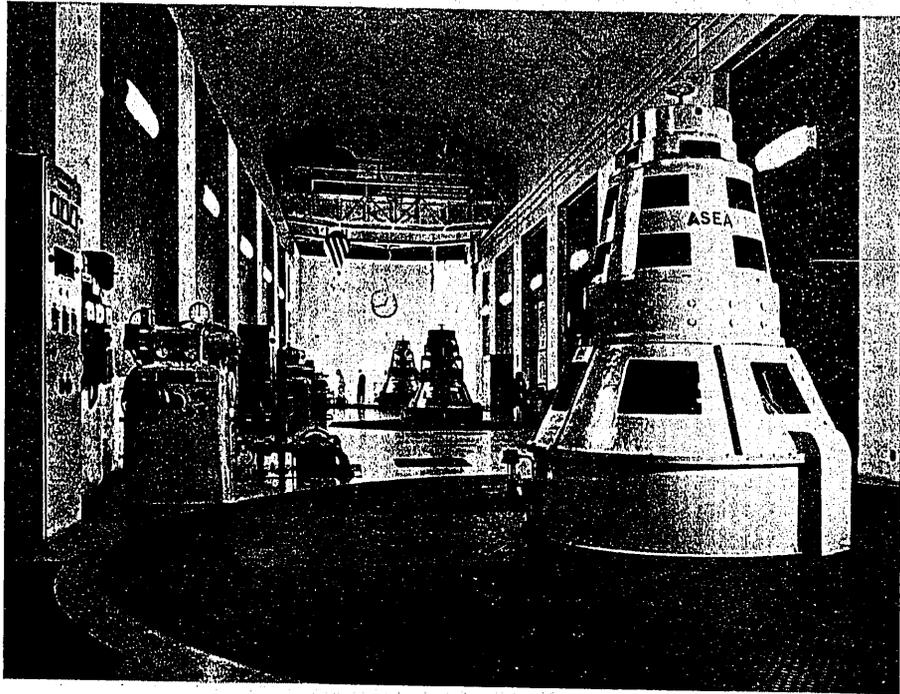
Situación de los transformadores de potencia.

Con relación a la situación de los transformadores, suele preferirse la exterior, siempre que la distancia a los alternadores no pase de unos 250 a 300 m. A partir de esta distancia las pérdidas y la mayor caída inductiva que reduce la prestación capacitiva del generador, aconsejan situar los transformadores en el interior. Naturalmente que esta práctica tiene excepciones, y en España lo son las centrales de ENHER, donde los transformadores van en el interior, aunque las distancias al exterior son inferiores al límite indicado.

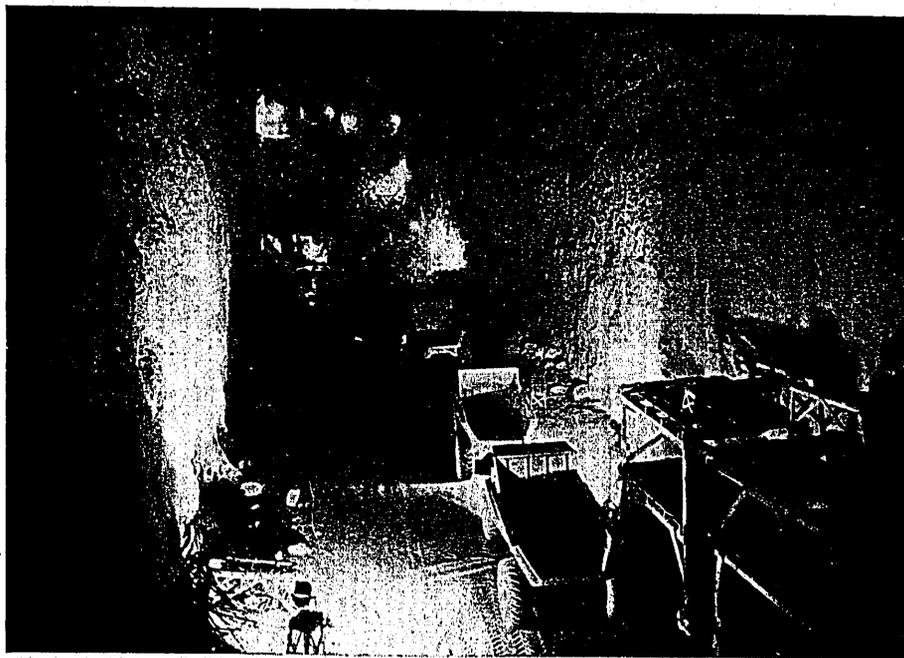
Caverna de la central.

Tampoco encontramos nada característico en el diseño de la caverna de nuestras centrales, que las diferencie de las de otros países.

La forma de la sección transversal es la rectangular abovedada, a excepción de Puente de Montañana y Zadorra, donde es ovoidal, y Santa Marina, donde es circular. En las dos primeras, para resistir mejor el empuje de la roca, que tiene una rigidez moderada (en Zadorra su módulo de elasticidad no excede de 25 Tn./cm.²). En la tercera, para soportar la presión hidrostática del agua, que puede in-



Central del Tranco de Beas.

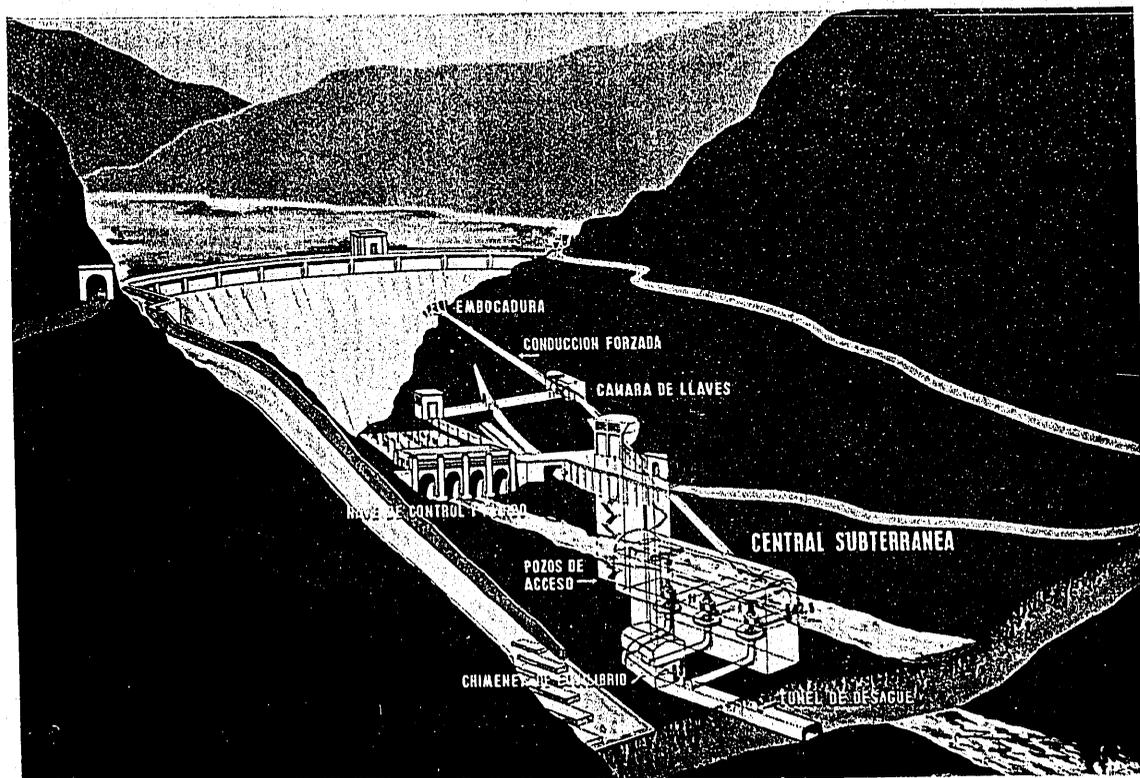


Salto de Aldeadávila: Destroza del cuerpo superior de la central.

filtrarse cuando el nivel del embalse de Bárcena está alto.

La medición de las constantes elásticas del macizo rocoso por métodos geofísicos, como complemento de reconocimientos por sondeos mecánicos o por galería o pozos, con determinación de los sistemas de fracturas, han precedido a la fijación del pun-

geofísico, de esta zona decomprimida, que será en definitiva la que tendrán que soportar los revestimientos, no puede hacerse hasta tanto que la excavación quede totalmente terminada, y no solamente la de la caverna principal, sino también las de las otras cavernas, galerías y conductos próximos. De aquí que no se haya podido utilizar, en general,



Dibujo de conjunto del salto del Tranco de Beas.

to de situación de la central, de la forma de su sección y de su revestimiento interior. En general, y salvo las excepciones arriba señaladas, los módulos de elasticidad de la roca han excedido de 200 toneladas/cm.², habiéndose alcanzado las 510 toneladas/cm.² en Aldeadávila; 500 Tn./cm.² en Belesar; 350 Tn./cm.² en San Agustín; 340 Tn./cm.² en Sau; 200 a 350 Tn./cm.² en Bao-Puente Bibey, y 250 a 280 Tn./cm.² en Canelles.

La orientación del eje de la bóveda se ha dispuesto siempre perpendicular a las horizontales de los estratos o planos principales de diaclasas.

El revestimiento de la bóveda se ha realizado normalmente con una excavación muy estricta, y antes de proseguir el vaciado de la caverna. Se ha utilizado ampliamente el método de empernado de la aureola de roca decomprimida para evitar desprendimientos. La determinación, por reconocimiento

para el proyecto de los revestimientos, los cuales estarán a la sazón construídos en su mayor parte. Sin embargo, sí que ha servido, y mucho, para proyectar las inyecciones con las que en muchos casos se ha regenerado apreciablemente el módulo de elasticidad de la roca alterada.

En el proyecto del Tranco, para limitar los esfuerzos en la roca, se ha excavado la caverna completa solamente hasta el nivel de las excitatrices. Por debajo de este nivel se ha abierto un pozo para cada grupo. Así, pues, y siendo la distancia entre grupos mayor de la estrictamente necesaria, han quedado unos macizos de roca que, con el revestimiento de hormigón de los pozos, han mantenido la estructura del macizo rocoso por debajo del nivel de las excitatrices. La correlativa ampliada separación de los conductos de entrada y salida del agua en las turbinas, da lugar a que los macizos de roca situados entre

ellos sean más potentes. Con el mismo fin se ha alejado la chimenea de equilibrio a la mayor distancia posible de la Central.

Los problemas de infiltración de agua, pueden presentarse especialmente en las centrales del tipo II-A, por tratarse de verdaderas centrales subálveas, donde el río mantiene un nivel freático sobre ellas. Estas filtraciones apenas han producido problemas de agotamiento en nuestras dos centrales de este tipo, lo que, al menos por lo que respecta al Tranco, en roca caliza, ha sido consecuencia de una afortunada circunstancia geológica. Sin embargo, se han tomado medidas para impedir el empuje hidrostático sobre los revestimientos, consistentes en una amplia campaña de impermeabilización por inyecciones, y una vez terminada ésta, en la perforación de drenajes.

El terreno.

Para terminar, hemos de dedicar unas líneas a la geología. Aquella característica de variedad que señalábamos más arriba, se encuentra muy destacadamente en cuanto a la clase de terreno en que están construídas nuestras centrales subterráneas. Además,

basta echar una ojeada a la columna correspondiente del cuadro para deducir que no siempre se ha tenido en cuenta el principio de que sólo puede construirse una central subterránea en roca sana. Principio asimismo vulnerado en otros países europeos.

Y es que este principio será válido en países donde, estando los recursos hidráulicos poco explotados, pueda elegirse. O podrá parecerlo en otros, como los escandinavos, a los que un subsuelo granítico compacto general hace el paraíso de los perforadores de cavernas. Pero en nuestro agotado y seco solar hispano, no nos es lícito rechazar el feliz hallazgo de un esquema técnicamente interesante para un aprovechamiento hidroeléctrico, por razones de catálogo geológico. Nuestra obligación es reconocer el terreno con toda la minuciosidad que se merece, y, si es posible, afrontar sus problemas con los medios que la técnica pone hoy en nuestras manos.

Agradecimiento.

Deseo expresar mi profunda gratitud a los compañeros, proyectistas de las centrales subterráneas españolas, que me han proporcionado los datos que he intentado ordenar en este trabajo.