

# Aplicaciones de la congelación para la construcción de una ataguía de lodos en el embalse de Llauset (\*)

**F. Muzás Labad**

Dr. Ingeniero de Caminos, Cimentaciones Especiales Rodio, S.A.

**J. Gete-Alonso**

Ingeniero de Caminos, Cimentaciones Especiales Rodio, S.A.

## 1.- INTRODUCCIÓN

El Embalse de Llauset forma parte del Complejo Hidroeléctrico reversible denominado Salto de Moralets que la EMPRESA NACIONAL HIDROELÉCTRICA DEL RIBAGORZANA (ENHER) está realizando en la cuenca alta del Noguera Ribagorzana en los Pirineos de Lérida y Huesca.

El Complejo se compone de un embalse superior, a la cota 2.200 m, creado por la Presa de Llauset sobre un afluente del Noguera Ribagorzana aprovechando la cerrada natural que formó en su día el lago del mismo nombre.

La Central subterránea de Moralets, con una potencia de 200 megawatios, se alimentará desde Llauset con un salto útil de 800 m, bombeando el agua en las horas de bajo consumo desde el embalse inferior creado por la Presa de Baserca sobre el Noguera Ribagorzana.

## 2.- ANTECEDENTES

Para proceder a la construcción de la Presa Bóveda de Llauset era necesario excavar los sedimentos de origen glaciar que ocupan el fondo del lago, con una potencia de 20 a 30 metros, y encauzar y desviar las aportaciones naturales del vaso.

Dichos depósitos están constituidos por limos sobresaturados formados principalmente por barro de diatomeas de muy bajas características mecánicas al tener una humedad natural del 90%, siendo el límite líquido del 52%.

Bajo los depósitos aparece la formación rocosa del lago, constituida por pizarras y calco esquistos.

La desviación de las aguas se efectuó mediante un túnel situado en la margen derecha y emboquillado unos 150 m aguas arriba de la presa. Para ello fue preciso crear una plataforma que enlazara ambos márgenes, cuya ejecución se llevó a cabo mediante vertido de escombros sobre los depósitos del lago, provocando la fluxión lateral de los mismos.

---

(\*) Conferencia pronunciada en la Sociedad Española de Mecánica del Suelo el 8 de Marzo de 1982, publicada en 1983 en el Bol. Inf. Lab. Carret. y Geotec. núm. 155 y en el Bol. Soc. Esp. Mec. Suelo y Cim. núm. 61.-

De esta forma, se constituyó una especie de ataguía de los lodos situada a unos 100 m aguas arriba del eje de la presa, con la coronación aproximadamente a la cota 2.130 m, unos 25 m por encima del cuenco de excavación de los cimientos de la presa (Ver Fig. 1, Perfil 1).

La excavación de los lodos se efectuó en talud suave, que hubo que rebajar por acusar síntomas de inestabilidad. Al pie del talud, y para proteger la zona de trabajo, se dispuso un espaldón de escollera de 2,0 m de altura (Ver Fig. 1, Perfil 1).

En septiembre de 1980 se produjo súbitamente el deslizamiento de la ataguía de material vertido, arrastrando los lodos que inundaron el cuenco de la presa y paralizándose los trabajos de cimentación. Como medida urgente se procedió de inmediato al relleno del cuenco hasta la cota 2.115 m, mientras se procedía a estudiar el fenómeno y las medidas a adoptar para poder continuar la obra (Ver Fig. 1, Perfil 2).

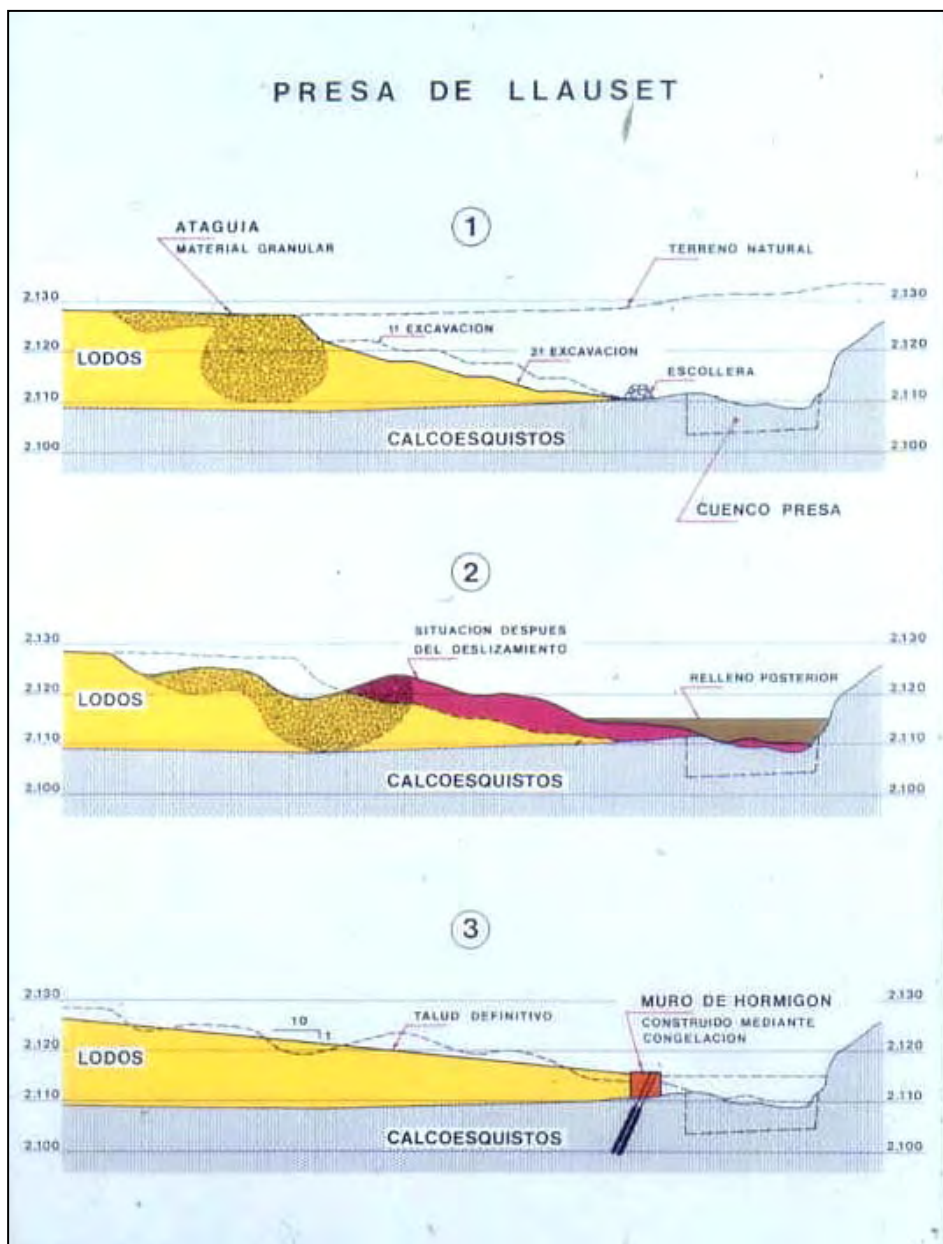


Fig. 1.- Proceso esquemático del accidente ocurrido y solución adoptada

### **3.- POSIBLES SOLUCIONES**

Dado que el talud natural con el que quedaron los lodos después del deslizamiento era del orden de  $10^\circ$  con la horizontal, era claro que había que disminuir este talud para conseguir un cierto coeficiente de seguridad.

Con objeto de reducir el volumen de excavación se planteó la conveniencia de disponer una estructura de contención lo más cercana posible a la cimentación de la futura presa, que habría que construir desde la plataforma creada con el relleno a la cota 2.115 m, con una altura hasta la roca del orden de 6 m. La excavación de los lodos, aguas arriba de la estructura, se proyectó con talud 10:1, y fue preciso, además, alejar la toma del túnel de desvío (Ver Fig. 1. Perfil 3).

Para ejecutar la estructura de contención se contemplaron los siguientes sistemas:

- Pantalla de pilotes, anclada.
- Pantalla continua con contrafuertes, anclada.
- Tablestacado anclado.
- Placas de hormigón ancladas al terreno.
- Muro de gravedad construido al abrigo de recintos de suelo congelado.

Al examinar la viabilidad de los distintos sistemas propuestos se tuvieron en cuenta los aspectos siguientes:

- 1) La zona de implantación coincidía en líneas generales con aquella en la que se había dispuesto el espaldón de escollera, y era muy probable que existieran grandes bolos que podían obstaculizar o impedir la perforación.
- 2) Se formularon reservas respecto a que la excavación de los pilotes o elementos de pantalla pudieran efectuarse al amparo de lodos tixotrópicos, y parecía preferible efectuar las perforaciones con entubación recuperable.
- 3) Había que garantizar un cierre hermético de la estructura, una buena limpieza del fondo de perforación y el adecuado empotramiento de los elementos de la estructura en la roca de fondo.

A la vista de estos factores se optó por la solución de muro de gravedad construido con ayuda de la congelación del terreno, ya que se adaptaba con ventaja a los condicionantes existentes, encajaba mejor en el reducido plazo disponible para su ejecución e incluso resultaba económicamente interesante.

### **4.- CARACTERÍSTICAS DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA**

Como proyecto inicial se planteó la construcción de un muro de gravedad de hormigón en masa de 6 m de altura, constituido por 17 cilindros secantes de 5,80 m de diámetro y separación entre ejes de 4,1 m, de forma que las superficies exteriores se cortaran ortogonalmente.

El conjunto de 17 elementos se distribuyó a lo largo de un arco situado a unos 9 m aguas arriba del cuenco de la presa, disponiendo 9 módulos cilíndricos completos y 8 módulos intermedios.

Para proteger la excavación de estos módulos se realizarían anillos de suelo congelado dispuestos de manera similar a los tablestacados que se utilizan en la construcción de ataguías celulares.

Al iniciarse la obra, y con objeto de activar la construcción de la presa, se planteó la posibilidad de acometer la excavación del cuenco una vez hormigonados los módulos cilíndricos y congelando en los módulos intermedios únicamente el arco correspondiente al paramento de aguas arriba. Para poder seguir este proceso constructivo, hubo que disponer en cada módulo cilíndrico 3 anclajes de 120 Tm, inclinados hacia aguas arriba, y de 20 m de longitud, quedando reducido a la mitad el volumen de hormigón de los módulos intermedios. En la margen izquierda se mantuvo en principio el proyecto inicial por ir situada aquí la rampa de acceso al cuenco.

El proyecto definitivo, una vez iniciada la obra, quedó establecido según se refleja en las figuras 2 y 3 reforzando la congelación en los módulos intermedios como medida adicional de seguridad.

Para el dimensionamiento del muro de suelo congelado se efectuaron los oportunos cálculos de estabilidad, cuyos resultados se resumen en el Cuadro I.

En el Cuadro II se recogen los parámetros térmicos utilizados para estudiar la disposición de sondas y la solución del proceso de congelación, pudiendo observar los resultados en las figuras 4 y 5.

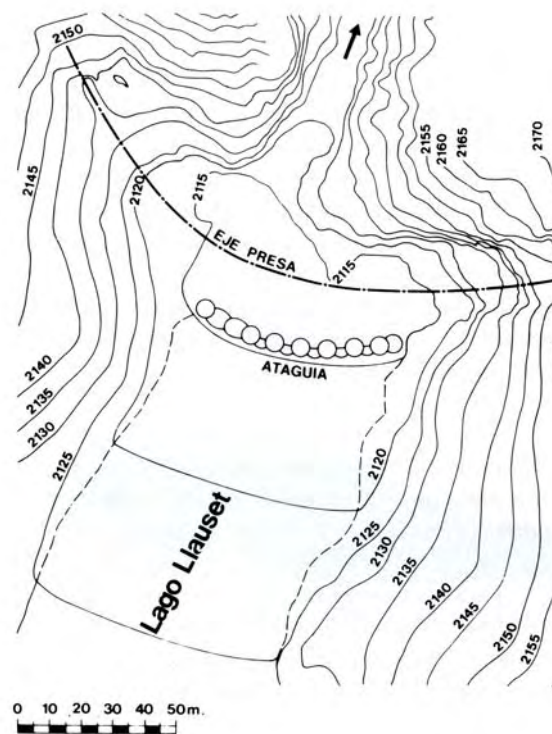


Fig. 2.- Plano de situación de la ataguía

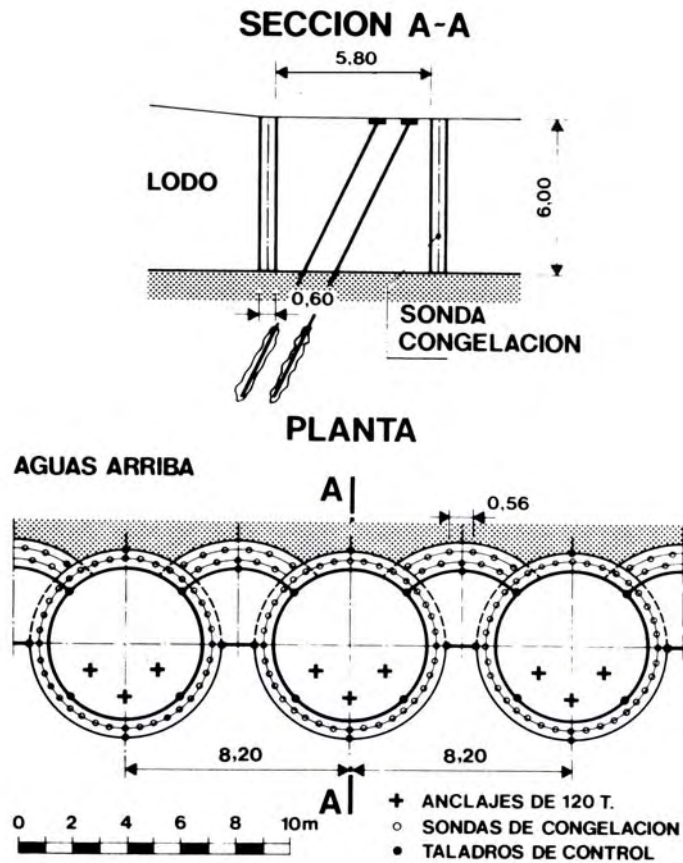


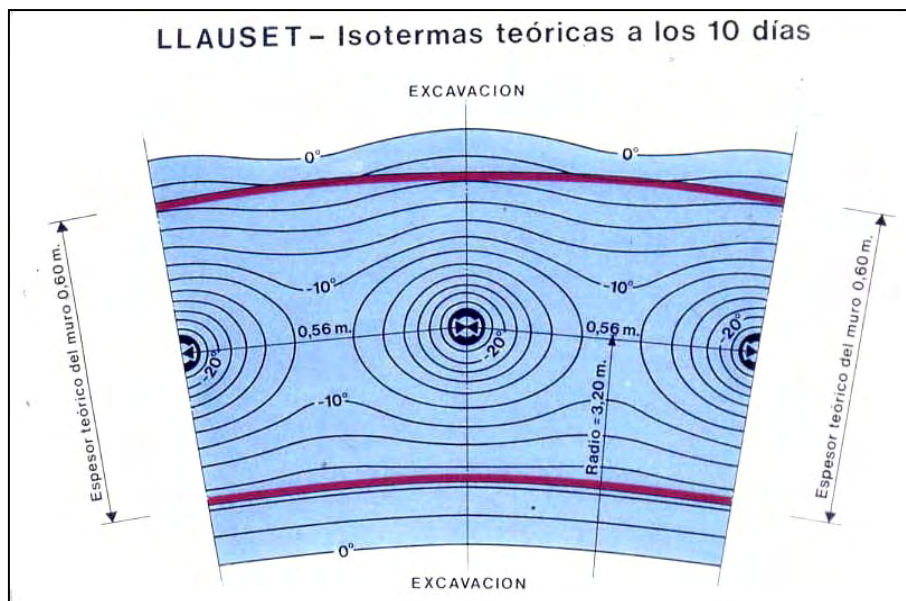
Fig. 3.- Características de la ataguía y de los muros congelados

### CUADRO I

#### RESUMEN

#### CÁLCULOS ESTÁTICOS DEL ANILLO CONGELADO

Radio de excavación	2,9 m.
Espesor	0,6 m.
Radio exterior	3,5 m.
Altura	6,0 m.
Presión exterior máxima	10,7T/m <sup>2</sup>
Tensión máxima	6,8 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a largo plazo del lodo congelado a -5° C	14,0 Kg/cm <sup>2</sup>



**Fig. 4.- Isothermas teóricas a los 10 días**

**CUADRO II**

**PARÁMETROS TÉRMICOS**

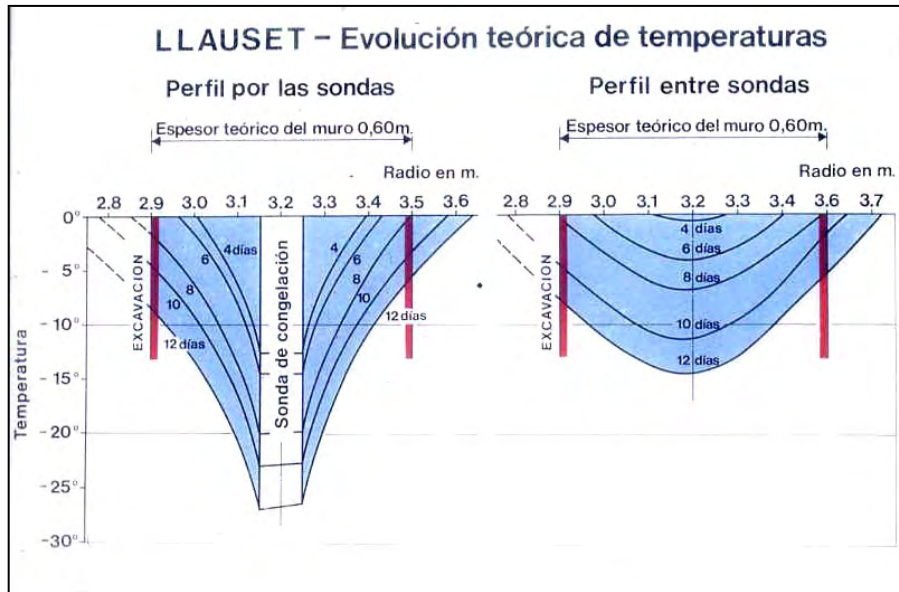
Temperatura inicial	12° C
Peso específico saturado	1,5 T/m <sup>3</sup>
Contenido de agua	730 L/m <sup>3</sup>

	<b>Lodo natural</b>	<b>Lodo congelado</b>
Calor específico	889 Kcal/m <sup>3</sup>	524 Kcal/m <sup>3</sup>
Conductibilidad térmica	0,64 Kcal/m.h.°C	2,08 Kcal/m.h.°C

Régimen de congelación      125 Kcal/m.h.

Propagación del frente congelado alrededor de una sonda:

$$\xi \text{ (cm)} \approx 2\sqrt{T \text{ (horas)}}$$

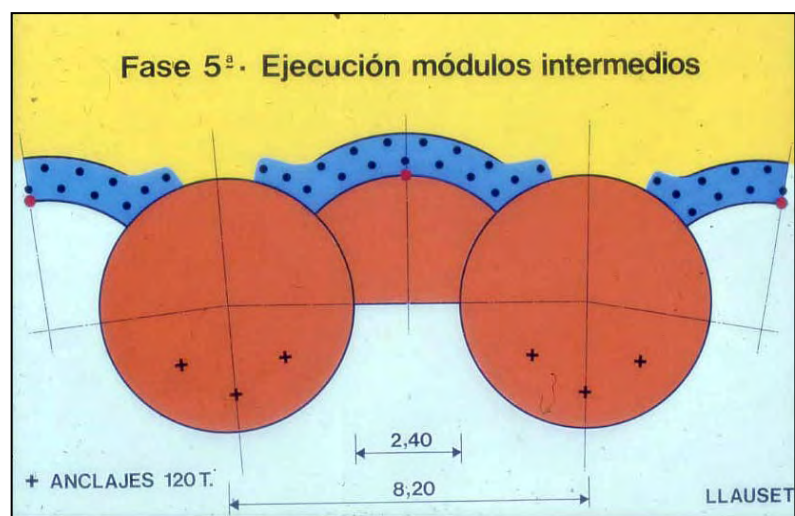
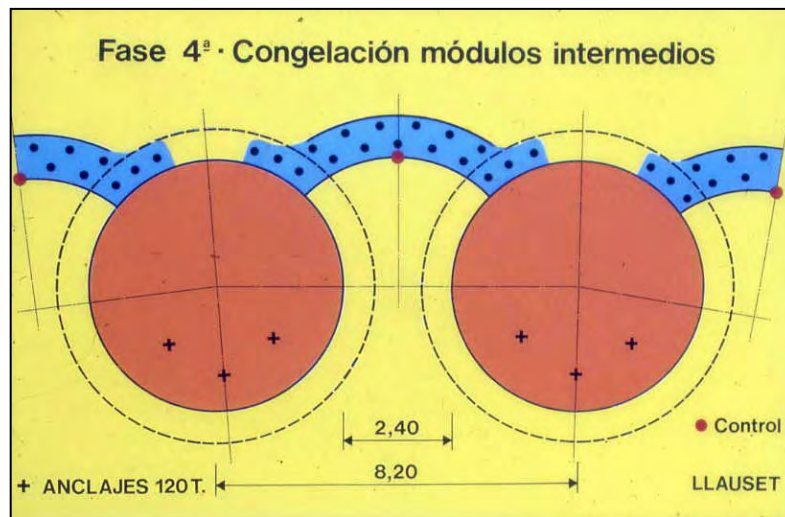
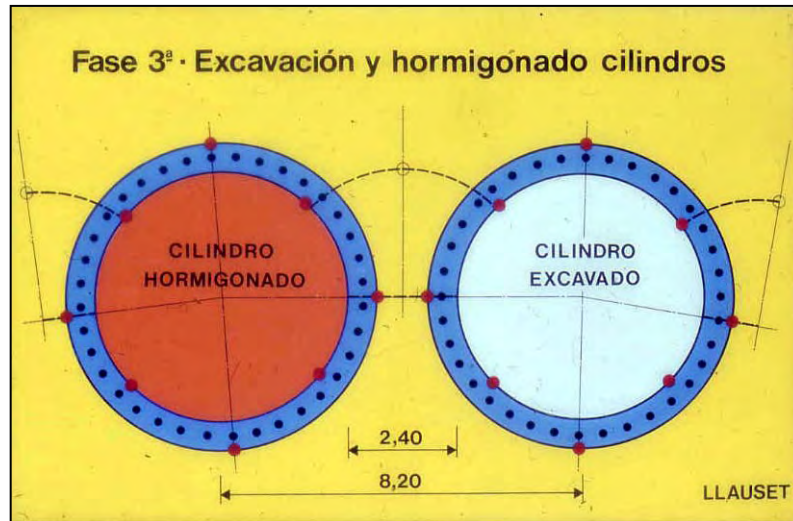


**Fig. 5.-Evolución teórica de temperaturas**

En el proceso constructivo del proyecto definitivo se han distinguido las siguientes fases:

- 1) Inyección previa de una mezcla de bentonita-cemento para recompactar el terreno. Los taladros de inyección se aprovechan posteriormente como sondas de control de temperaturas en los bordes del espesor teórico del muro congelado.
- 2) Congelación de los anillos para proteger la excavación de los módulos cilíndricos, mediante 36 sondas dispuestas en una circunferencia de 3,20 m de radio, con separación de 56 centímetros.
- 3) Excavación y hormigonado de los módulos cilíndricos.
- 4) Congelación de los muros de aguas arriba para proteger la excavación de los módulos intermedios y disposición de anclajes en los módulos cilíndricos ya hormigonados.
- 5) Excavación por delante de la ataguía y hormigonado de los módulos intermedios disponiendo un encofrado frontal apoyado en los cilindros laterales.

En la Fig. 6 se recogen en detalle las tres últimas fases.



**Fig. 6.- Proceso constructivo de la ataguía**



## 5. - EJECUCIÓN DE LA OBRA

Iniciados los trabajos de perforación, en Mayo de 1982, se detectó que la roca de cimentación aparecía, en la margen izquierda, a mayor profundidad de la prevista, según se puede observar en la Fig. 7.

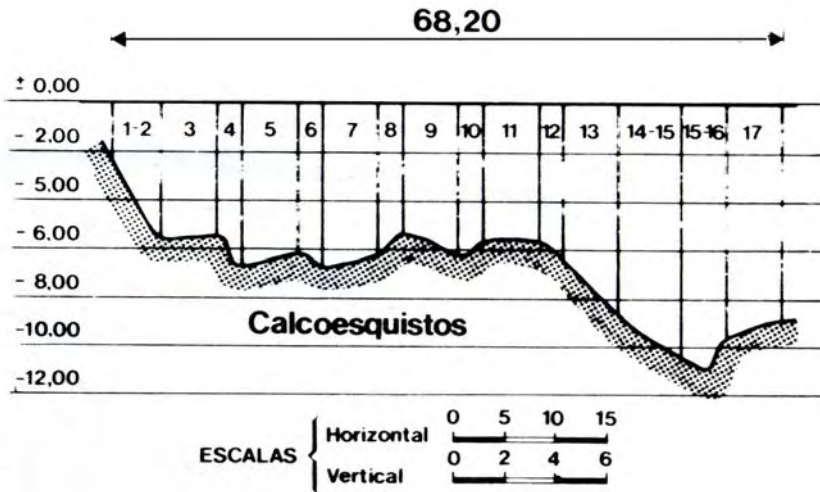


Fig. 7. - Perfil por el eje de la ataguía

Debido a ello y a la ubicación de la rampa de acceso al cuenco, en esta zona se ejecutaron 4 módulos seguidos autoportantes, anclados a la roca con 13 anclajes de 166 Tm y 28 m de longitud.

La perforación para colocación de sondas de congelación se realizó con 2 vagones perforadores, tipo ROC-601, y sistema ODE. En total se perforaron 4.660 m.

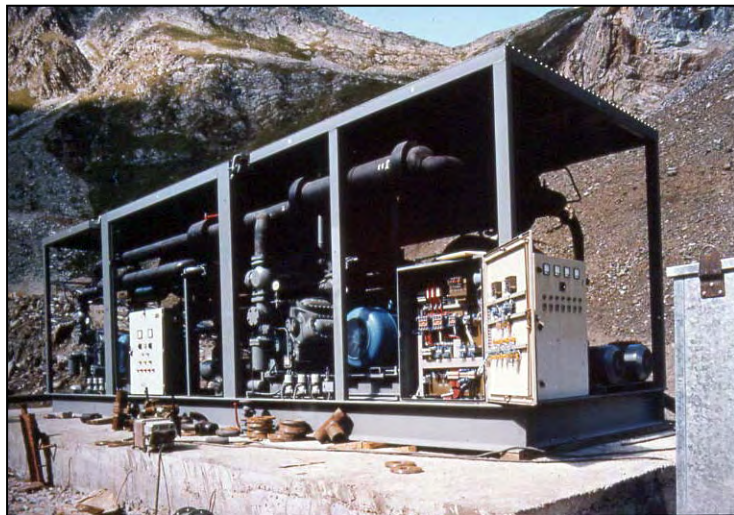


Fig. 8.- Grupo frigorífico de 160.000 Kcal/h

La inyección previa para recompactación del terreno se realizó mediante técnica de tubo-manguito, utilizando una mezcla de cemento-bentonita con dosificación por metro cúbico de 450 kg de cemento y 70 kg de bentonita. En total se inyectaron 710 metros cúbicos de mortero, disponiendo en obra de una central automática de elaboración de las mezclas y 2 equipos de inyección Cosma CIMENTALES.

Para la congelación se instalaron 2 grupos frigoríficos (Fig. 8) con una potencia de 160.000 Kcal/h, cada uno que funcionaron durante 65 días y 37 días respectivamente. Las sondas de congelación tenían un diámetro de 2", a través de las cuales se hizo circular terpeno, como fluido refrigerante, en lugar de la tradicional salmuera, lo que permite trabajar a unos 20° C menos para la misma viscosidad.

En las figuras 9 y 10, pueden verse diversos aspectos de la obra.



**Fig. 9.- Aspecto general del vaso de Llauset**



**Fig. 10.- Trabajos de congelación. Vista desde la margen derecha**

El plazo de congelación de cada módulo, para llegar a temperaturas comprendidas entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $-10^{\circ}\text{C}$ , resultó de 10 a 12 días, valor muy similar al previsto teóricamente. Este plazo se redujo a 8-10 días al entrar en funcionamiento el segundo grupo frigorífico.

La excavación de los cilindros se efectuó con máquina excavadora POCLAIN-90, equipada con martillo rompedor y cucharas excavadora y bivalva (Fig. 11). En total se vertieron 1.520 m<sup>3</sup> de hormigón elaborado en obra en camiones cuba.



**Fig. 11.- Excavación de un módulo cilíndrico con cuchara**

La perforación para los anclajes de los cilindros se realizó, en general, con martillo de fondo, empleándose un vagón perforador tipo STENUICK. En la margen izquierda, al encontrarse la roca alterada superficialmente, fue necesario entubar empleándose un equipo HAUSSER y una WIRTH B-0. En total se ejecutaron 18 anclajes de 120 Tm. y 20 m de longitud, y 13 anclajes de 166 Tm. y 28 m de longitud.

En la Fig. 12 puede observarse un aspecto de la ataguía en fase muy avanzada de construcción.



**Fig. 12.- Vista general de la ataguía en fase avanzada**

## 6.- CONTROL DE TEMPERATURAS

El control de temperaturas se efectuó mediante sensores de temperatura colocados a diversos niveles en los taladros de control previstos en el proyecto en ambas caras del muro teórico de suelo congelado. También se dispusieron sensores de temperatura en el circuito principal de refrigeración y en el circuito interno de los grupos de refrigeración.

Para la supervisión de temperaturas se utilizaron dos sistemas:

- 1) Termómetro digital mediante transductores pasivos PT-100 (platino calibrado) y medidor digital de temperatura PHILIPS-377 con selector "multipoint" de 24 puntos. Este equipo se había utilizado anteriormente en otras obras de congelación.
- 2) Mini ordenador especializado mediante programa en la adquisición, presentación y tratamiento de datos, así como la memorización, tanto de la información recogida como de los parámetros de programación propios de cada caso.

Este equipo desarrollado por CIMENTACIONES ESPECIALES, S.A. y utilizado por primera vez en esta obra, tiene una gran versatilidad y sencillez de manejo, permitiendo una adquisición automática de datos, perfectamente identificados con referencia de la fecha y hora de lectura, y una generación de alarmas preprogramables.

Como sensores de temperatura se utilizaron semi-conductores de silicio, mucho más económicos que los PT-100 de platino, y que junto con un programa de calibración automática proporcionan una buena precisión. Estos sensores, en número de 256 y en grupos de 8, van conectados a unas cajas de pequeño tamaño, en donde se efectúa la conversión analógica-digital de las señales eléctricas de los sensores y la transmisión en serie de la información al ordenador.

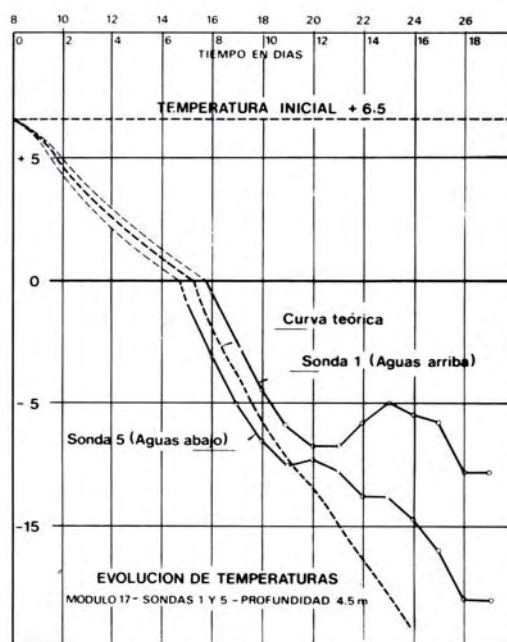


Fig. 13.- Evolución de temperaturas

En la Fig. 13 se ha recogido un ejemplo de la evolución de temperaturas registradas en uno de los módulos, en la que se ha incluido una curva teórica obtenida con los datos de proyecto.

## **7.- COMENTARIOS FINALES**

La construcción de la ataguía de lodos en el Embalse de Llauset creemos constituye un caso francamente interesante de aplicación de la técnica de congelación del terreno.

La tecnología aplicada en esta obra, tanto en lo que respecta a ejecución como proyecto y control, ha sido desarrollada totalmente por CIMENTACIONES ESPECIALES, S.A., y se encuentra bien contrastada en la práctica.

En el momento presente puede afirmarse que la congelación del terreno es una técnica altamente fiable, que permite resolver problemas difíciles y que incluso puede competir económicamente, en ciertos casos, con otras técnicas tradicionales.