

# LA CENTRAL SUBTERRANEA DE PUENTE BIBEY

Por JULIAN FEIJOO MELLE  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Una vez más tenemos la satisfacción de ofrecer a nuestros lectores la descripción de una gran obra, en construcción ya muy avanzada, destacándose la importancia de las instalaciones y el empleo de modernas técnicas, aportándose muy interesantes datos sobre rendimientos en las distintas operaciones.*

El río Bibey, afluente del Sil a su paso por la provincia de Orense, tiene un recorrido tortuoso al pie de las estribaciones de la sierra de Queija, y una fuerte pendiente de cauce, lo que permite enlazar en planta el conjunto presa-central con un recorrido mínimo de 9 Km. y un desnivel de 260 m., incrementado en los 102 m. del remanso que crea la presa de Bao.

## Descripción del salto.

Presenta el aprovechamiento, en su conjunto, la solución tipo para galerías de presión de gran longitud de diámetro.

De la presa de Bao — gravedad, planta recta y 107 m. de altura —, que con una cuenca vertiente de 727 Km.<sup>2</sup> embalsa 238 millones de metros cúbicos, parte una galería de presión de 8.900 m. de longitud y un diámetro interior de 4,80 m., con trazado sensiblemente horizontal, estando prevista para un caudal máximo de 66 m.<sup>3</sup>/seg.

Al final de la misma se encuentra la chimenea de equilibrio y allí tiene también su origen la tubería forzada, igualmente excavada en roca. Esta tubería tiene una pendiente de 50° y una longitud de 371 m., e irá revestida de chapa de acero totalmente. Al llegar a la Central se divide en cuatro ramales para alimentar sendas turbinas Francis de 100 000 CV., reuniéndose las aguas de nuevo en un túnel de descarga de 1 700 m. de largo y 43 m.<sup>2</sup> de sección en roca.

La producción anual se estima en 550 · 10<sup>6</sup> Kw./h. y el presupuesto de la obra civil asciende a 1 400 millones de pesetas, previéndose la puesta en marcha del primer grupo en diciembre de este mismo año.

En su recorrido, la galería de presión recoge el agua de varias captaciones secundarias, una de las cuales, formada por una presa cúpula de 72 m. de altura, crea un embalse de regulación, aumentando de este modo la energía de punta disponible.

Se ha previsto también la reversibilidad del salto mediante bombeo alimentado por la energía fluyente de las restantes centrales del complejo Sil, dotando al gru-

po alternador-turbina de una bomba de 100 000 HP., con lo que se consigue el aprovechamiento exhaustivo de las aguas reguladas en este salto.

La parte más característica, por las innovaciones técnicas introducidas en su ejecución y los estudios realizados para diseñarla, está constituida por el conjunto tubería forzada-central, y las obras se han realizado según los plazos previstos.

*Central.* — El emplazamiento subterráneo de la central, pese al aumento local de coste y la fuerte dosis de imprevistos, se decidió por mor de la economía global del salto, basada en las siguientes razones:

- a) Acortamiento de longitud en la conducción.
- b) Reducción considerable de peso — y coste — en la tubería forzada.
- c) Supresión de las válvulas de descarga sincronizada.
- d) Mejora de la regulación de turbinas.

## A. GEOLOGÍA.

El macizo rocoso en cuyo seno se excavó la central está formado por roca de textura granitoide, rejuvenecida en el cámbrico-silúrico (?), rodeada de gneisses metamórficos con zonas de contacto muy intensas. Toda la tectónica regional está afectada por la gran rotura, N.-S., denominada por F. Hernández Pacheco "falla del Bibey".

Los ensayos sismoelásticos de la montaña indicaron en los sismógrafos velocidades medias de transmisión de 5 000 m./seg., cifra que, a través de la fórmula de Poisson-Stokes, daba un módulo de elasticidad dinámica de 400.000 Kg./cm.<sup>2</sup> y bajo carga de 280 000 Kg./cm.<sup>2</sup>. Estas medidas fueron completadas con sondeos eléctricos de tipo resistivo y disposición de electrodos Wenner.

Una vez excavado el túnel de acceso (6 × 6 m.), 485 m. de longitud y 9 por 100 de pendiente, y en dos cámaras laterales, se realizaron ensayos de descompresión por el método de "carottage" (con taladros de 145 mm. de diámetro), y ensayos geotécnicos con gatos hidráulicos provistos de placa rígida, los cua-

les permitieron deducir (método Talobre) una compresión natural de 82 Kg./cm.<sup>2</sup>, un rozamiento interno de 20° 30' y una cohesión media de 4,8 Kg./centímetro cuadrado para la cobertura rocosa de 300 m.

Todas estas medidas aconsejaron efectuar la ex-

bóveda, en la cual previamente se había excavado otra galería piloto de reconocimiento. Avanzada la excavación de la misma (I), se simultaneó con el hormigonado de una bóveda resistente de 1,50 m. de espesor en clave.



Fig. 1.ª — Presa de Bao.

cavación en tres fases sucesivas y la utilización en gran escala de pernos de anclaje para la entibación y estabilización de la roca descomprimida.

Del túnel de acceso se derivó una galería hacia la

A continuación, y desde el mismo túnel de acceso, se excavó la segunda etapa (II) hasta la planta de alternadores. La tercera fase (III) se completó extrayendo el escombro de las voladuras mediante otra ga-

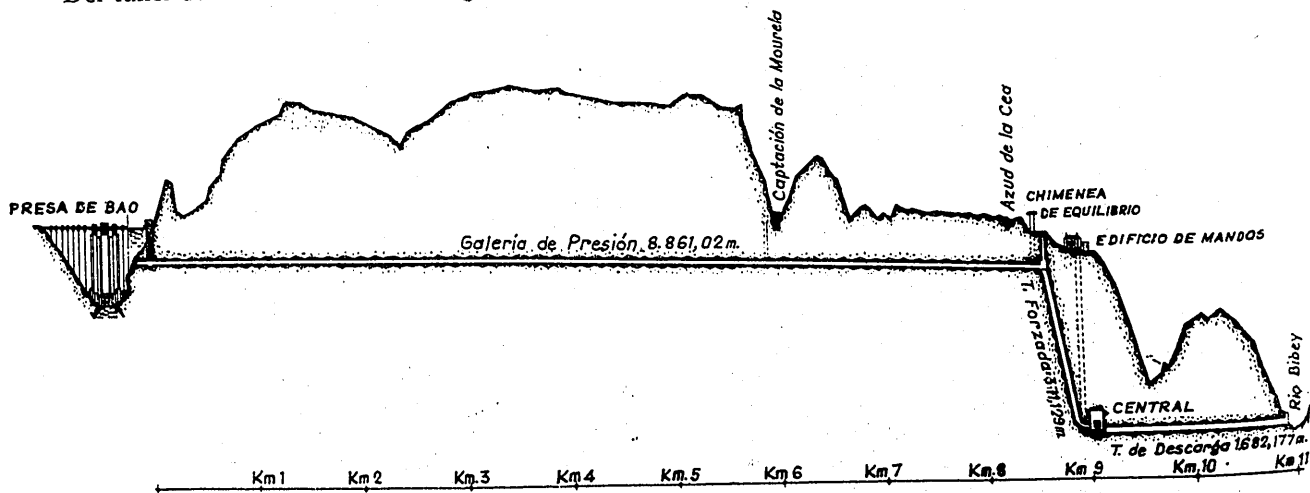


Fig. 2.ª — Perfil longitudinal del salto.

lería utilizada posteriormente como chimenea inferior de equilibrio. Finalmente, la excavación del grupo dotado de bomba se hizo a través de las galerías de acceso al mismo (IV).

Las dimensiones del recinto son:

- 92,8 m. de longitud.
- 17,4 m. de ancho.
- 35,0 m. de alto (grupo turbina).
- 51,5 m. de alto (grupo bomba).

### 1. Ventilación.

Necesidades: 1 Kg. de dinamita = 300 m.<sup>3</sup>; 1 hombre = 1,5 m.<sup>3</sup>/minuto; pala excavadora y Dumper = 3 m.<sup>3</sup>/CV. y minuto.

Instalación: 1 ventilador "Berka" de 100 HP. y 13,5 m.<sup>3</sup>/minuto; 2 ventiladores "Berka" de 40 HP. y 15,2 m.<sup>3</sup>/minuto; tubería de  $\phi$  950 mm. y 530 m.; 2 tuberías de  $\phi$  620 mm. y 170 m.

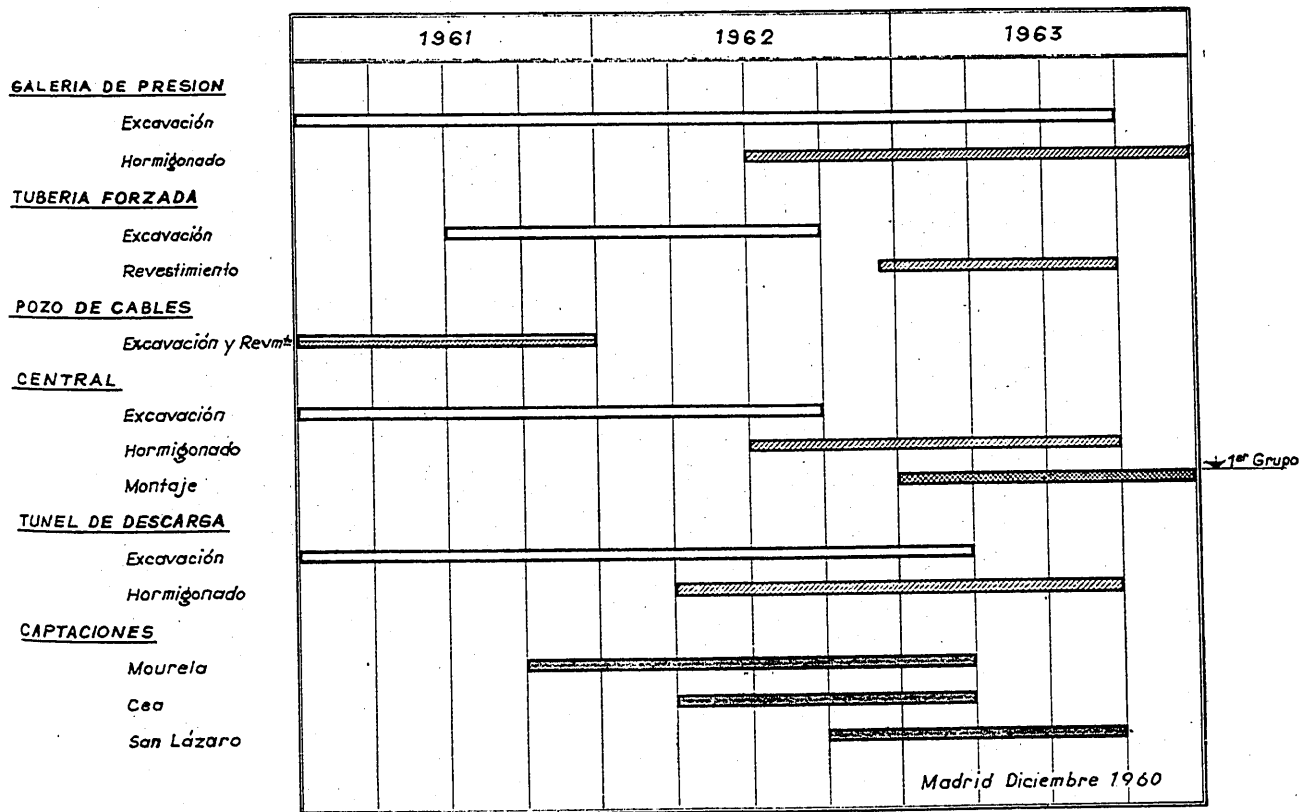


Fig. 3.<sup>a</sup> — Plan de obra, trienio 1961-63.

Su altura constituye record mundial — la segunda es la central de Infernillo, en Méjico, con 152 pies — y el conjunto de las galerías asciende a casi 2 Km.

### B. EXCAVACIÓN.

Los trabajos de excavación comenzaron en enero de 1961, una vez puestas a punto las instalaciones necesarias. A continuación se describen someramente las principales, acompañadas de los criterios utilizados para su dimensionamiento, así como sus rendimientos medios.

Funcionamiento: Aspiración tras la voladura (30') e impulsión durante el trabajo (\*).

### 2. Aire comprimido.

Necesidades: 35 martillos ligeros, 2 cañones neumáticos para hormigón y 3 bombas de agotamiento. Caudal en punta, 110 m.<sup>3</sup>/minuto.

Instalación: 3 compresores Holman de 120 CV.

(\*) Una vez comunicado el Pozo de Cables (300 m. de profundidad) con la central, se estableció un tiro natural, con raras inversiones de dirección en días de baja presión barométricas.

y 15 m.<sup>3</sup>/minuto; 3 compresores Atlas Copco de 125 CV. y 16 m.<sup>3</sup>/minuto; 6 calderines exteriores y 3 interiores de 300 l.; 1 800 m. de tubería de 6".

Instalación: Jumbo de dos pisos sobre Dumper; 35 martillos Atlas Copco BBD 41; barrenas Sandvic Coromant (suecas) y Mimetea (españolas) de widia;

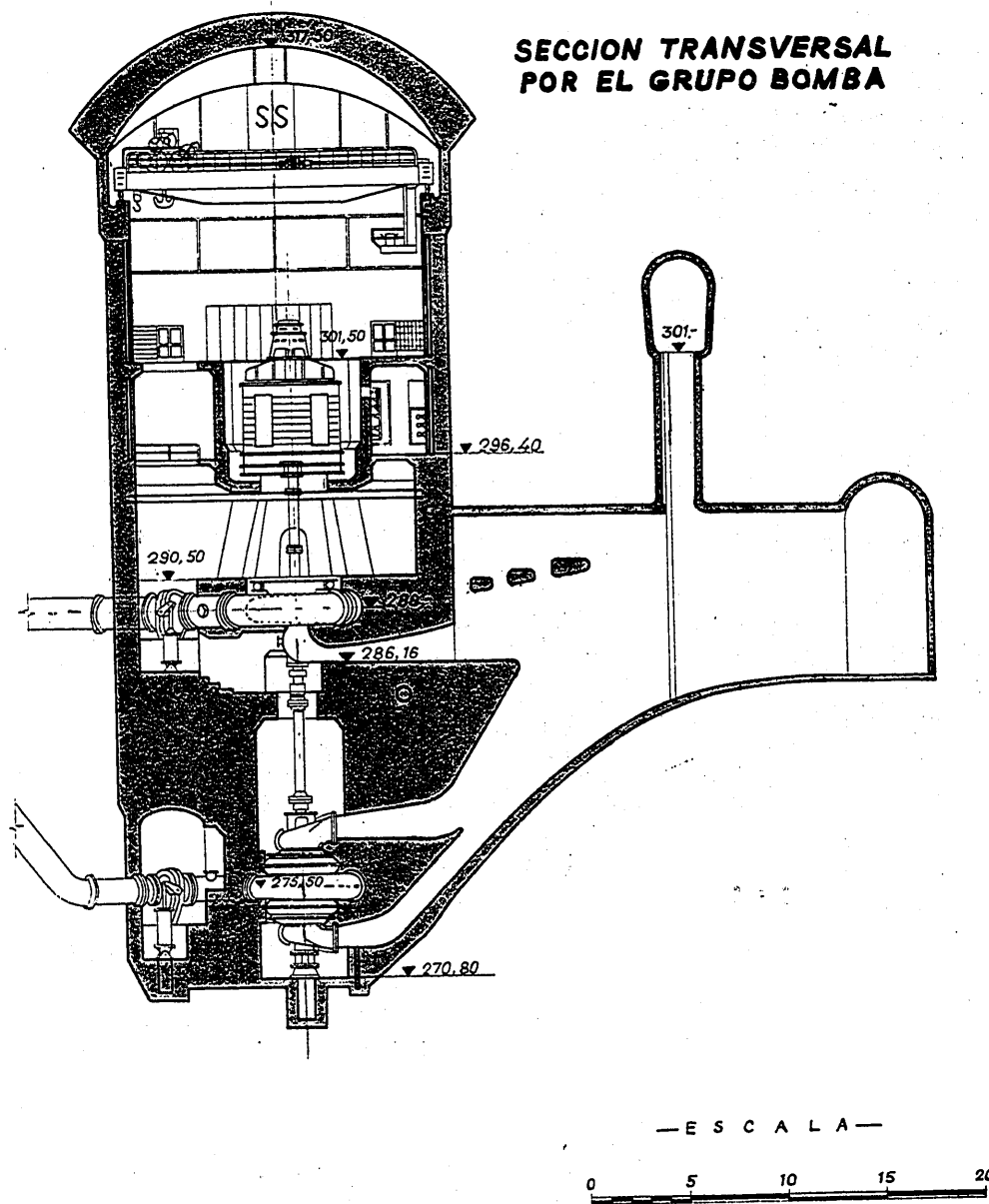


Fig. 4.<sup>a</sup> — Sección transversal, con la disposición adoptada para la bomba.

Funcionamiento: Factor de utilización, 6,8; presión de 7 Kg./cm.<sup>2</sup> en calderín y 6,5 Kg./cm.<sup>2</sup> en tajo; pérdidas del 15 por 100 en el conjunto.

### 3. Perforación.

Necesidades: Roca, gneis duro, densidad 2,7; secciones de 26 m.<sup>2</sup> en galerías y 182 m.<sup>2</sup> en bancos.

dinamita goma 1.<sup>a</sup>, 2.<sup>a</sup> y 3.<sup>a</sup>; detonadores eléctricos, retardos y ficrorretardos.

Funcionamiento: Índice de consumo de piezas inferior al previsto por Atlas; índice de perforación de 179,5 m. por barrena; índice de dinamita medio (incluyendo galerías y pozos de avance) de 1,49 kilogramos/m.<sup>3</sup>.

#### 4. Desescombro.

Necesidades: Volumen de 125 000 m.<sup>3</sup> a extraer en veintidós meses.

Instalación: Trabajaron sucesivamente (y con un

#### 5. Energía eléctrica.

Necesidades: Alumbrado fijo, 20 KV.; reflectores portátiles, 10 KW.; 5 bombas de agotamiento, 199 KVA.; 2 grupos de soldadura, 38 KVA; pala ex-

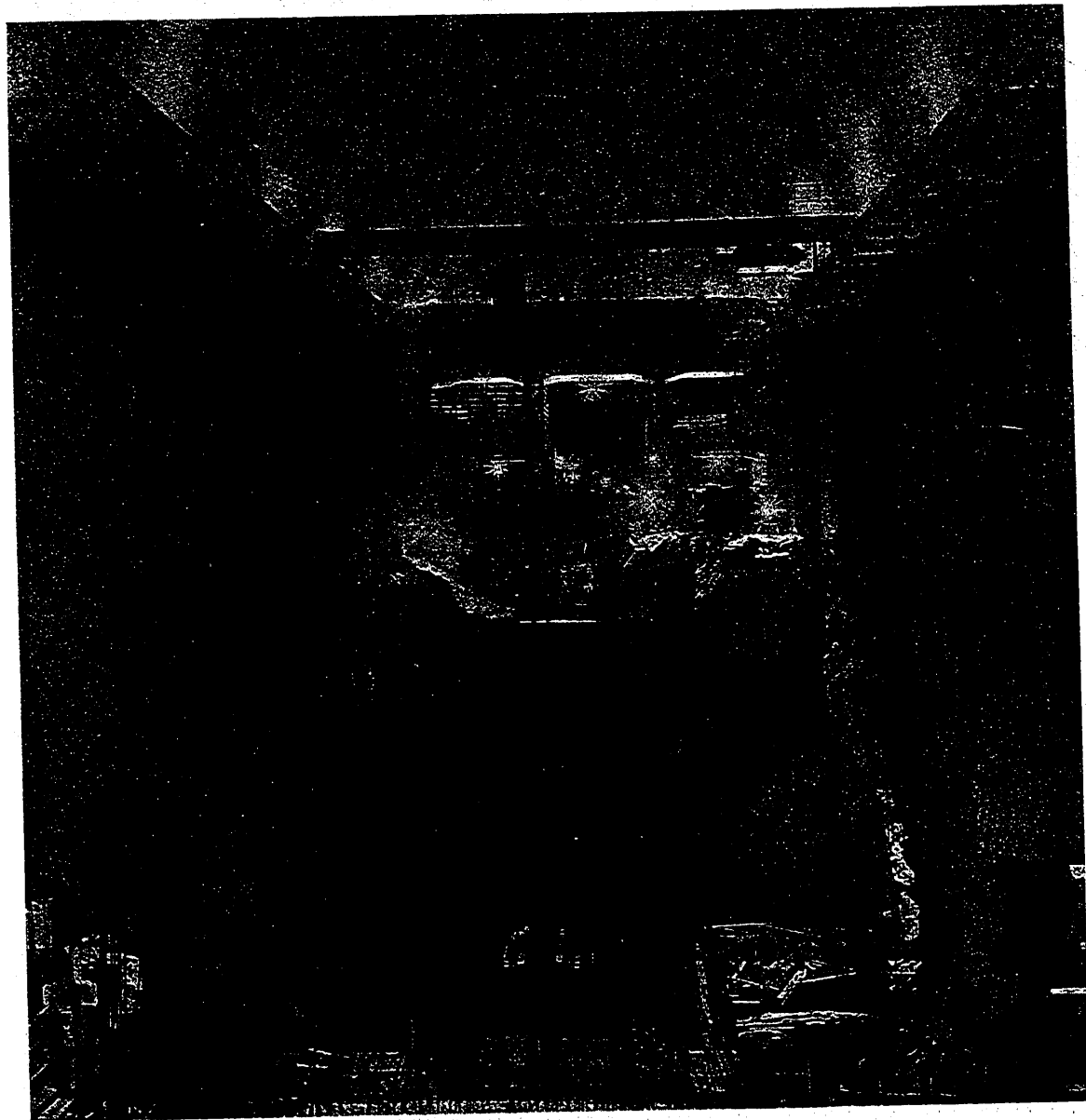


Fig. 5.<sup>a</sup>.—Vista de la central, mostrando el puente-grúa de 10 Tn. utilizado para hormigonar.

pequeño solape) tres palas cargadoras, 1 Eimco 105 (1 500 l.), 1 Nordest (800 l.) y 1 Menck (1 500 l.); 1 tractor Caterpillar; flota de 12 dumpers Muir-Hill de 3 m.<sup>3</sup> y 2 camiones basculantes Pegaso.

Funcionamiento: Rendimientos medios de las palas: Eimco, 105, 41 m.<sup>3</sup>/h.; Nordest, 29 m.<sup>3</sup>/h., y Menck, 48 m.<sup>3</sup>/h. Punta diaria de 529 m.<sup>3</sup> y mensual de 7 140 m.<sup>3</sup>.

cavadora Nordest, 60 CV.; bomba Blaw-Knox, 25 CV.; vibradores, grúas y puente-grúa provisional y definitivo de 10 Tn. y 200 Tn., respectivamente.

Instalación: Caseta exterior con transformador de 1 000 KVA., relación 20 000/380, para compresores y ventiladores; caseta interior con tres transformadores en paralelo de 125 KVA., relación 20 000/220,

con salida en "estrella" y neutro aislado para evitar corrientes parásitas en la roca; relé de vigilancia AEG, con sistema de alarma en 12 K  $\Omega$ , para medir el aislamiento de toda la red; 1 transformador de 125 KVA., 20 000/380 para puente-grúa.

Funcionamiento: Factor de potencia medio de 0,76 (marcha irregular de bombas y puntas del motor eléctrico de la pala Nordest); alumbrado de seguridad alimentado con baterías para los posibles dispa-

barrena de 33 mm. de boca; se utilizaron en galerías de avance, principalmente en el cosido de lisos.

2. Pernos de cuña de expansión, de rosca; barras de acero especial liso de  $\phi$  18 mm. y cuña de expansión abierta, roscando la base con martillo neumático; empleo sistemático en la tubería forzada, acompañada de malla.

3. Inyectados con morteros; barras de tetracero liso de 22 mm. envueltas en plástico "macarrón", sal-

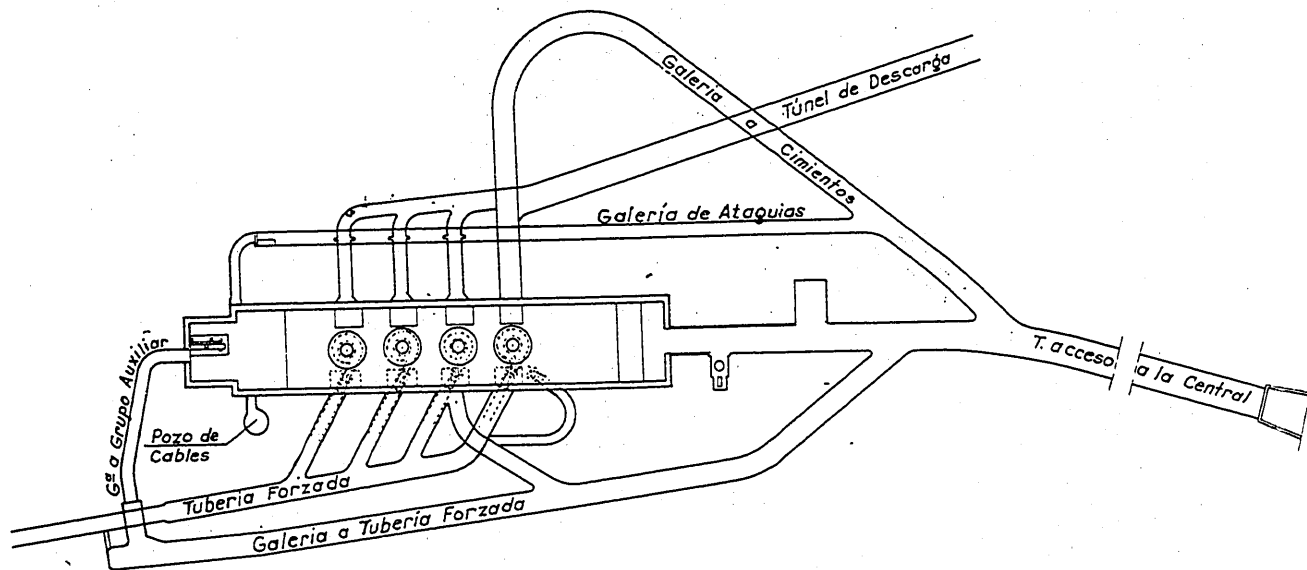
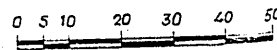


Fig. 6.<sup>a</sup> — Planta de galerías.

— E S C A L A —



ros de los relés. Transformadores con Pyraleno contra vibraciones.

En la excavación de las galerías se simultanearon los frentes, consiguiendo con sólo dos relevos cuatro voladuras diarias, con un avance medio de 2,80 m. por pega, y desescombro con pala Eimco 105, volteadora.

En la excavación de los bancos escalonados de la central trabajaron alternativamente las palas Nordest y Menck.

Siendo la técnica del "bulonaje" — galicismo difícilmente soslayable — de reciente introducción en Europa, y sobre todo careciendo de experiencia suficiente su aplicación a obras civiles — a pesar de su profusión en minería —, ya que se rige por criterios totalmente distintos, aunque su fundamento sea el mismo, se ensayaron sistemáticamente todos los tipos empleados en la obra.

Los criterios que, finalmente, decidieron su aplicación fueron los siguientes:

1. Pernos de cuña de expansión, de percusión; barras de acero de  $\phi$  30 mm. con hendidura central y cuña prismática; mediante ensayos de carga con gato se determinó la perforación de los taladros con

vo un tramo en la punta de 1,50 m. Después del fraguado del mortero se tensaron con gato hidráulico hasta las proximidades de la carga de rotura (2 100 kilogramos/cm.<sup>2</sup>, 8 Tn.), utilizados para mejorar la resistencia a esfuerzo cortante de los apoyos de la bóveda de hormigón, muy verticales para alejar empujes de los hastiales.

4. Inyectados con morteros y vaina perforada; barras de tetracero, 22,5 mm., corrugado, introduciendo previamente el mortero con ayuda de las vainas perforadas; utilizado en bóvedas y hastiales, longitudes variables entre 1,8 m. y 6,40 m., para impedir el avance de la descompresión de la roca, favoreciendo así su estabilización.

5. Procedimiento "Barredo": Anclajes Barredo, de triple alambre de 6 mm. y cuña con un esfuerzo por unidad de 40 Tn.; posteriormente se inyectaron; de esa manera y en todo similar al pretensado de una viga — se invirtió el trabajo de descompresión de la roca, aumentando su estabilidad mecánica al

pandeo y evitando el desprendimiento de lajas. Entre canales de descarga, a causa de la esbeltez de los macizos intermedios.

6. Anclajes de gran tensión BBRV: el ensayo fotoelástico, lámina de material vítreo — realizada por el Laboratorio Central de Ensayos de Materiales — con las dimensiones transversales del recinto de la central y cargas mayorantes de la presión interna de la montaña, indicó cuantitativamente dos extensas zonas de tracciones, con origen en el arranque de la bóveda, y ubicadas en los hastiales. Con objeto de alejar de los mismos el posible empuje de la bóveda y mejorar el estado tensional de esas zonas, se decidió el pretensado de la roca por medio de cables anclados en las galerías que discurren paralelas a la central y en sendas vigas de arriostramiento, que a su vez constituyen el camino de rodadura para los puentes-grúa auxiliar y definitivo.

El esfuerzo global fué de 5 200 Tn. El tonelaje total de hierros empleados en anclajes ha sido de 12 Tn. de acero ordinario, 21 Tn. de acero especial y 73 Tn. de tetracero, con más de 27 Km. de perforación.

### C. HORMIGONADO.

Las vigas ancladas en los cables BBRV se calcularon para resistir simultáneamente la rodadura de un puente-grúa auxiliar de 10 Tn., con el cual se han

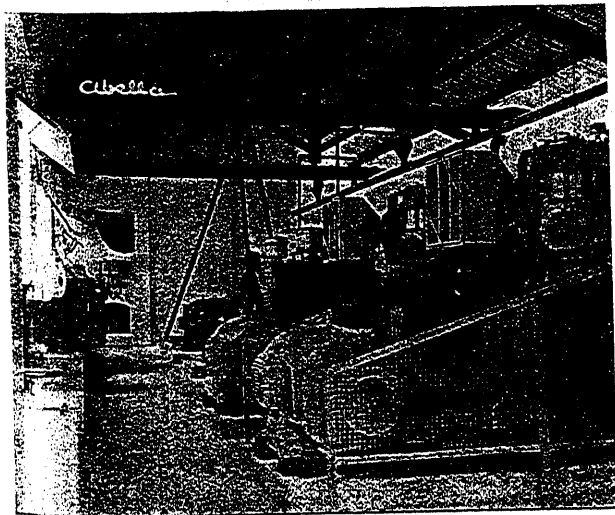


Fig. 7.ª — Instalación de aire comprimido, sala de compresores.

hormigonado los grupos, forjados y muros de la central.

La ventaja de este sistema de colocación del hormigón es bien patente, aun sin acudir a la facilidad

de manejo y colocación de armaduras y encofrados. El procedimiento clásico, mediante bomba transportadora de hormigón, entraña dosificaciones excesivamente ricas (hasta 480 Kg. de cemento plastificante incluido en una central recientemente visitada), con

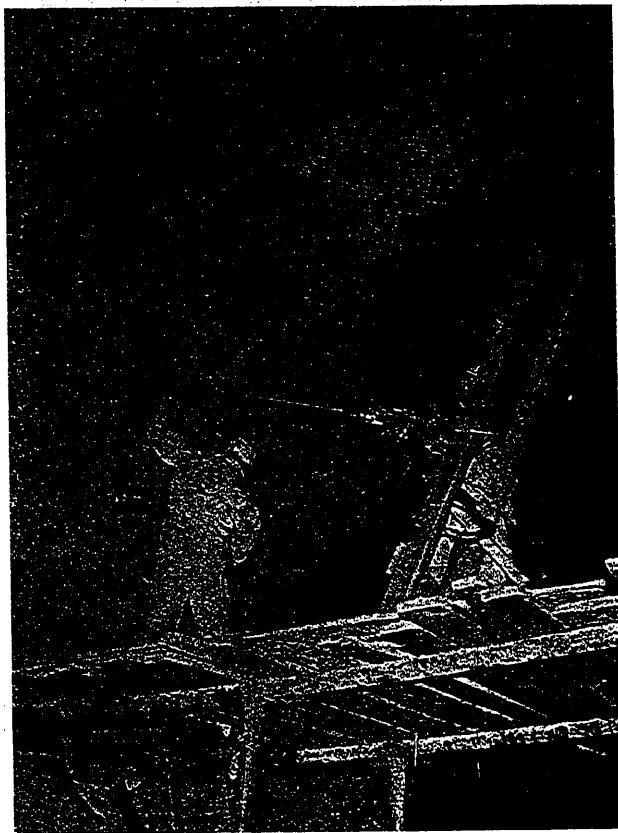


Fig. 8.ª — Colocación de pernos y malla en una galería.

resistencias relativas menores por la alta relación agua-cemento necesaria para la lubricación de las tuberías.

Dos hormigoneras de eje horizontal y 750 l. de capacidad, situadas en la entrada del túnel de acceso, servían una mezcladora ("truck-mixer") "Rapier", de 2,5 yardas cúbicas, montada sobre camión, que a su vez descargaba en una tolva situada en el piso de alternadores, tras un recorrido de medio kilómetro, regularizadora de la carga del cazo suspendido del puente-grúa auxiliar. Como la velocidad de traslación del mismo es de 30 m./minuto, se logró un rendimiento medio de 85,6 m.<sup>3</sup>/día con punta diaria de 212 m.<sup>3</sup>, por lo que en todo momento el ritmo vino marcado por la colocación de armaduras e intervalos necesarios entre tongadas sucesivas.

Hasta el momento (enero de 1963) se han colocado 17 000 m.<sup>3</sup> de hormigón en estructuras y muros.

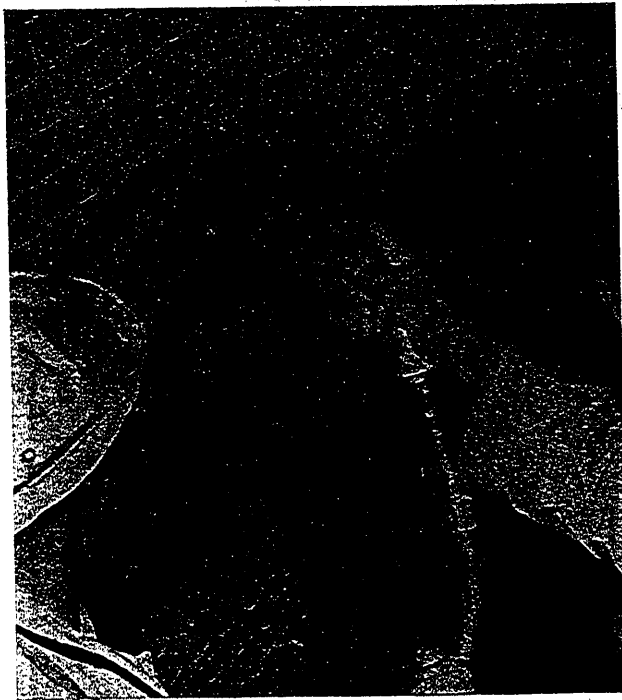


Fig. 9.ª — Detalle de la nave neumática empleada para el apretado del perno de anclaje.

Se emplearon dos tipos distintos de dosificación, según se tratara de muros o forjados:

1.º	0- 2 mm.	23 %.
	2-10 »	12 %.
	10-40 »	25 %.
	40-80 »	40 %.

Cemento, 250 Kg.; asiento, 50 mm.; A/C = 0,60.

2.º	0- 2 mm.	34 %.
	2-10 »	14 %.
	10-40 »	52 %.

Cemento, 350 Kg.; asiento, 60 mm.; A/C = 0,56.

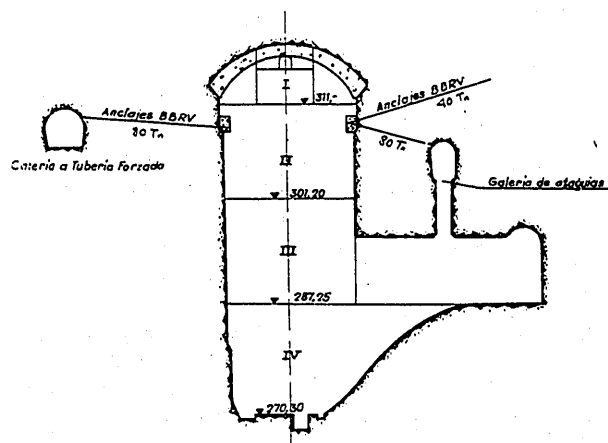


Fig. 10. — Disposición de los cables de gran tensión, para arriostrado de las vigas del puente-grúa.

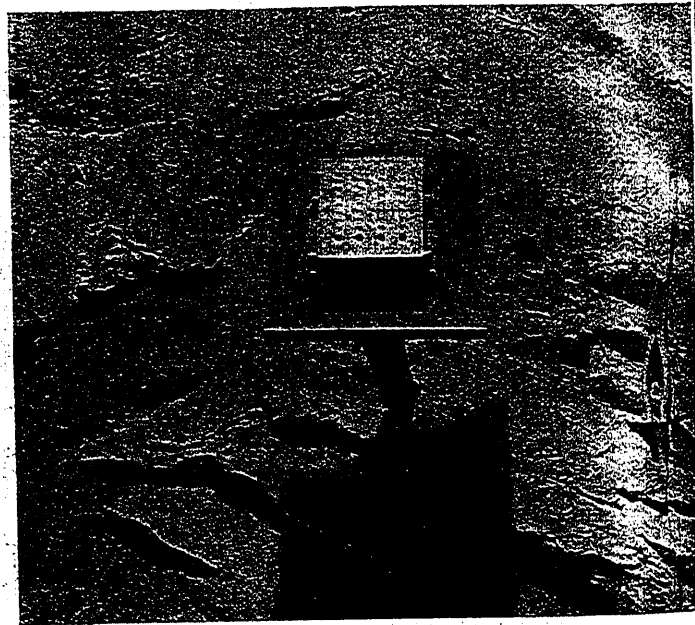


Fig. 11. — Detalle de la cabeza de un anclaje BBRV.

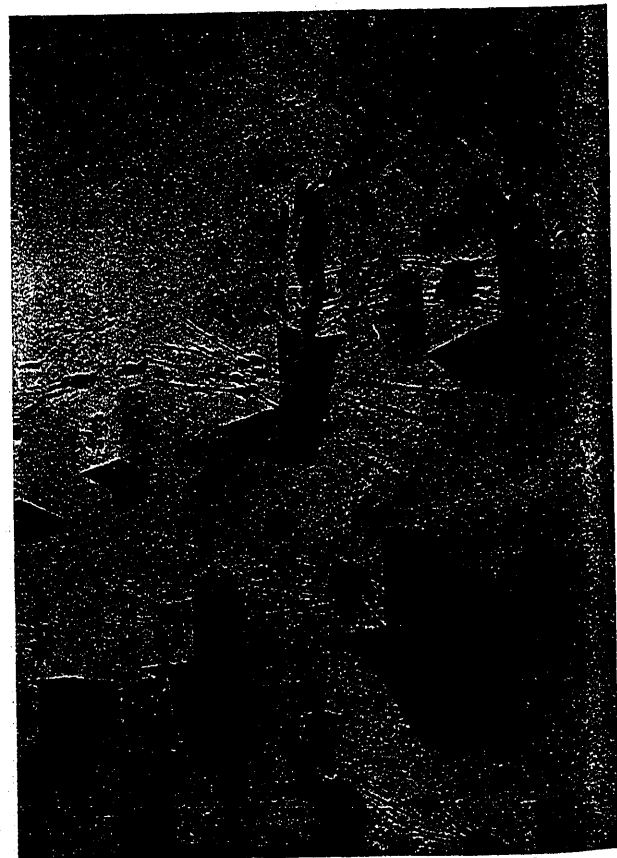


Fig. 12. — Anclajes Barredo para pretensado de los hastiales entre canales de descarga.

# DISTRIBUCION NORMAL DE RESISTENCIAS A 28 DIAS

CEMENTO . 350 Kg/m.<sup>3</sup>  
 A/C ..... 0,56  
 DENSIDAD. 2,37  
 ASIENTO .. 60 mm.

ECUACION DE GAUSS:  $\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}$

CALCULO DE LA CURVA DE SUSTITUCION CORRESPONDIENTE A LA DISTRIBUCION EMPIRICA:

$y = N d \frac{1}{\sigma} \varphi(t); \quad t = \frac{1}{\sigma} (x - m)$

X = RESISTENCIAS

Y = FRECUENCIAS

$d = x_i - x_i - 1 = 10 \text{ Kg./cm.}^2$

N = N.º DE ENSAYOS = 81

$\sigma$  = DESVIACIONES ESTANDARD = 29,50

$\frac{1}{\sigma} = 0,03390$

m = MEDIA ARITMETICA = 247 Kg./cm.<sup>2</sup>

EN LA SUPERFICIE  $\varphi(t)$   
 COMPRENDIDA ENTRE:

$\pm \sigma$  68,26 % DEL N.º DE CASOS  
 $\pm 2\sigma$  95,46 %  
 $\pm 3\sigma$  99,74 %

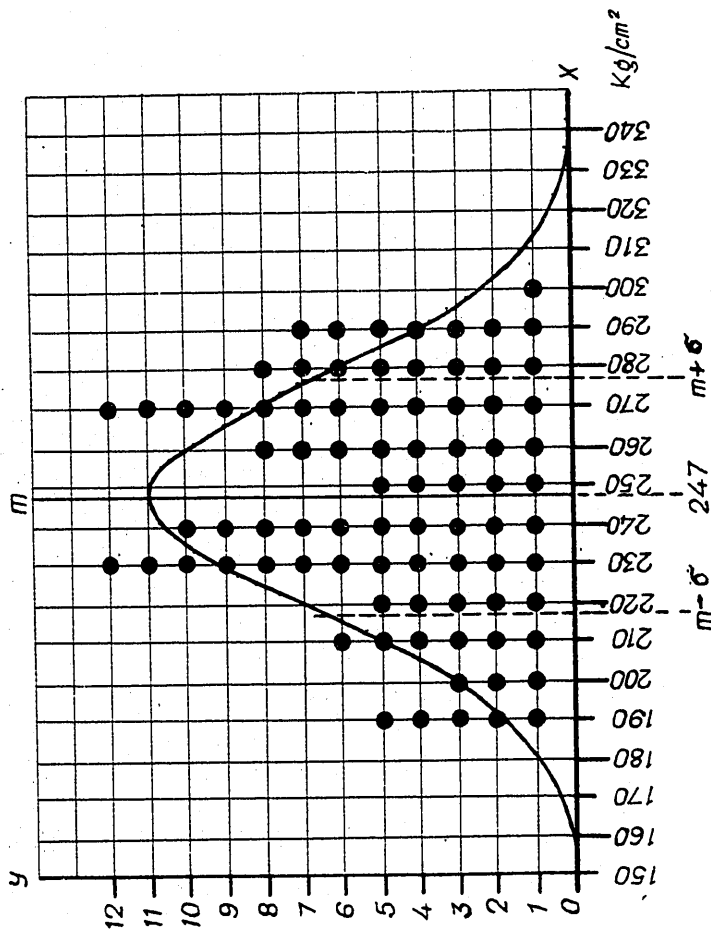


Fig. 13. — Gráfico de resistencias del hormigón.

X	x - m	t	$\varphi(t)$	$y = 8 \cdot 0,03390 \varphi(t)$
150	97	3,2883	0,0018	0,0494
160	87	2,9493	0,0051	0,1000
170	77	2,6103	0,0132	0,3625
180	67	2,2713	0,0303	0,8320
190	57	1,9323	0,0620	1,7025
200	47	1,5933	0,1127	3,0946
210	37	1,2543	0,1827	5,0268
217,5	29,5	1,0000	0,2420	6,6451
220	27	0,9153	0,2637	7,2409
230	17	0,5763	0,3372	9,2591
240	7	0,2373	0,3876	10,6431
247	0	0,0000	0,3989	10,9534

LOS PUNTOS SEÑALAN LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES  
 Y SE HAN TOMADO POR APROXIMACION A LA DECENA

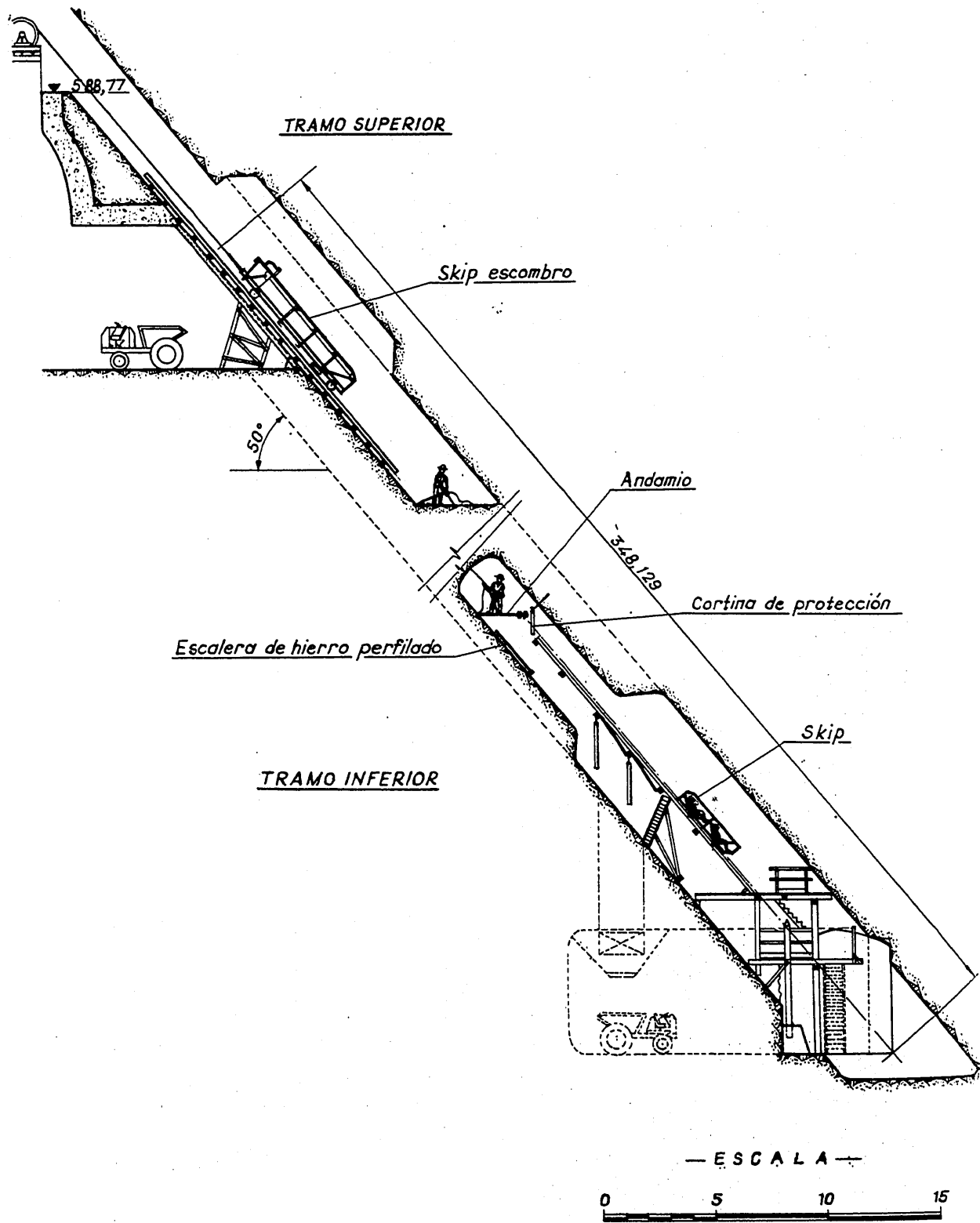


Fig. 14. — Detalle esquemático de las instalaciones empleadas en ambas galerías-piloto.

Para garantizar las fechas de desencofrado y descimbrado se empleó sistemáticamente el esclerómetro debidamente tarado en el laboratorio. La resistencia media de las probetas cilíndricas (30 X 15 cm.) es — hasta la fecha — de 217 Kg./cm.<sup>2</sup>, con una des-

viación *standard* de 29,84 para el hormigón 1) y 247 kilogramos/cm.<sup>2</sup> y 29,50 para el hormigón 2), desviaciones originadas fundamentalmente por la dispersión de calidad en el cemento empleado.

En diferentes etapas las roturas se hicieron según

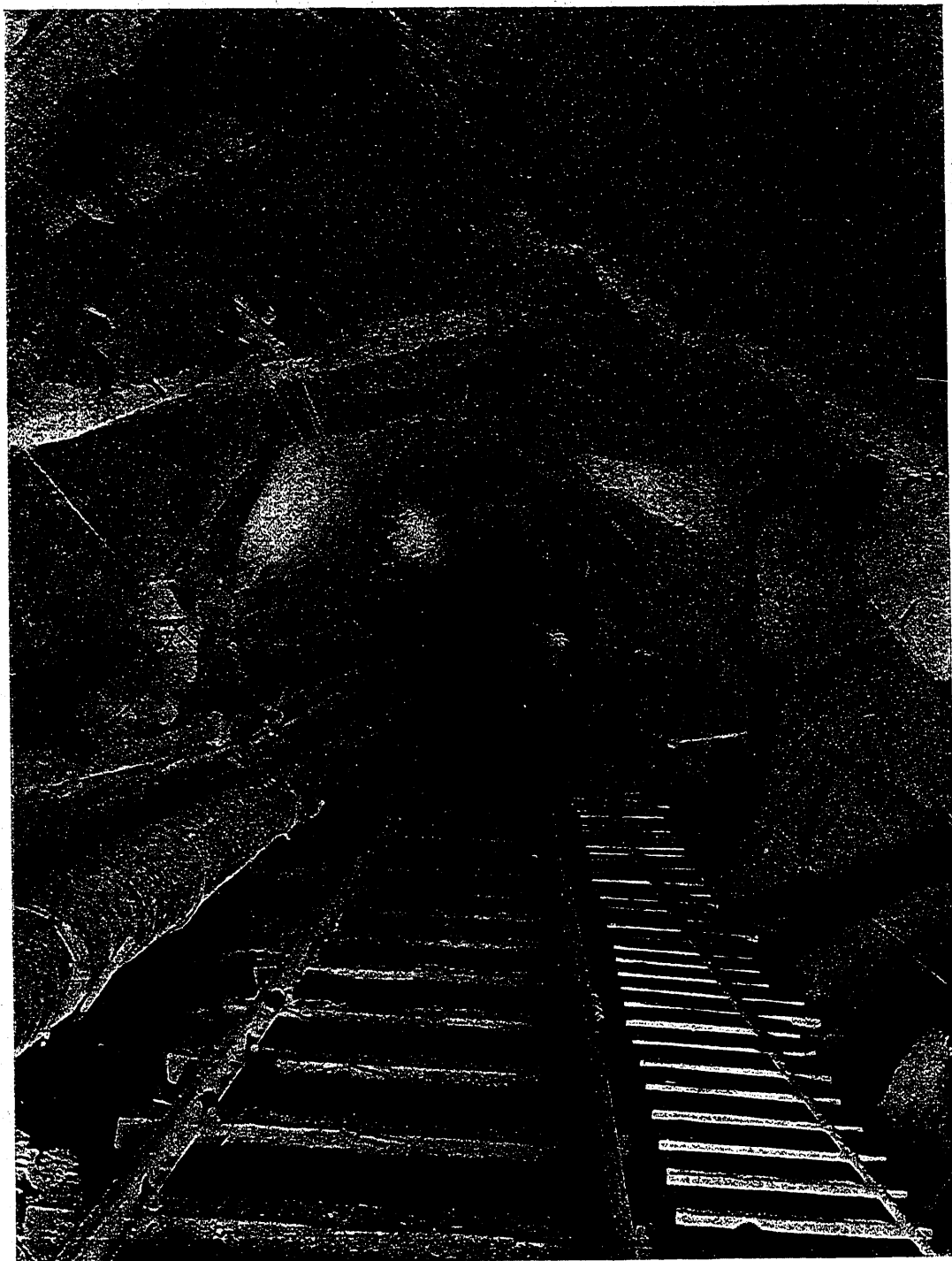


Fig. 15.—Aspecto de la galería en su tramo descendente.

una generatriz, al estallido (método brasileño), y comparados los resultados con probetas cúbicas de 30 X 30 cm.

### Tubería forzada.

La ejecución de este tajo ha tenido dos etapas bien diferenciadas: primero fué excavada una galería pi-

de 20 Kg./m. l., en plano inclinado y cuya carga en el frente se efectuaba por medio de un Skipp solidario al mismo.

En el pozo inferior, y aprovechando la caída natural de la roca, ésta se recogía en una tolva lateral, cargándose posteriormente en dumpers, independizando de este modo las labores de perforación y desescombro. La protección del personal estaba asegurada

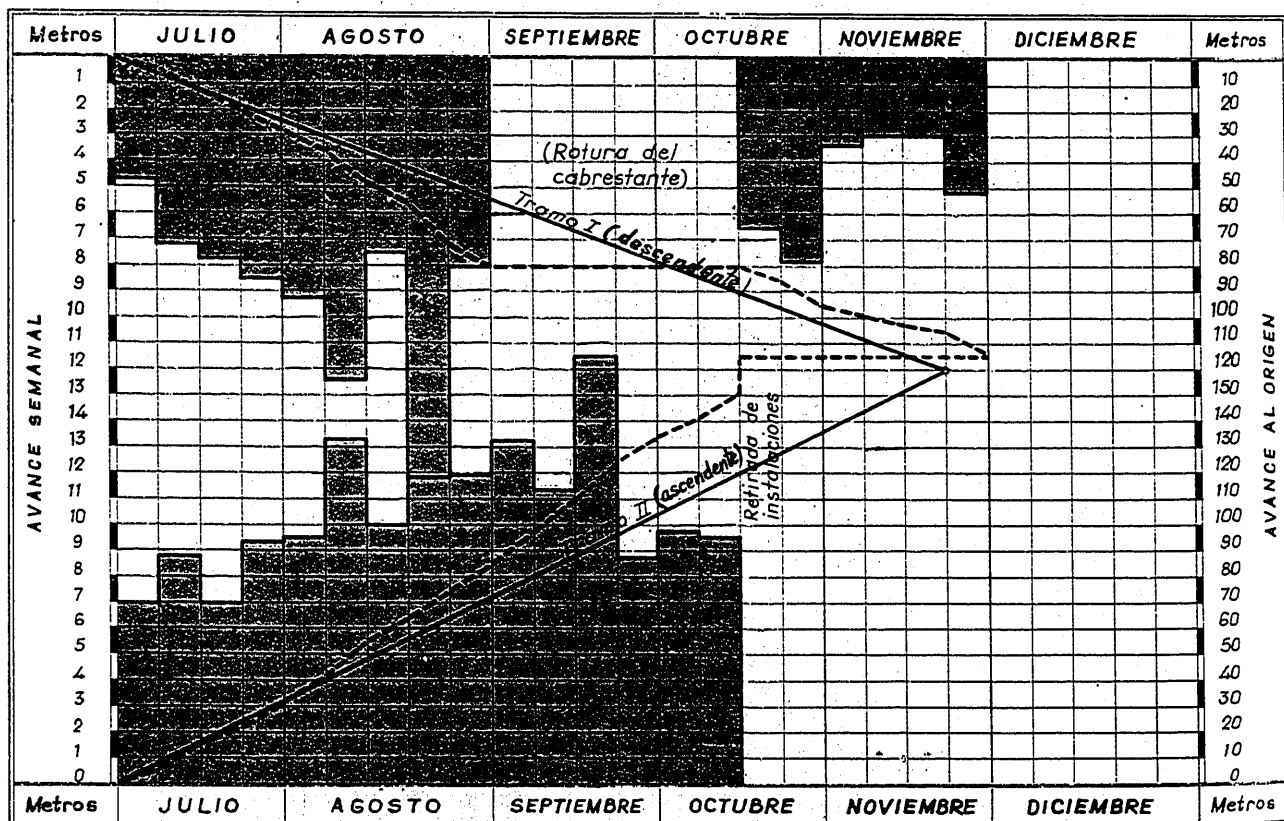


Fig. 16.— Plan de obra y avances reales de la galería de tubería forzada.

loto simultáneamente desde la central y desde el codo superior de enlace con la galería de presión; posteriormente se realizó la destroza, de arriba abajo, vertiendo el escombro por el pozo guía.

Durante los trabajos, afortunadamente, y a pesar de su evidente peligrosidad, no ha habido que lamentar accidente mortal alguno, siendo obligatorio el uso de cinturones y cable de seguridad.

#### A. POZO PILOTO.

Como es lógico, los sistemas empleados aguas arriba y abajo difieren esencialmente.

En el pozo superior, la extracción del escombro se realizó mediante un vagón-tolva, montado sobre vía

por un tabique de tabloncillos colocados sobre rollizos transversales que dividían en dos mitades el pozo. Sobre esta plataforma se deslizaba, mediante vía, un carro para transporte de personas y material.

Una vena de agua surgida inesperadamente cuando sólo faltaban 11 m. para el "cale", inundó el tajo y sólo pudo reanudarse la excavación drenando el pozo mediante un sondeo entre ambos frentes.

#### B. DESTROZA.

Se efectuó desde la parte superior, tal como se indicó ya, vertiendo el escombro en una tolva, similar a la utilizada en la excavación de la galería piloto. La perforación, y para seguridad del personal, se efectuaba desde una plataforma, que a su vez servía para

la colocación de una malla cosida a la roca de bóveda con pernos de anclajes, del tipo expansión.

Previamente se realizó un ensayo sismoelástico para definir la longitud de los mismos y función de la aureola descomprimida y el aumento gradual de su radio.

el procedimiento Prepakt, complementado con una inyección profunda de consolidación de roca, ya que su colaboración se ha tenido en cuenta para reducir espesores de chapa.

\* \* \*

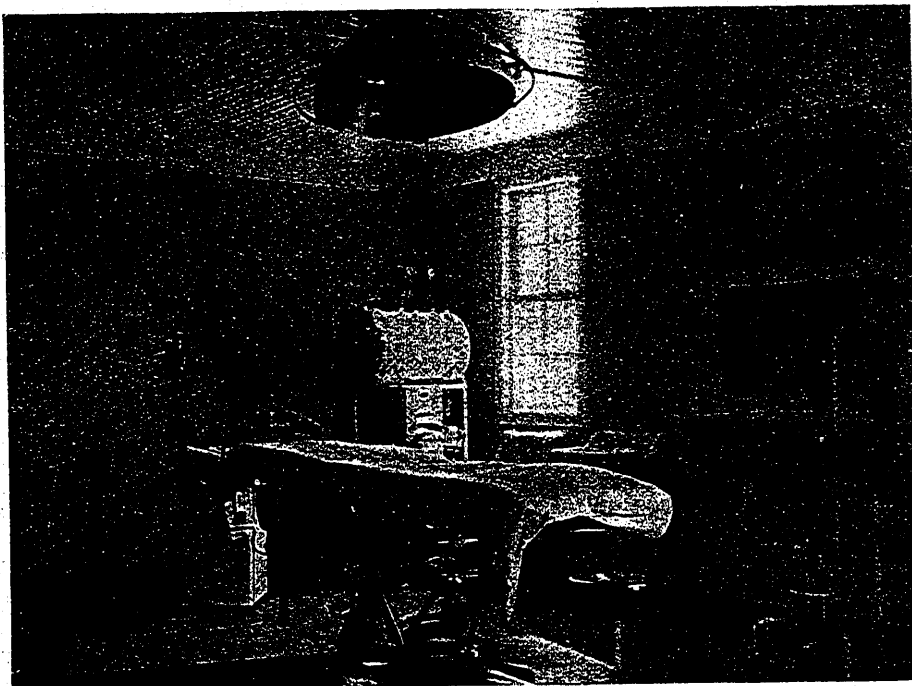


Fig. 17. — Sala de urgencia del Hospitalillo de Obra.

Se trabajó en tres relevos diarios (compuestos por 8 barrenistas, 1 electricista, 1 tubero y maquinistas de cabrestante), y periódicamente se efectuaron cronometrajes de los ciclos.

### C. REVESTIMIENTO.

Actualmente ha comenzado el montaje de la tubería, bajando los tubos por la vía empotrada en una solera hormigonada, en trabajo simultáneo ("Banalise") durante la destroza. Su espesor varía de 9 mm. a 52 mm., y los tramos son de 6 m., con un peso medio de 12 Tn., y está dotada en su tramo inferior de zunchos pretensados.

El espacio entre el tubo y la roca se rellena por

En el conjunto de las dos obras se han invertido 1 122 000 horas/hombre, con índices de 6,9 horas por metro cúbico de excavación y 17,3 horas/m.<sup>3</sup> de hormigón.

El Servicio Médico está formado por un médico titular, especializado en accidentes de trabajo, y tres practicantes; en turno permanente, además del personal sanitario; y está dotado de un hospitalillo con material quirúrgico de urgencia, equipos fijo y portátil de rayos X y ambulancia. La eficacia del mismo se traduce en un "índice de frecuencia" de 91,84 (incluye accidentes "in itinere"), y un índice de gravedad de 4,863 (posiblemente el más bajo de Europa en este tipo de construcción), con un solo accidente mortal en el transcurso de las obras.