



puente de Troulero - Suiza

L. GIANADA and U. GUGLIEMMETTI,
ingeniero diplomado EPUL-SIA

562-118

sinopsis

Al ser decretada la construcción de una carretera de acceso por las autoridades cantonales y la dirección de electricidad de Emosson, S. A., fue necesaria la realización de una obra de fábrica —el puente de Troulero— que franquease unos echadizos rocosos en estado de equilibrio límite situados en una ladera.

La obra construida, de 140 m de longitud, es un puente con soportes oblicuos de hormigón armado y pretensado.

La duración de los trabajos ha sido de tres años, y el coste sobrepasa los 620.000 francos suizos.



I. Introducción

En el plan de instalaciones hidroeléctricas Franco-Suiza de Emosson, en la región de Chatelard, en Valais, las autoridades cantonales y la dirección de electricidad de Emosson, S. A., decidieron la construcción de una carretera de acceso a la cantera, a partir de la carretera de Forclaz.

El Estado de Valais decretó de utilidad pública el tramo de carretera hasta Finhaut. Una convención entre el Estado de Valais y la sociedad de Grand-Emosson fijó las modalidades de construcción y las participaciones financieras (Estado, 28 %; Sociedad Eléctrica, 60 %, y comarcas cercanas, 12 %).

La carretera fue inaugurada en noviembre de 1968.

A lo largo de algunos centenares de metros de la unión de la carretera de Forclaz con la nueva ruta, hubo que atravesar, por el flanco de la colina, unos echadizos rocosos en equilibrio límite. El puente de Troulero franquea este obstáculo natural sobre una longitud de 143,30 m, con cuatro vanos de 43,70 m, 36 m, 34,80 m y 28,80 m, medidos de eje a eje de cimentaciones.

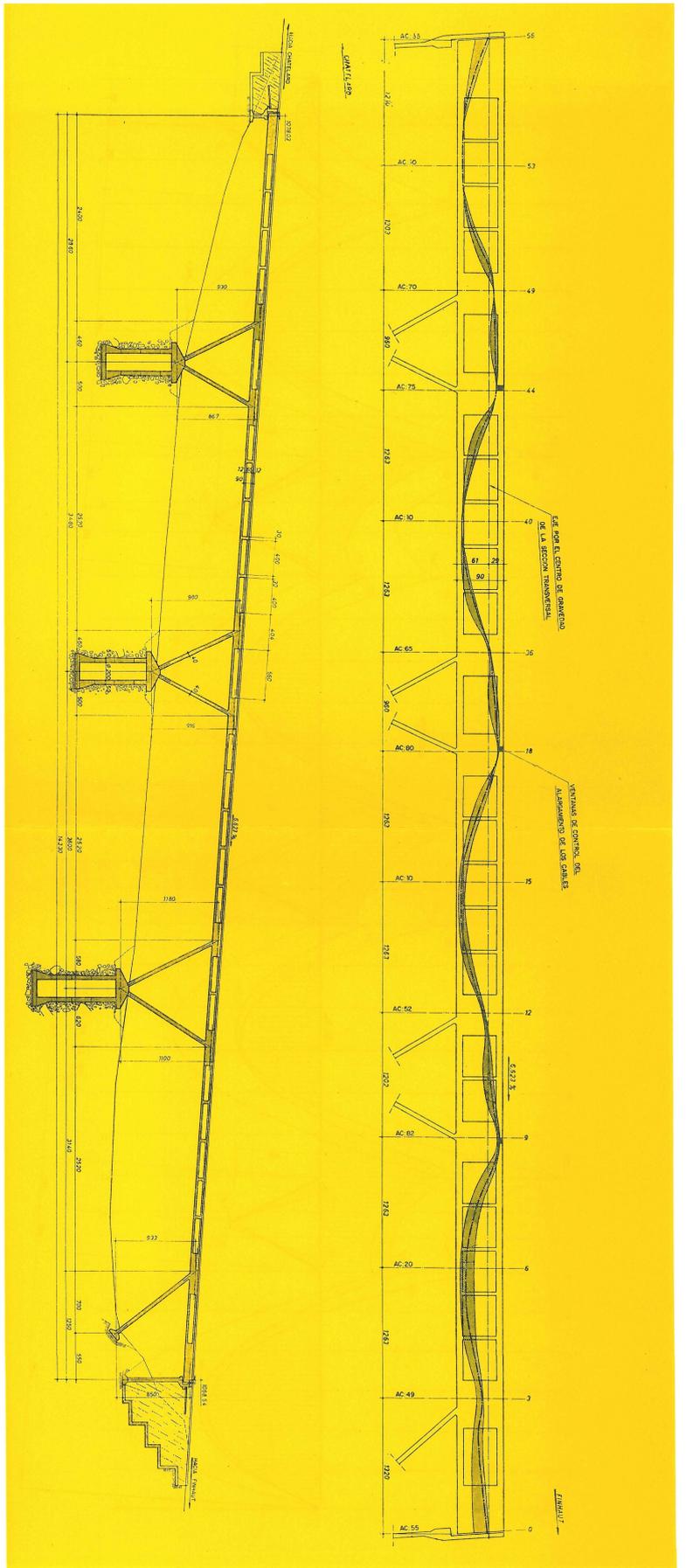
II. Descripción de la obra

La obra construida es un puente con soportes oblicuos de hormigón armado y pretensado. Su altura desde el suelo al eje varía entre 3 y 12 m y su pendiente longitudinal es de 6,623 %.

La elección de los soportes oblicuos ha sido dictada por las siguientes consideraciones:

- necesidad de crear grandes vanos bajo el puente a fin de facilitar las caídas de piedras, deslizamiento de terrenos, nieve, etc.;
- necesidad de cimentar un mínimo de apoyos en los echadizos (cimentaciones difíciles);
- consideraciones económicas y estéticas.





El tablero, de 10 m de anchura y 90 cm de espesor, es una losa aligerada en el centro por elementos cilíndricos de espuma sintética de polystyrol dentro del hormigón (encofrado perdido).

La obra está pretensada en el sentido longitudinal por medio de 7 cables de pretensado, sistema V.S.L., formados cada uno por 22 hilos de media pulgada, y dando una fuerza total a la puesta en tensión de 1.850 megapondios.

Los soportes inclinados de hormigón armado tienen 40 cm de espesor y una anchura variable de 3,9 m en la parte alta a 3 m en la base. Están empotrados en un zocalo de hormigón armado, soldando a las paredes de un pozo de cimentación de 3 m de diámetro y de 8 a 9 m de profundidad.

Los estribos son de tipo clásico con muros en ala donde reposa el puente por medio de dos apoyos de neopreno zunchado.

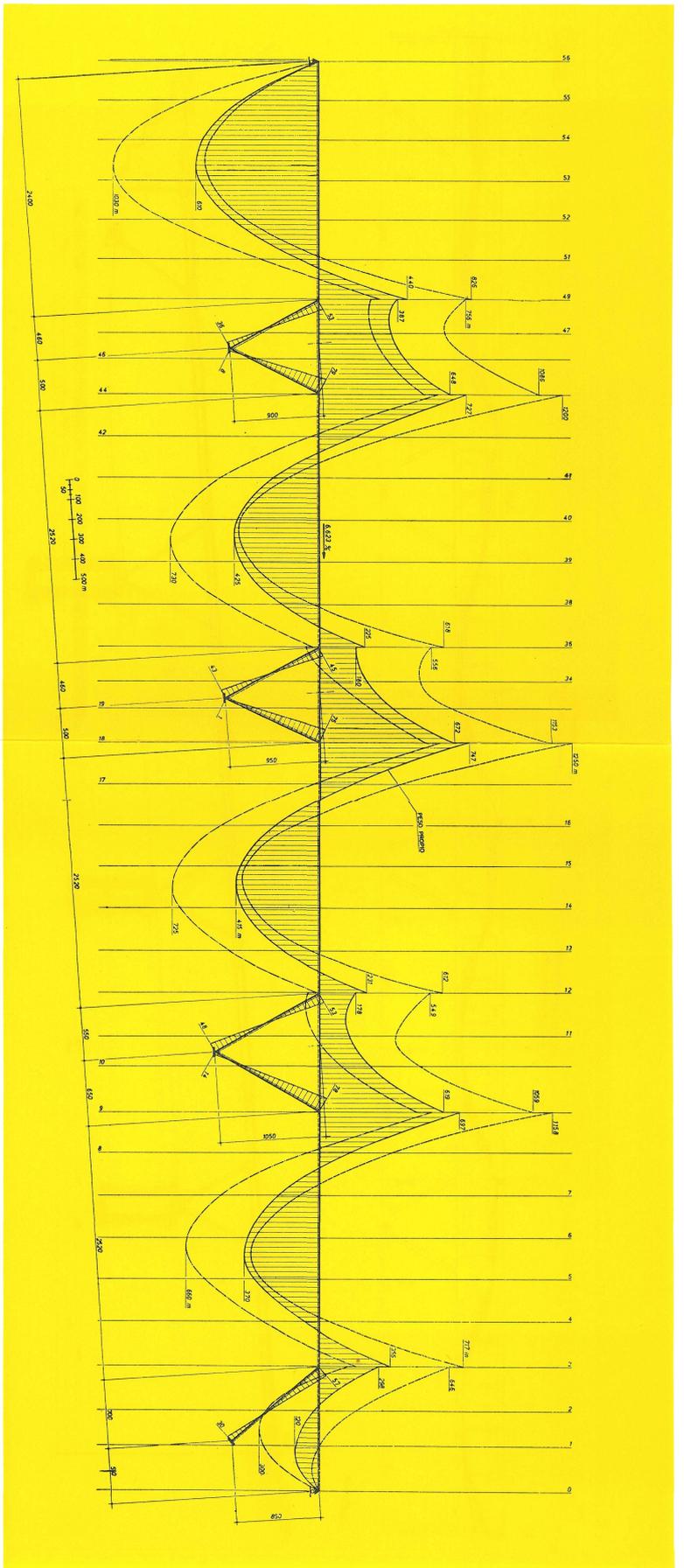
Hay juntas de dilatación previstas en las dos extremidades del puente. Son del tipo V.S.L. Dilastic, y tienen una capacidad de movimiento máximo de 40 mm cada una.

III. Cimentaciones

Los dos estribos del puente están cimentados sobre la roca firme y estable, y no han creado ningún problema nuevo, pero las tres cimentaciones intermedias reposan sobre los echadizos rocosos en equilibrio límite antes mencionados, y han necesitado un estudio especial.

El pasillo de echadizos en cuestión, de una longitud aproximada a los 140 m, recubre un fondo de roca irregular y pulida por los glaciares. Está constituido por restos rocosos de naturalezas diversas, amontonados en pequeños elementos en el centro con un ángulo de 45°, y sobre una profundidad de cerca de 30 m y una altura de unos 100 metros.

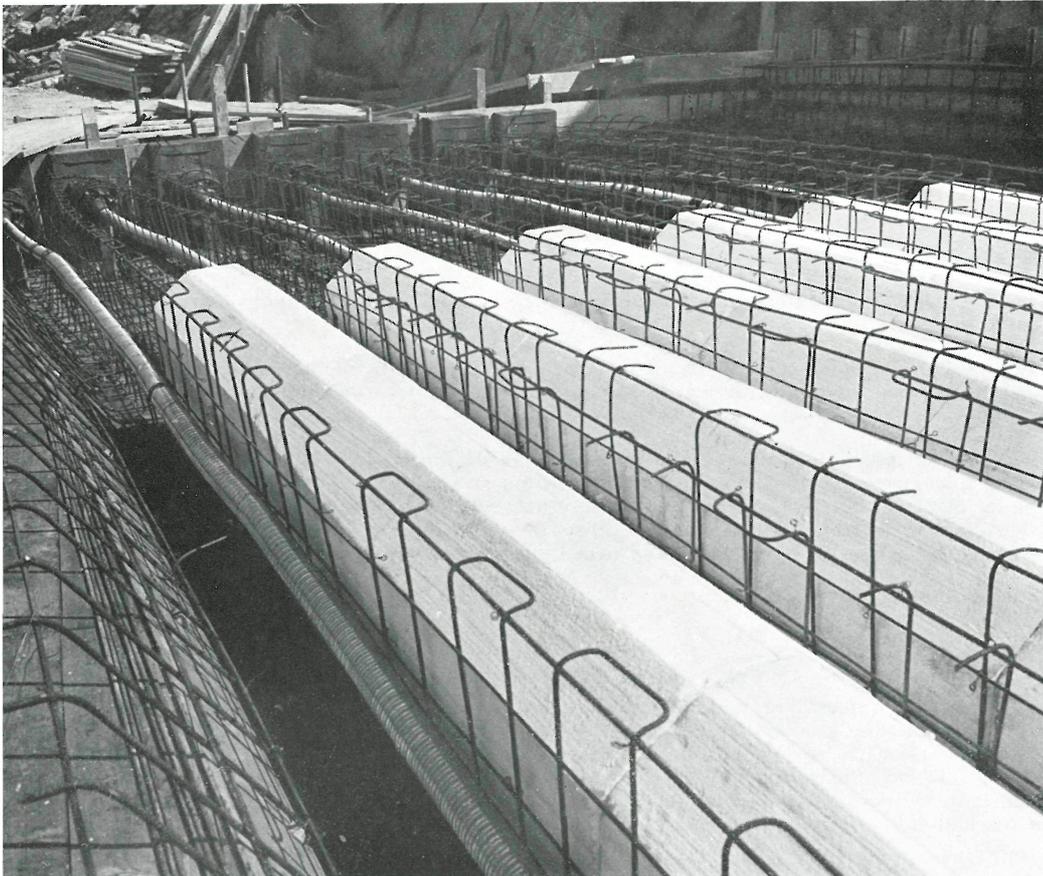
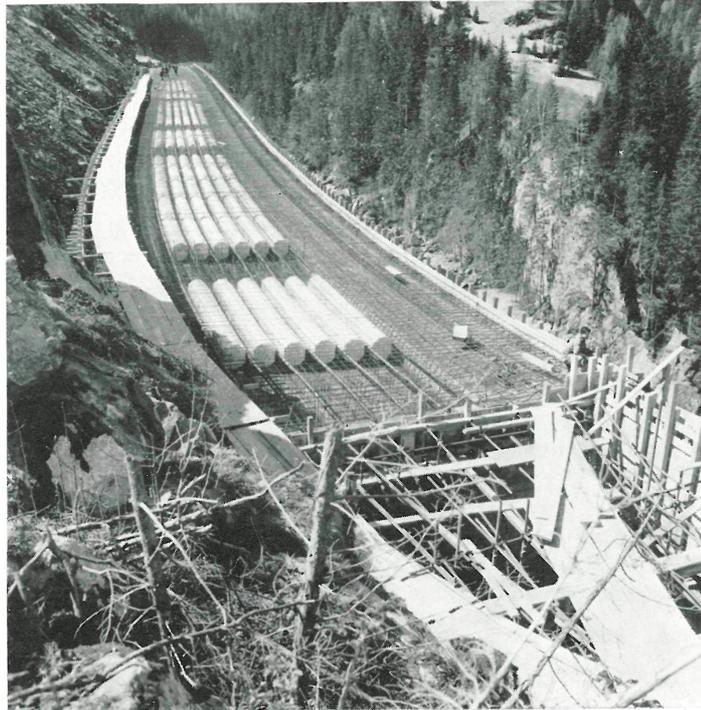
Estas rocas han adquirido una cohesión en el transcurso del tiempo; el material de ligazón consiste, en arenas y limos poco arcillosos depositados por las aguas de escorrentías y de infiltración. La cohesión así obtenida es de 0,5 a 0,6 Mp/m².



IV. Cálculos estáticos

La obra ha sido calculada como marco con soportes oblicuos continuos y de inercia variable para cada una de las 50 secciones transversales estudiadas y para los casos de carga siguientes:

- a) peso propio;
- b) sobrecarga uniforme móvil;
- c) sobrecarga concentrada móvil;
- d) variación uniforme de temperatura, diferencias con relación a la temperatura media, $+15^{\circ}$ a -25° C;
- e) variación de temperatura lineal de 5° C entre las caras superior e inferior del tablero;
- f) efecto de una fuerza de frenado de 30 Mp;
- g) efecto de un descenso de apoyo de 2 cm;
- h) efecto de una fuerza de pretensado variable (teniendo en cuenta las pérdidas por rozamiento).



Dado que el sistema es hiperestático de orden 21, todos los cálculos han sido efectuados con una máquina electrónica.

Además de los momentos flectores, esfuerzos cortantes y esfuerzos normales, la máquina ha calculado las flechas, los giros de los diversos apoyos y los alargamientos y acortamientos de los diversos elementos del marco, datos todos necesarios para el dimensionamiento de los apoyos móviles.

El programa utilizado (IBM-STRESS: resolución de sistemas de estructuras de ingeniería) considera cada elemento comprendido entre dos secciones como una barra de características mecánicas conocidas (superficie, momento de inercia, módulo de elasticidad, etc.), unida a otras barras de una manera a definir (empotrada, articulada, continua).

El sistema puede ser espacial, y las deformaciones de segundo orden debidas a los esfuerzos normales y cortantes son tenidos en cuenta en la resolución del sistema hiperestático.

La suma de los momentos extremos producidos por los casos de carga *a*), *b*) y *c*) conducen a las leyes de momentos (fig. 5) (solamente se han reproducido las leyes de momentos para el tablero). Es interesante hacer notar, a la derecha de los apoyos, la disimetría de las leyes debida a la fuerte inclinación del tablero. En el momento del cálculo de las secciones transversales del tablero, ciertas secciones cerca de los apoyos, que pueden estar solicitadas por un momento negativo o positivo, han sido dimensionadas admitiendo un hormigón parcialmente pretensado.

Nos parece interesante destacar algunas ventajas e inconvenientes del sistema estático estudiado:

A) Las cargas que actúan sobre los apoyos móviles, así como los desplazamientos lineales y giros de éstos son pequeños con relación a la importancia de la obra, de donde los apoyos y juntas de calzada son económicos. Por ejemplo, el apoyo 0 (fig. 5) sufre los desplazamientos y esfuerzos siguientes:

— por aumento de temperatura de 15° C	+ 10,5 mm;
— por disminución de temperatura de 40° C	— 28 mm;
— por efecto del peso propio	— 7,2 mm;
— por efecto de las sobrecargas móviles	± 10 mm;
— por efecto del pretensado	— 50 mm.

Si se compensa el efecto de acortamiento debido al pretensado y al peso propio por una puesta en equilibrio de los apoyos algún tiempo después de la puesta en tensión definitiva de la obra, se obtiene:

— desplazamientos extremos	+ 13,3 mm — 38 mm;
— máximo giro	0,03;
— carga máxima	140 Mp;
— carga mínima	50 Mp.

B) La fuerza de frenado es fácilmente absorbida por las empalizadas oblicuas y los momentos de flexión resultantes son pequeños.

C) Un descenso del apoyo tiene influencia en unos 60 m para un tablero con inercia correspondiente a una luz de 25 m, puesto que los puntos de apoyo de pequeñas luces entre soportes descienden obligatoriamente en conjunto.

D) El sistema es sensible a toda causa, provocando una variación de longitud en el tablero; variaciones de temperatura, retracciones, fluencias, etc. La figura 6 nos muestra el efecto de un aumento uniforme de temperatura de 20° C y el de una variación de temperatura entre las caras superior e inferior del tablero de 5° C. Por ejemplo, en la sección 9, un descenso de temperatura de 25° C aumenta el momento máximo negativo en un 26 %, y, además, provoca una tracción de 42 megapondios.

V. Pretensado

Como hemos mencionado, la obra está pretensada, en el sentido longitudinal, por 7 cables V.S.L. de 22 hilos de media pulgada, cada uno con una tracción de 264 Mp ($0,715 \beta_2$), después del blocaje de los pasadores. Estos cables tienen 144,60 m de longitud; y para disminuir las pérdidas por rozamiento, las vainas de tipo ondulado han sido revestidas interiormente con laca, a base de teflon, colocada en dos capas. De esta manera, el coeficiente de pérdidas por rozamiento habitual $\mu = 0,22$ a $0,20$ ha sido reducido a $0,10$. Las pérdidas efectivas han sido controladas en las diferentes etapas de puesta en tensión midiendo los

desplazamientos de los cables a la derecha de tres ventanas situadas en los puntos altos de éstos, así como en las dos extremidades a la derecha de los anclajes móviles. En todos los casos, los alargamientos medidos han sido iguales o superiores a los calculados.

Angulo de desviación total, interviniendo en la fórmula las pérdidas por rozamiento:

$$T_x = T_0 \cdot e^{(\mu\alpha + kt)} ;$$

$$\alpha = 116^\circ 30' ;$$

- la puesta en tensión parcial: después de 14 días;
- la puesta en tensión definitiva: después de 50 días.

La utilización de una vaina no tratada habría necesitado un esfuerzo de tesado suplementario del 12 %, en los anclajes móviles, para obtener la misma tensión en el punto «medio» del cable.

Los cálculos del pretensado y de los momentos hiperestáticos que produce han sido efectuados para varios trazados de cables y para 50 secciones características del tablero. Una interpolación ha permitido el trazado de las posiciones extremos posibles del cable para cada sección (fig. 7).

Tal cálculo ha sido realizado ventajosa y rápidamente por un ordenador. El gráfico que resulta da una buena imagen de las «posibilidades» de cada sección, fijada una escala realista de las tolerancias a prescribir al contratista para la exactitud del trazado de los cables.

VI. Ejecución de los trabajos

Las diferentes etapas de la construcción se pueden resumir así:

- 1) Apertura con máquina de un corte en el flanco de la ladera a lo largo de toda la longitud de la obra; situado en los echadizos a nivel de los zócalos de soporte de los pilares, este corte permitía la circulación de cantera y la construcción de cimentaciones del andamiaje todavía visible en la figura 1.
- 2) Entibación parcial del pie de talud así creado; este talud se mantiene estable bajo un ángulo de 60° por la cohesión antes mencionada, pero con una seguridad próxima a 1,0.
- 3) Construcción del estribo y pilar del lado de Finhaut sobre la roca y construcción de los pozos para la cimentación de los pilares en los echadizos. Estos pozos han sido excavados con máquina, blindados por medio de cimbras y planchas metálicas en escalón, hormigonados después de etapas retirando el blindaje:

- diámetro exterior 3 m;
- profundidad 8 m;
- excavaciones 95 m³;
- hormigón CP 300 70 m³;
- encofrado interior 50 m²;
- armaduras $\left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ Mp;} \\ 28,60 \text{ kp/m}^3. \end{array} \right.$

- 4) Montaje del andamiaje tubular y hormigonado de los pilares en V:

- por pilar:
 - longitud media 11 m;
 - anchura variable de 3,90 a 3 m;
 - espesor 40 cm;
 - armadura $\left\{ \begin{array}{l} 31 \text{ kp/m}^2; \\ 77,5 \text{ kp/m}^3; \end{array} \right.$

- andamiaje:
 - de tipo tubular en abanico;
 - gatos de descimbramiento de rosca en cabeza de cada tubo;
 - tubos \varnothing 60 mm; espesor 4 mm;
 - longitud entre nudos: máx. 1,8 m;
 - máxima carga centrada admitida: 5 : 5 Mp.
- 5) Encofrado del tablero, cableado, fijación de los vaciados cilíndricos de espuma de polystyrol y hormigonado del tablero en una sola etapa por medio de un silo de hormigón y un juego de cintas de 70 m de longitud:
 - hormigón del tablero { 737 m³;
0,51 m³/m²;
 - vaciados de polystyrol { 185 m³;
0,13 m³/m²;
 - encofrado 1,255 m²/m²;
 - armadura ordinaria { 37,5 Mp;
26 kp/m²;
50,9 kp/m³;
 - cables del pretensado { 16,3 Mp;
11,3 kp/m²;
22,1 kp/m³;
 - fijación de los cables de pretensado a la armadura de conjunto del tablero por barras de \varnothing 9 milímetros soldadas a lo ancho de los estribos de los nervios (fig. 9);
 - colocación de los hierros inferiores y de los estribos de los nervios; los cables han sido colocados desde el espacio libre dejado entre los nervios;
 - fijación por soldadura de las barras inferiores (\varnothing 10 cada metro), atravesando el espacio entre los nervios sobre los cuales se han colocado los elementos de vaciado en polystyrol; el levantamiento de estos elementos por efecto del empuje de Arquímedes del hormigón fresco queda impedido por una nueva serie de barras como las precedentes y no ha sido necesaria ninguna otra de fijación, aceptándose la circulación normal de los obreros sobre los elementos en polystyrol; en el curso del hormigonado el levantamiento máximo de los elementos ha sido de 5 milímetros.

VII. Costo de la obra

La obra descrita fue presupuestada en 620.000 francos suizos, o sea, 430 francos/m², sin incluir los gastos de estudios.

Las empresas EVEQUOZ and Cie. y PAPILLOUD and Fils, Pont-de-la-Morge/Valais, se quedaron con la subasta, por 637.000 francos.

Calculando en % el costo total, los diferentes elementos de la construcción representan:

	%
— instalación de cantera	5,3
— cimentaciones (pilares y estribos)	18,6
— pilares + estribos	6,7
— andamiajes	14,7
— encofrados del tablero	7,3
— tablero (hormigón + aceros + pretensado)..	38,2
— acabados, estanquidad, juntas, correderas, apoyos, etc.)	9,2
	100,0

Nos queda agradecer aquí al Departamento de Obras Públicas del Cantón de Valais; a su jefe, Sr. E. von Roten, Consejero de Estado, y a su ingeniero en jefe, Sr. G. Magnin, por su confianza atribuyéndonos este cometido y por sus valiosos consejos y colaboración.

résumé ● summary ● zusammenfassung

Pont de Trouléro - Suisse

L. Gianadda et U. Guglielmetti, ingénieur diplômé EPUL-SIA

A la suite de la décision prise par les autorités cantonales et la direction de l'électricité d'Emosson, S. A., de construire une route d'accès, il a été nécessaire de procéder à l'exécution d'un ouvrage de maçonnerie, le pont de Trouléro, capable de franchir des terrains de remblai rocheux en état d'équilibre limite situés sur un versant.

L'ouvrage construit, de 140 m de long, est un pont ayant des supports obliques en béton armé et pré-contraint.

La durée des travaux a été de trois ans et leur coût dépasse la somme de 620.000 francs suisses.

Trouléro Bridge. Switzerland

L. Gianadda & U. Guglielmetti, EPUL-SIA diploma engineers

When it was decided by the local authorities and the Emosson, S. A., electricitiy firm to build an access road, it became necessary to construct a bridge at Trouléro, to go over rocky fill material which covered a mountain side, in a limiting state of unstable equilibrium.

The bridge is 140 m long, and rests on oblique reinforced and prestressed concrete supports.

The completion of this project has taken three years, and it has cost over 620,000 Swiss Francs.

Trouléro Brücke - Schweiz

L. Gianadda und U. Guglielmetti, Diplom Ingenieure EPUL-SIA

Da der Bau einer Zufahrtsstrasse von den Kantonsbehörden und der Direktion von Emosson, S. A., genehmigt wurde, wurde der Bau der Trouléro Brücke notwendig, die den Weg über einen Abhang mit Felsengeröll freigibt.

Die Brücke hat eine Länge von 140 m und schräge Pfeiler aus Stahl- und Spannbeton.

Die Bauarbeiten erstreckten sich über drei Jahre und die Kosten beliefen sich auf über 620.000 SFrs.