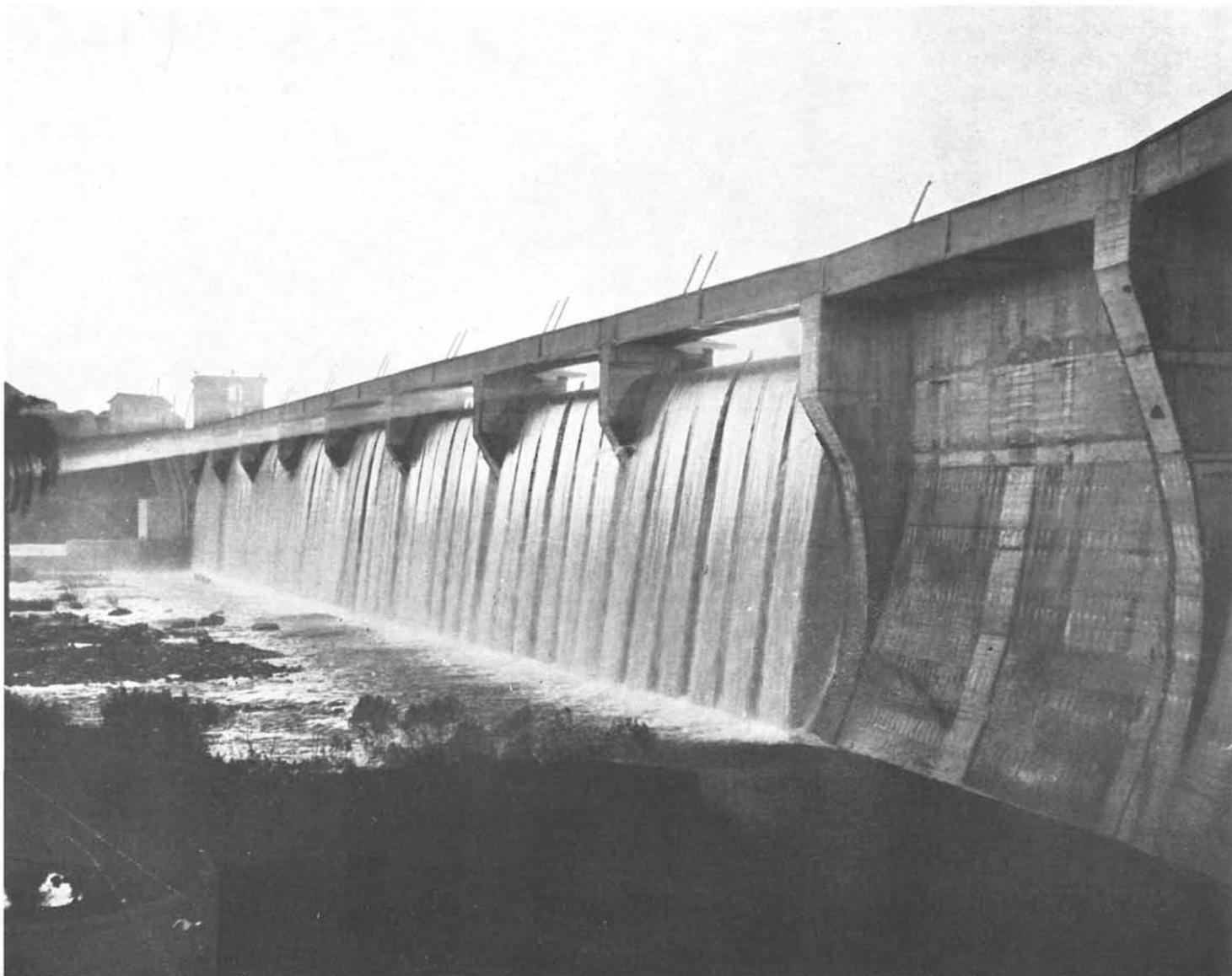


531 - 31

ernestina

ALFREDO PÁEZ, *ingeniero de caminos*

Ernestina no es alta. Decir que es baja sería cometer una falta de galantería.
Sus proporciones son armoniosas y su línea muy esbelta.
A la gracia de su encanto juvenil une su elegancia sobria,
un tanto cimbreña.



La primera vez que oí hablar de ella fué a los diez días de haber llegado a Pôrto Alegre, la bella ciudad gaúcha del más meridional de los Estados del Brasil. Al terminar mi octava conferencia, un grupo de ingenieros de la Comisión Estatal de Energía Eléctrica, corteses, como saben serlo los brasileños, me invitaron a que visitase las oficinas de su departamento, situado en uno de los rascacielos del centro de la ciudad.

Allí es donde vi fotografías de Ernestina.

También Brasil tiene sus problemas en el suministro de energía eléctrica. Su rápido desenvolvimiento y el ritmo de vértigo de su crecimiento industrial, hacen que la demanda supere a la oferta.

El plan para el aprovechamiento progresivo de los ríos Das Antas, Jacuí, Tacuari, Guaporé y Prata, está en marcha. Caudalosos para nuestra escala, y algo retozones, sus travesuras son peligrosas como las bromas de un coloso.

Para dominarlos es preciso regular sus cabeceras, y para conseguirlo hay que internarse. Trece embalses están funcionando y sus centrales en servicio o en construcción.

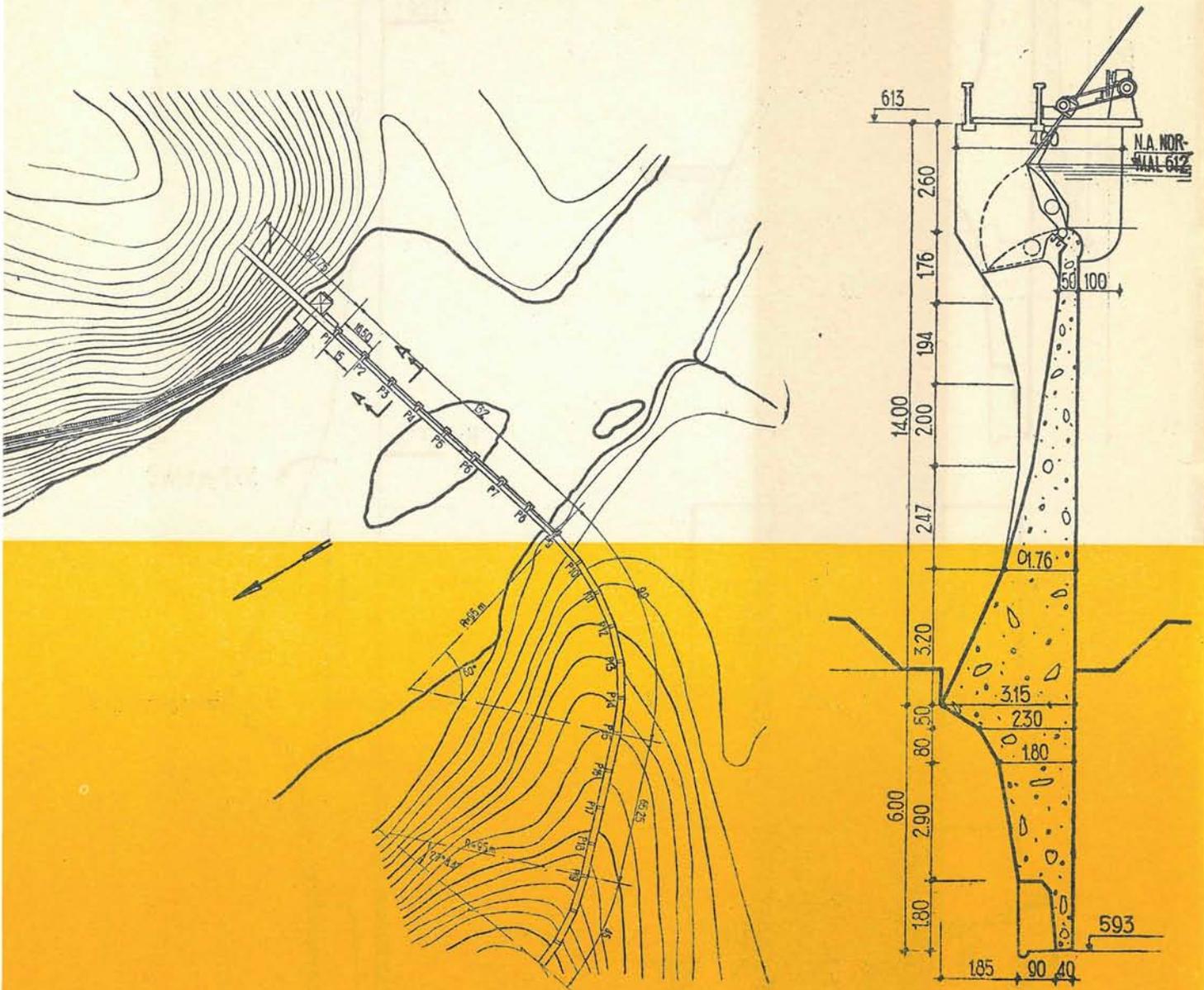
Desde la proclamación de su independencia con el Grito de Ipiranga, Brasil vive en el presente las horas más brillantes de su historia. El esfuerzo que realiza hacia la industrialización y el progreso, puede convertir lo que hoy es sólo promesa en la realidad fecunda de una fabulosa prosperidad. Sus ocho millones y medio de kilómetros cuadrados de tierra fértil, la inmensidad de sus posibilidades petrolíferas y la riqueza incalculable de su subsuelo le convierten en el país de más alto potencial.

Y allí, a trescientos kilómetros de Pórtó Alegre, hacia el interior, está Ernestina.

Situada en el municipio de Passo Fundo, su misión fundamental consiste en regular el río Jacuí en su cabecera. Con sólo 15 metros de altura, se embalsan 258 millones de metros cúbicos. Una conducción forzada alimenta la central. La potencia del salto es de 4.200 kW.

La Comisión Estatal de Energía Eléctrica redactó un primer proyecto. En éste, la presa era del tipo gravedad, ligeramente arqueada. Adjudicado el concurso a las empresas Estacas Franki y Campenon Bernard, se aceptó la variante propuesta en hormigón pretensado.

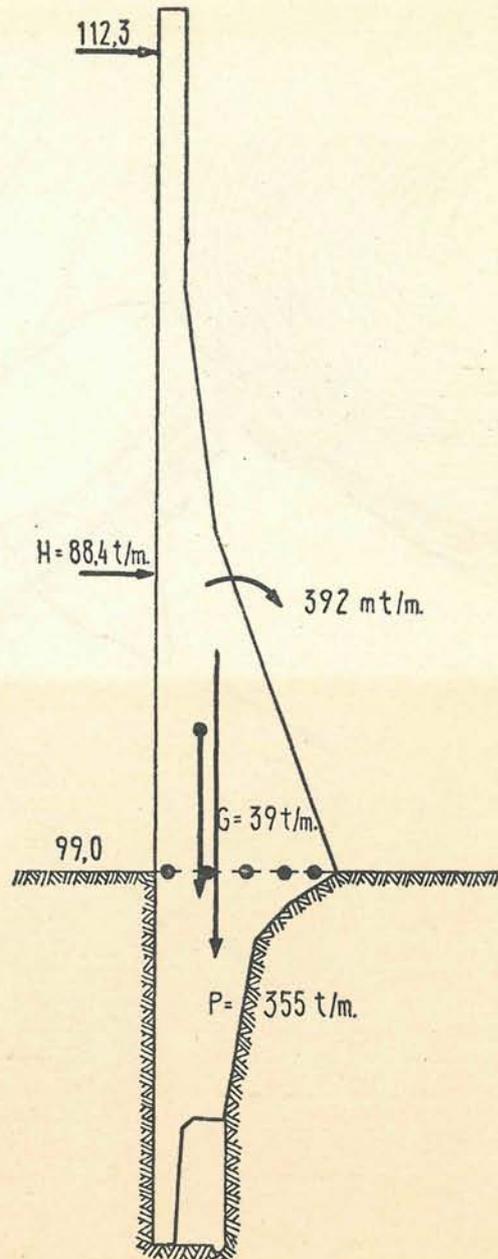
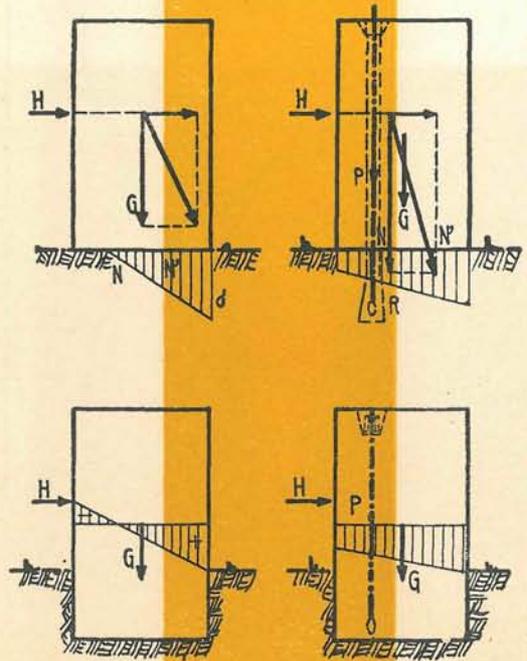
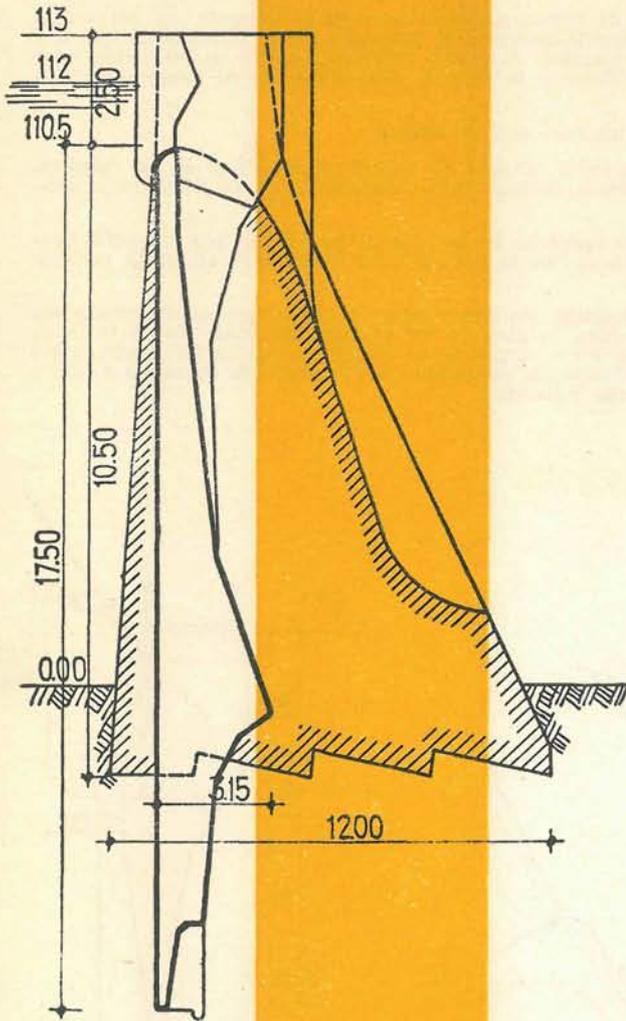
La solución adoptada constituye, según mis noticias, un prototipo sin precedentes. No creo que exista otra presa parecida. Proyectada, desde el principio, en hormigón pretensado, la obra es un conjunto de pantallas de 15 m de longitud y 13 m de altura máxima, sobre el suelo, empotradas, como ménsulas verticales, en el macizo basáltico del terreno. El hormigón de las pantallas está vertical y longitudinalmente pretensado por la acción de los cables de acero especial, dispuestos en forma de malla según las dos direcciones indicadas.



Esquemas comparativos de las secciones transversales de las soluciones pretensada y de hormigón armado.

Esquemas de esfuerzos.

Ocho compuertas de sector, de 15 m de longitud, regulan el aliviadero de superficie. La zona sin vertedero, hasta completar los 400 m de desarrollo, está igualmente constituida por esbeltas pantallas pretensadas, separadas unas de otras por delgados contra-fuertes o pilares de 1,50 m de longitud.



si se quiere que, a embalse vacío, la sección continúe trabajando en compresión.

El esfuerzo de pretensado de 355 mt se ejerce mediante 18 cables, de 12 alambres de 5 mm, anclados en el hormigón de la base de la presa, por medio de bucles, y sujetos por conos de anclaje a diversas alturas del paramento de agua abajo. Estos cables se enfundan en una vaina metálica muy delgada que permite el libre movimiento de los mismos, respecto al hormigón, durante su tesado. Los cables van sometidos a una tensión inicial de 100 kg/mm², que, debido a los fenómenos de relajación, etc., se prevé ha de descender a unos 85 kg/mm². En su estado final, por consiguiente, cada cable ejercerá un esfuerzo de 20 t. En las secciones situadas por encima del empotramiento el esfuerzo de pretensado se va disminuyendo progresivamente, anclándose, para ello, los cables a diferentes alturas del paramento de agua abajo.

El anclaje de los cables en el suelo se ha dispuesto de forma que sólo existan tres por metro, con el fin de disminuir la presión horizontal contra la roca en el empotramiento. Si la roca hubiese sido de peor calidad, podría haberse aumentado aún más este efecto.

Las tensiones previstas para el hormigón son siempre muy bajas, bajo cualquier hipótesis de carga, alcanzándose, como máximo, 24 kg/cm².

Aun cuando esta presa es, relativamente, de poca altura y pequeño volumen, el proyecto fué estudiado con todo detalle, con arreglo a la más moderna técnica, tanto en su aspecto estructural como en el hidráulico.

El Departamento de Obras de Saneamiento examinó detenidamente todos los detalles del proyecto, exigiendo aclaraciones y comprobaciones que motivaron, entre otros estudios, la construcción de un modelo reducido para el análisis de su comportamiento hidráulico.

En el tipo de presa proyectada, la lámina de agua del vertedero choca contra la roca del fondo de agua abajo. El Director del D. N. O. S. estudió personalmente el problema y sugirió que se considerase la conveniencia de inclinar el paramento de la presa, para guiar la lámina de agua, adoptando para el paramento de agua abajo el clásico perfil Creager.

La solución es perfectamente posible y puede ser la más conveniente en muchos casos. El peso propio de la presa se traslada hacia el paramento de agua arriba, a favor de la estabilidad. Las condiciones hidráulicas, en cuanto a salida de la lámina de agua, mejoran también notablemente.

Sin embargo, debido a la inclinación progresiva hacia arriba de la resultante del empuje hidrostático, el coeficiente de seguridad en el empotramiento de la roca contra el desprendimiento de un bloque de la misma tiende a disminuir, razón por la cual se decidió mantener el proyecto inicial con el paramento vertical, y realizar un estudio, sobre modelo reducido, del comportamiento de la roca de agua abajo, bajo la acción de la lámina de agua. El ensayo fué realizado por el Laboratorio de Hidráulica de Neyrpic, en Grenoble, comprobándose que tal comportamiento era totalmente satisfactorio.

Materiales y utillaje utilizados en el hormigonado de la presa

Como ya se ha indicado, la construcción de la presa Ernestina ha exigido el empleo de cerca de 8.000 m³ de hormigón. Para la producción de todos los áridos necesarios (arena y grava) se eligió una cantera situada a unos 500 m de la presa, agua abajo de la misma. Aunque no era una cantera de excepcional calidad, fué escogida teniendo en cuenta que era la única existente en las proximidades de la obra y el volumen, relativamente pequeño, de piedra necesario. La roca presentaba numerosas grietas y frecuentes interposiciones de capas francamente descompuestas que dificultaban mucho el trabajo de perforación, el cual debía realizarse con gran cuidado para evitar el constante embotamiento e, incluso, la rotura de las brocas. Por el mismo motivo, se imponía una cuidadosa selección para poder obtener un árido perfectamente sano.

A efectos de estabilidad, una presa de gravedad puede estar representada por la ejecución de un bloque o macizo capaz de resistir, por su propio peso, el empuje horizontal del agua.

Este bloque, supuesto apoyado en su base, sólo será estable cuando la resultante de las dos fuerzas que sobre él actúan pase por el interior de su superficie de apoyo.

Si, para conseguir la impermeabilidad requerida, se desea que todas las reacciones verticales sean de compresión, será necesario que la resultante de los empujes hidrostáticos horizontales y de los verticales debidos al peso propio, pase por el interior del núcleo central de la sección que se considera.

Salvo en el caso de presas de extraordinaria altura, las tensiones de compresión, deducidas por medio de un cálculo planteado con arreglo a estos principios, son sumamente débiles. Anuladas las tracciones verticales mediante un apropiado dimensionamiento, las compresiones apenas alcanzan las decenas de kilogramos por centímetro cuadrado. Como la resultante, tanto a embalse lleno como a embalse vacío, se mantiene siempre dentro del núcleo central, los valores que se deducen están muy lejos de agotar la resistencia del hormigón en compresión.

Margen engañoso de sobrada seguridad.

Bastará un débil incremento de las presiones horizontales por la presión de limos o materiales de acarreo para que pronto aparezcan tensiones de tracción, se rebase la resistencia del material a este tipo de esfuerzos y, roto el enlace, se desarrollen importantes compresiones en la estrecha zona que queda entre el punto de paso de la resultante y el borde del paramento. Si la resultante se sale fuera de la base, la presa vuelca, si antes no ha deslizado.

Para evitar el vuelco habría que aumentar la carga vertical, único sistema para llevar la resultante dentro de la base. Pero el peso propio, torpe, egoísta, indiferente a la catástrofe que se avecina, no sabe sobreponerse a las circunstancias adversas.

Las armaduras son más nobles. Tienen un sentido de la colaboración que le falta al peso propio. Femeninas, aceptan las tareas que el varón soporta mal y cuando llegan los momentos difíciles no se quedan atrás. Redoblan su esfuerzo y, aferradas al hormigón, luchan por restablecer el equilibrio apoyándose en su compañero.

Mientras los empujes horizontales no superan las cargas previstas, la pantalla pretensada de Ernestina se mantiene en un régimen de compresiones horizontales y verticales. La fisuración, tanto vertical como horizontal, está impedida. El esfuerzo se mantiene prácticamente constante cuando varía el nivel del embalse.

Si por una circunstancia imprevisible aumentan los empujes horizontales, se produce la fisuración. Con inteligente instinto, la armadura se pone en guardia y con ahínco incrementa su esfuerzo y su ayuda.

★

Empotradas en el macizo rocoso del terreno de cimentación, las pantallas de Ernestina resisten, como ménsulas, la carga horizontal ejercida por la presión hidrostática.

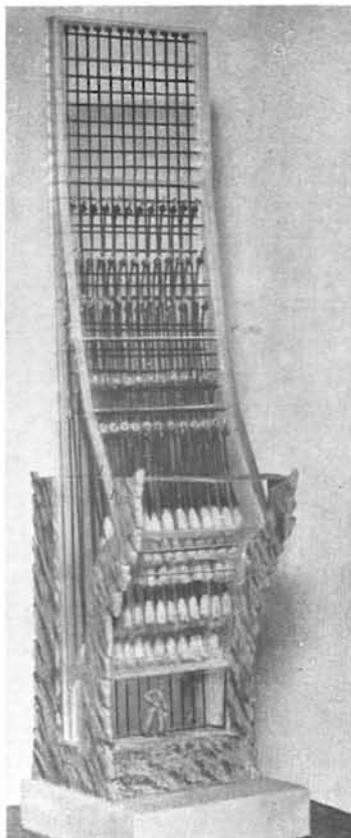
Los cables verticales de pretensado, situados en las proximidades del paramento de agua arriba, comprimen dicho borde anulando las tracciones creadas por la flexión producida por el empuje horizontal del agua. El reducido margen de compresiones excedentes se modula de tal modo que la condición de Levy quede también satisfecha.

A embalse lleno, el momento producido por el empuje hidrostático es de 392 mt, lo que hace que el punto de aplicación de la resultante se traslade cerca de 10 m hacia el paramento de agua abajo.

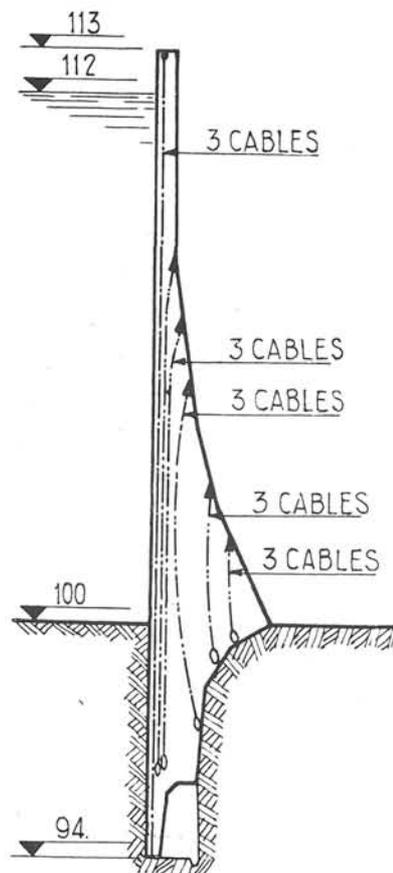
Con el fin de que la resultante pase por el interior del núcleo central, con una excentricidad de 0,52 m (o de 0,475 m, si se quiere cumplir la condición de Maurice Levy), se hace necesario ejercer un esfuerzo vertical suplementario de 355 mt con una excentricidad de 0,51 m, que no debe ser sobrepasada



disposición de cables



maqueta



sección transversal

Lateralmente, el muro se completa con dos estribos de perfil gravedad en un desarrollo de 55 m. Los pilares-contrafuertes entre pantallas no tenían otra misión que la de servir de apoyo a la pasarela de coronación, constituida por vigas también de hormigón pretensado.

La sección transversal de las pantallas es impresionante: 0,5 m de espesor a la altura del aliviadero, y 3,15 m de espesor máximo en el centro del valle, cuando su altura sobre cimientos es de 17 m. Frente a los 170 m³ de hormigón por metro lineal, exigidos por una solución de tipo presa-gravedad, Ernestina sólo tiene 25 m³ por metro lineal, es decir, el 17 % del hormigón requerido por la solución clásica.

Decididamente, Ernestina es única.

Rindo homenaje a la Comisión Estatal de Energía Eléctrica por la valentía que supone la aceptación de un prototipo tan atrevido. Ellos han marcado un nuevo rumbo, separándose, con espíritu innovador, de los trillados caminos que brinda la experiencia.

Amables, quisieron conocer mi opinión sobre ciertos problemas que sólo podían enjuiciarse mediante la inspección directa de la presa. Aprovechando el intervalo en mi programa de conferencias, de un fin de semana, salimos, en avión, de Porto Alegre un sábado por la tarde.

En el aeropuerto de Passo Fundo nos esperaba un coche de la Comisión para conducirnos a Ernestina.

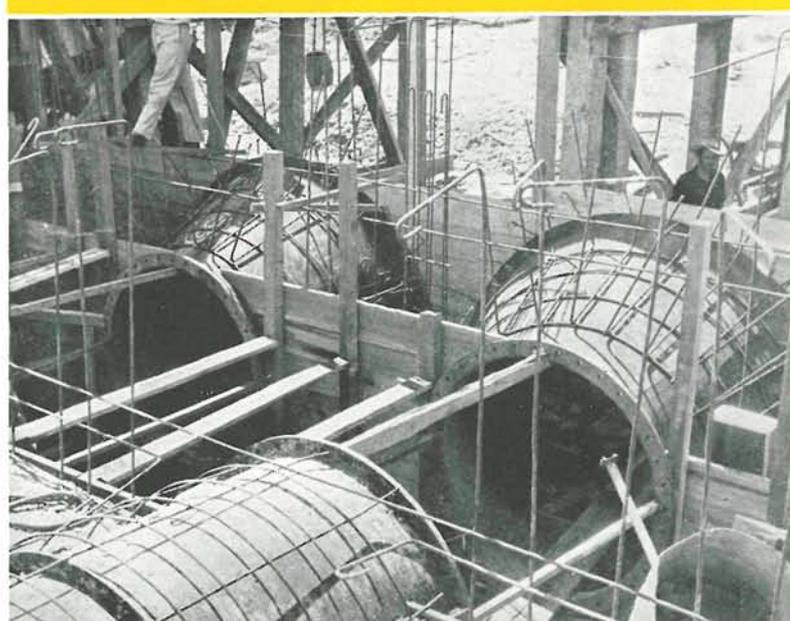
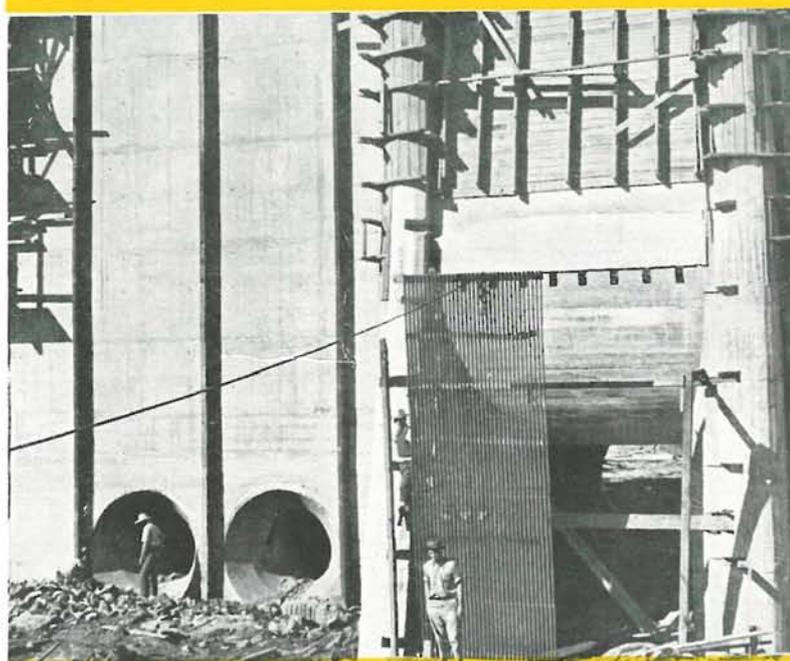
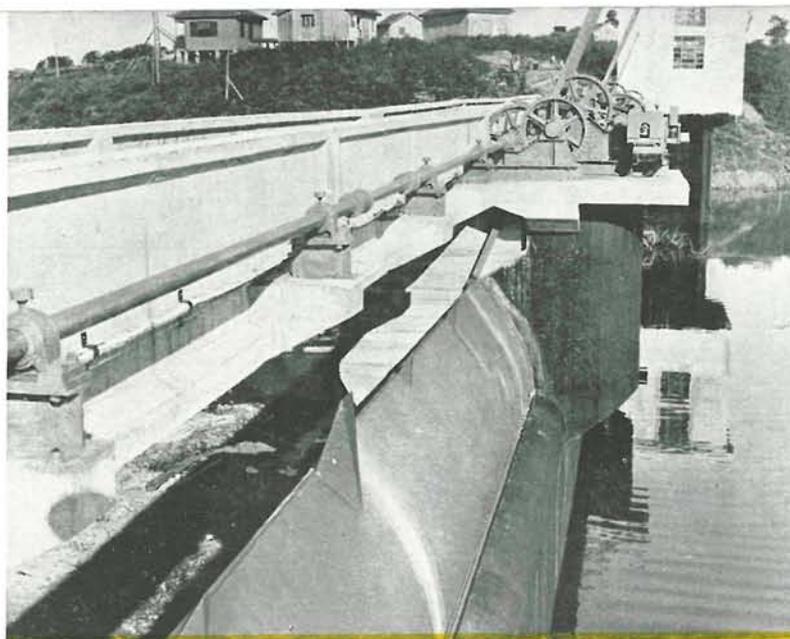
Para un europeo el viaje tenía toda clase de alicientes. Visitar el interior del Brasil es internarse en una región exótica.

La tarde era tibia. El sol templaba el ambiente frío de la estación invernal arrancando tonos dorados de las mimosas en flor. Los pinos brasileños, con su extraño contorno, parecían enormes copas de champagne.

Seguimos una carretera de amplia explanación, pero sin riego asfáltico. Una capa de tierra de múltiples colores ocres, constituía el único firme. El paisaje parecía la obra genial de un pintor impresionista, que hubiese salpicado el lienzo con toda la gama imaginable de ocres y verdes en la más perfecta composición de tonalidades cambiantes.

Algo, sin embargo, me decepcionó. Había leído en algunos artículos periodísticos españoles, que las carreteras brasileñas estaban pobladas de carteles poco tranquilizadores, en los que se leía: "Cuidado con las serpientes." Pero no vi ni unos ni otras.

Compuertas de sector del aliviadero.
Rejilla y válvulas de la toma.



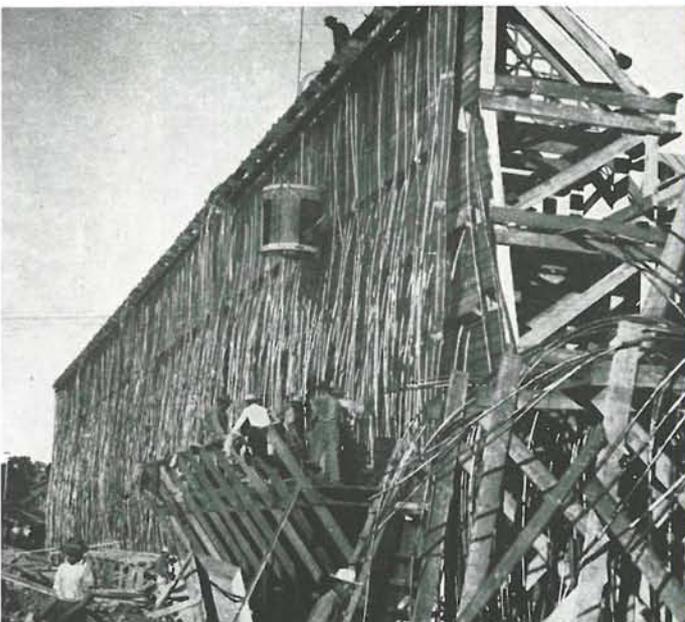


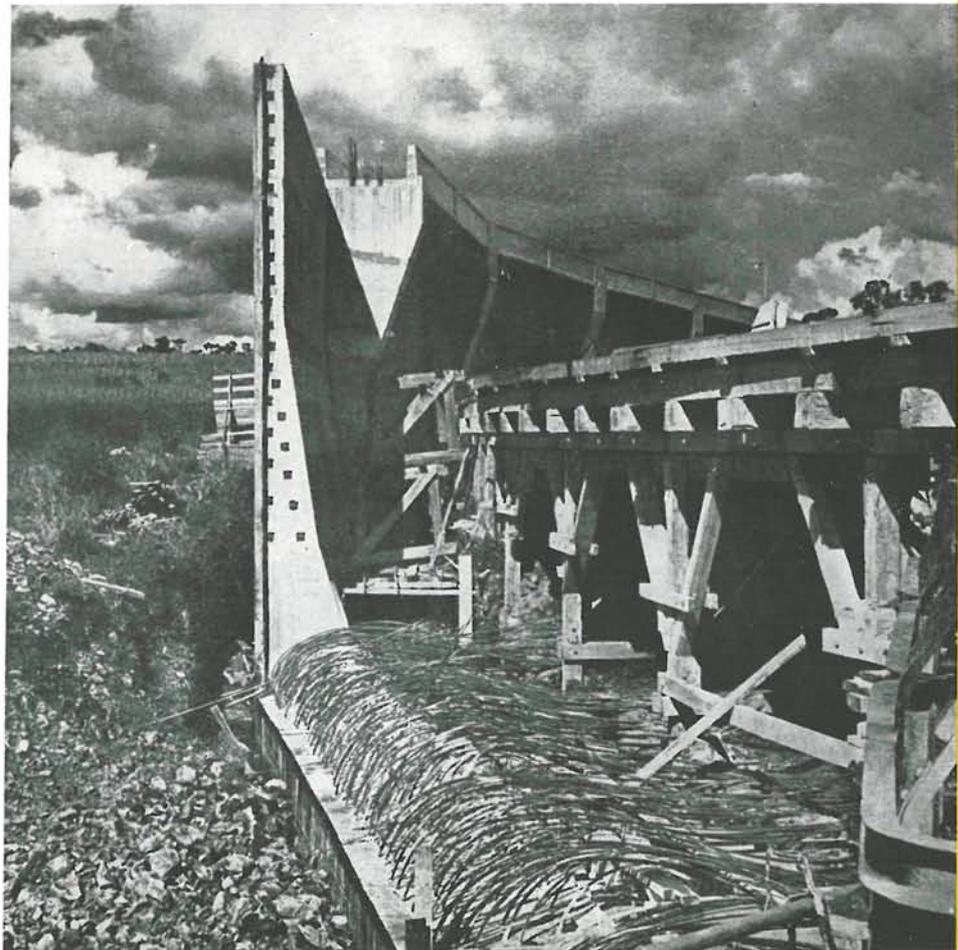
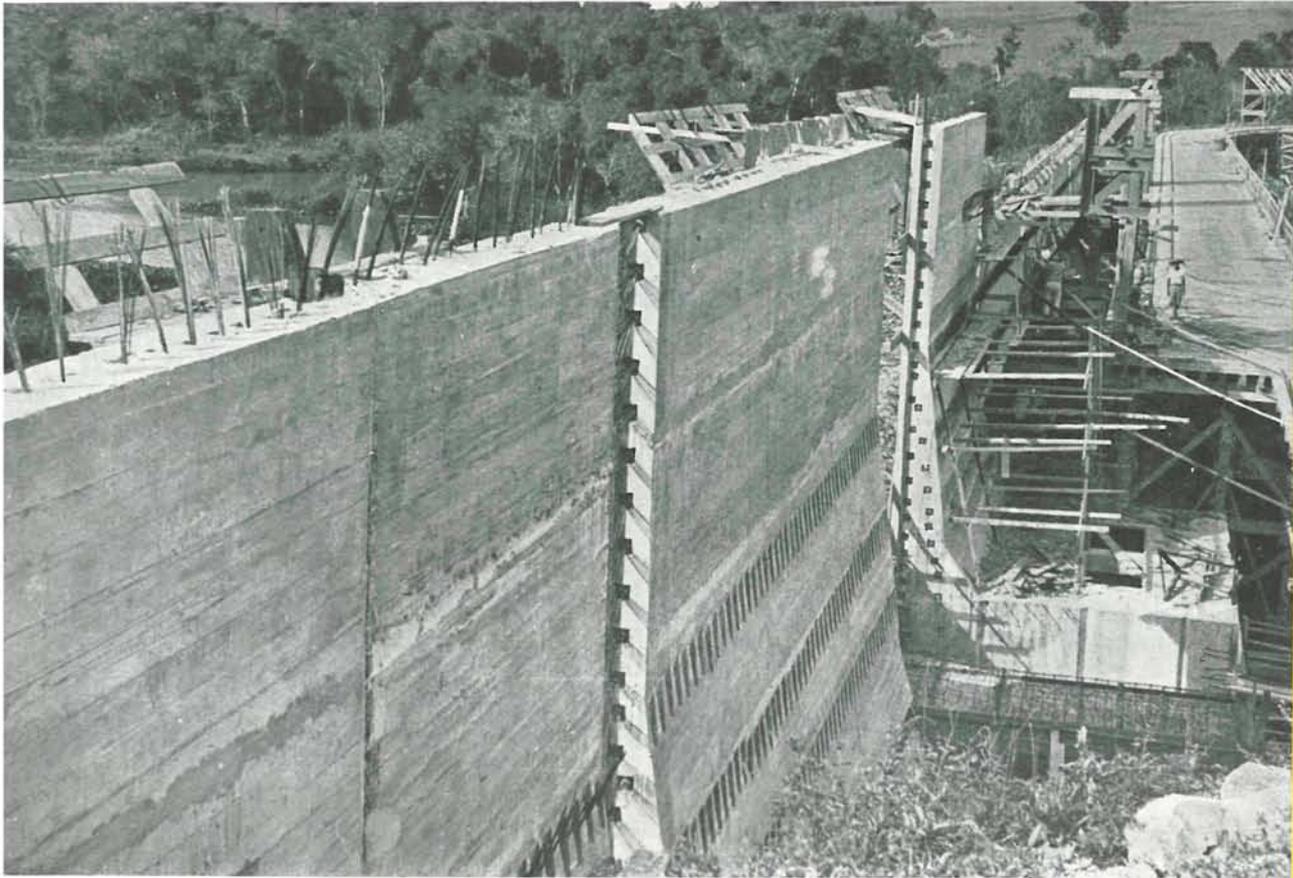
Al principio supuse que la falta de avisos se debía a la ausencia de tan peligrosos reptiles. Pero era más divertido pensar que, por el contrario, era tal su abundancia, que no había quien fuese capaz de detenerse en aquellos parajes cinco minutos para colocarlos. La hipótesis era verosímil; el coche llevaba una velocidad no muy en consonancia con el estado del firme.

No quise preguntar nada. Quise mantener mi incertidumbre para no romper el encanto que siempre acompaña al peligro. Esperaba encontrarme algo así como un cartel con la inscripción: "Cuidado con las s..."

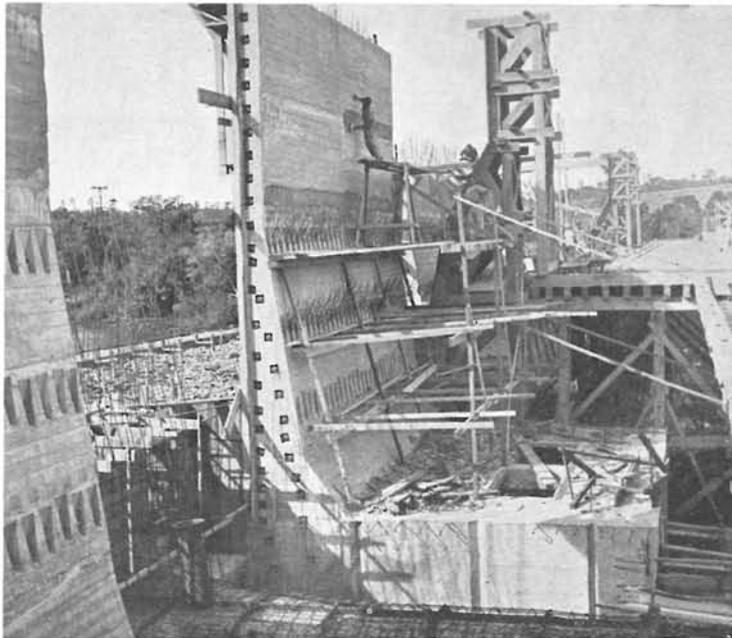
Cuando llegué a Ernestina tuve que aceptar la realidad. No debía haber ni culebras. Todavía sentí un ligero escalofrío, seguido de una desilusión, cuando al bajar del coche me advirtieron: "Tenga cuidado con el perro del guarda. Es muy juguetón."

...as fases de la coloca-
de las armaduras.—
tura de las zanjas para
unclajes.— Hormigonado
s zanjas.—Vistas del en-
lo para las armaduras
retensado vertical.





Dos vistas de las pantallas.



tesado de cables

No pretendo, con este artículo, sentar cátedra de especialista en obras hidráulicas. ¡Dios me libre! Sólo durante cuatro años de mi vida profesional he estado al servicio de empresas hidroeléctricas; razón, más que suficiente, para comprender mi falta de preparación en estos problemas.

Durante esos cuatro años he calculado presas de gravedad, presas bóvedas, azudes, ataguías, centrales, conducciones y chimeneas de equilibrio, pero nunca he tenido ocasión de tantear presas aligeradas ni en bóvedas múltiples.

No pretendo, por consiguiente, exponer una tesis. Sólo intento narrar una visita y hacer unos comentarios, con la esperanza de que alguien, con más categoría y conocimientos que yo, pueda entresacar de estas líneas la información suficiente para deducir unas conclusiones concretas.

Renuncio al desarrollo de un estudio económico comparativo. Aventuro sólo unas cifras-resumen de cubricaciones para que otros lo puedan hacer. Creo que el tema lo merece.

Las presas argelinas de Grands-Cheurfas y Beni-Bahdel son las primeras aplicaciones de la técnica del pretensado a estos tipos de estructuras. En ambos casos el problema era prácticamente el mismo: en el primero, la consolidación de la presa, y en el segundo, el recrecimiento.

Este último constituye uno de los ejemplos más representativos de las ventajas que se deducen de la aplicación del pretensado. Si desde un principio se hubiese proyectado la presa de Beni-Bahdel como simple presa de gravedad, se habrían requerido los siguientes volúmenes:

Hormigón	600.000 m ³
Movimiento de tierras	500.000 m ³

Recreciéndose la presa sin modificación del talud pre-existente y suplementando su estabilidad mediante la introducción del pretensado, los volúmenes empleados fueron los siguientes:

Hormigón pretensado	85.000 m ³
Hormigón no pretensado	50.000 m ³
Volumen total de hormigón ...	135.000 m ³
Acero especial	2.800 t
Acero ordinario	800 t
Movimiento de tierras	250.000 m ³

Una economía de 465.000 m³ de hormigón y 250.000 m³ de excavación, bien compensan 2.800 toneladas de acero especial y 800 toneladas de acero ordinario.

En el caso de Ernestina, las diferencias entre el proyecto primitivo y el realizado fueron las siguientes:

	<i>Presa gravedad</i>	<i>Presa pretensada</i>
Hormigón	24.000 m ³	8.000 m ³
Movimiento de tierras ...	3.000 m ³	3.500 m ³
Acero especial	—	140 t

Técnicamente, las ventajas e inconvenientes de una y otra solución parecen estar equilibrados. Si la balanza se inclina de algún lado, parece ser en favor del hormigón pretensado. Si mal no recuerdo, la presa de Ernestina se terminó hace unos cuatro o cinco años. Cuando la visité, hace unos meses, no observé filtraciones en las pantallas pretensadas.

Distintas fases del tesado de los cables.

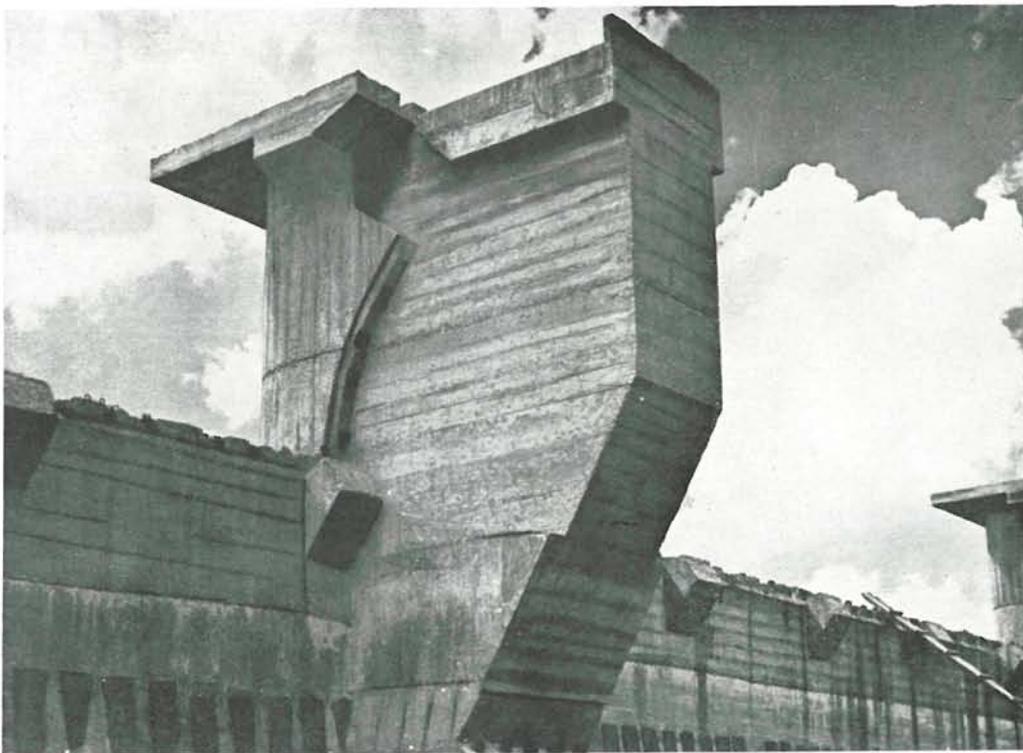


castilletes

Las únicas fugas que pude apreciar en el paramento de agua abajo estaban localizadas en el estribo de la margen izquierda, allí donde el perfil es de gravedad. La presa vertía entonces por los 120 m del aliviadero con las compuertas elevadas, una lámina de unos 30 cm de altura.

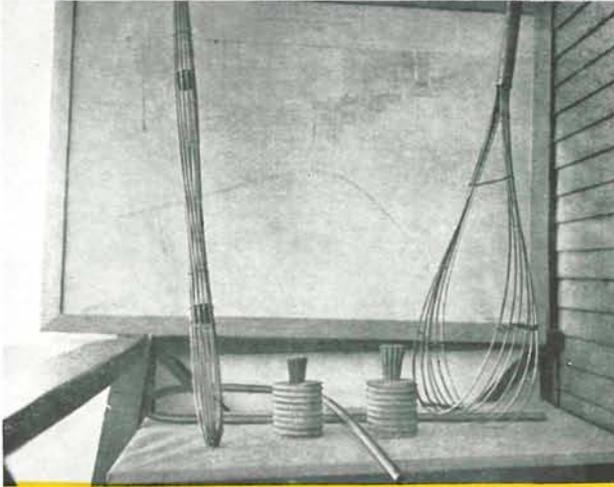
A embalse lleno, las presas de gravedad funcionan bajo un régimen de compresiones verticales, mínimas junto al paramento de agua arriba y máximas en el de agua abajo. Teóricamente, ninguna compresión horizontal impide la formación de una fisura vertical. La retracción del hormigón puede crear en todo caso tracciones, pero no compresiones.

La colocación de armaduras verticales y horizontales y su posterior tesado, crea un estado de bicompresión altamente eficaz para la necesaria estanquidad del muro de contención. Si el pretensado se desarrolla en forma correcta, la impermeabilidad parece asegurada.

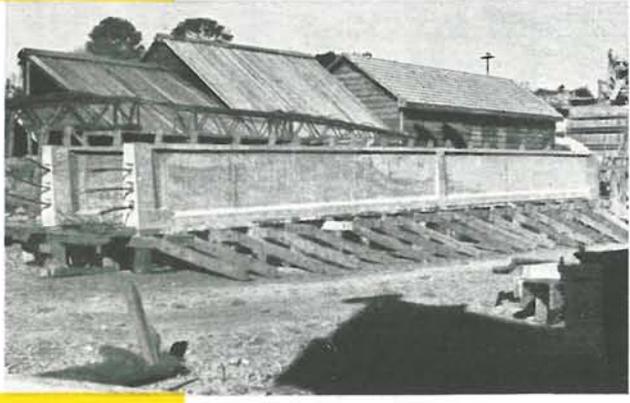
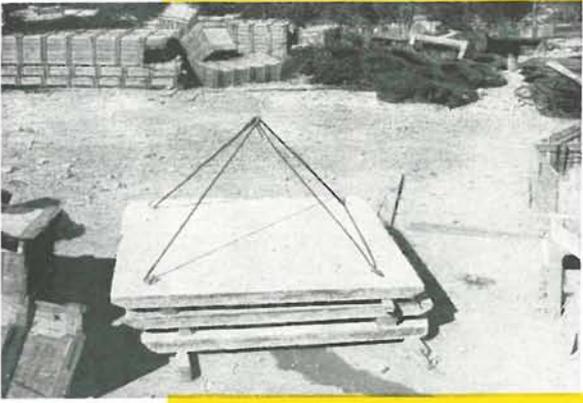
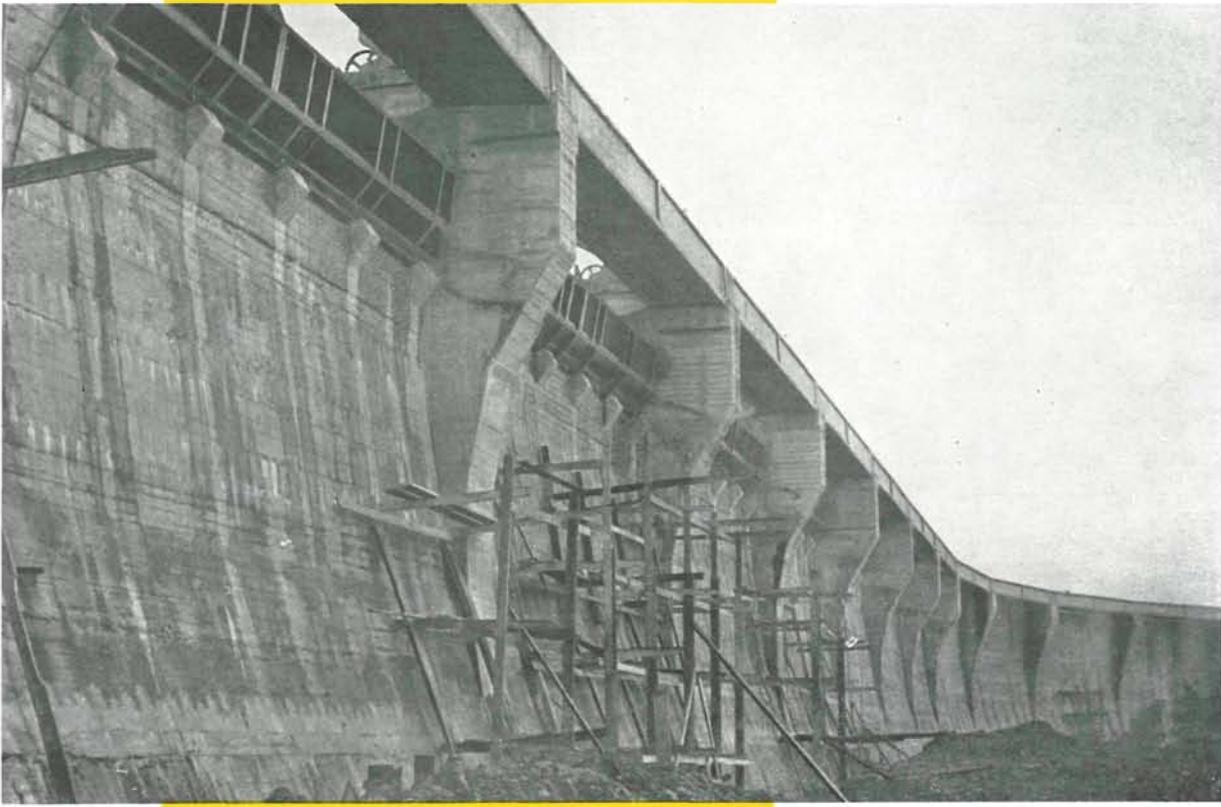


Pasarela de coronación y detalle de uno de los pilares que la sostienen.

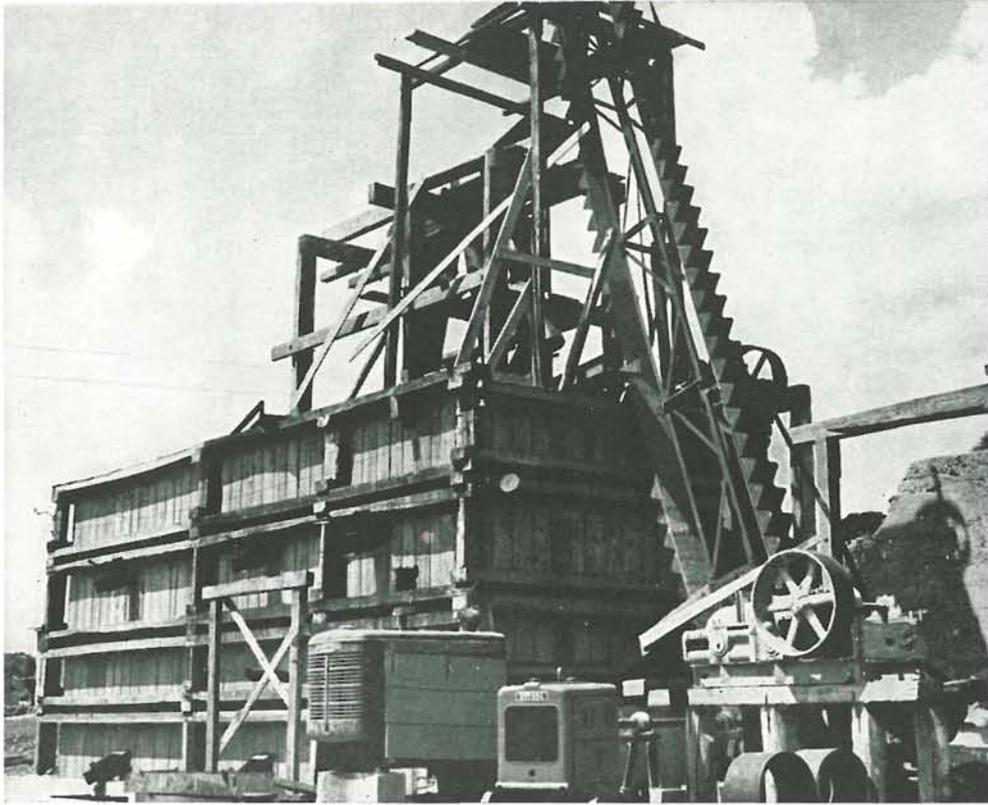
dispositivo de anclaje



Dispositivos de anclaje.
Pasarela de coronación y compuertas.
Placas y vigas prefabricadas
utilizadas para la construcción de la
pasarela.



centrales



Central de machaqueo.

Teniendo en cuenta que el triturador principal de la estación de machaqueo tenía una abertura de 50×90 cm, pudo ser alimentado con piedras, que, en su mayor parte, eran obtenidas directamente mediante una adecuada aplicación de los explosivos.

Los estratos basálticos, fuertemente inclinados, no permitieron la obtención de un frente de ataque vertical, como hubiese sido de desear para la buena marcha de la explotación. Esta se hizo sobre un frente de 100 m de ancho y unos 7 m de altura media.

La piedra extraída de la cantera se transportaba a la estación de machaqueo en camiones-volquete, de $2,5 \text{ m}^3$ de capacidad, que eran cargados mediante una máquina "Duo-Way Scoop", la cual, por su extrema movilidad y sencillez de maniobra, era especialmente indicada para este fin. Con objeto de facilitar este transporte fué preciso construir una carretera de unos 350 m de longitud.

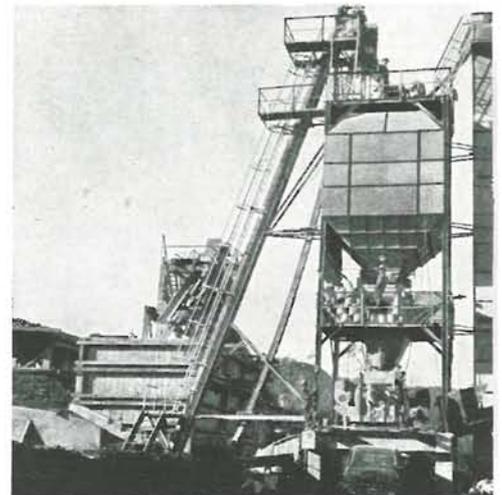
En la estación de machaqueo, el elemento principal lo constituía un triturador de mandíbulas, de 50×90 cm de abertura, provisto de alimentador automático por correa sin fin. La piedra procedente de la cantera sufría aquí una primera trituración y después pasaba por una criba vibrante. Los elementos retenidos por dicha criba eran transportados por un elevador de cangilones a un silo auxiliar, con el cual se alimentaban otros dos trituradores de mandíbula de 25×50 cm de abertura. Los productos de esta segunda trituración, junto con los elementos que habían resultado menores de 75 mm, se llevaban, mediante el elevador de cangilones principal de la instalación, a un silo general, haciéndoles pasar previamente, para su clasificación, a través de otra criba vibrante provista de tres telas diferentes: una de 3, otra de 6 y otra de 25 mm de abertura de malla, destinándose las dos primeras a la separación de la arena artificial, dada la mala calidad de la arena natural disponible. Esta instalación permitía obtener, fácilmente, 25 m^3 de árido por hora, cantidad más que suficiente para atender las necesidades de la obra.

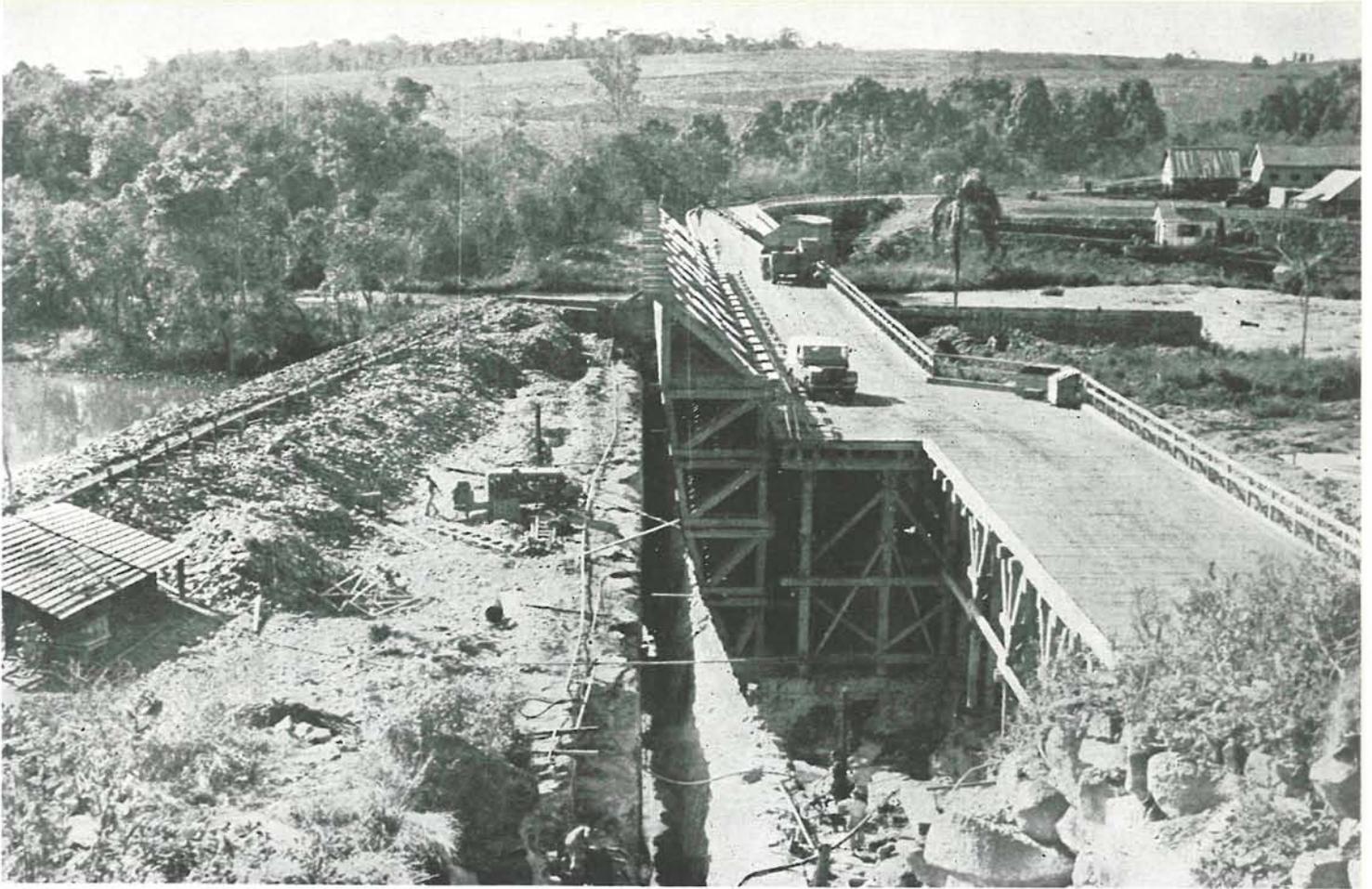
La fabricación del hormigón se hizo en una torre de hormigonado, tipo "Fourray T-7", enteramente metálica, constituida, fundamentalmente, por un silo central para cemento de 15 t de capacidad, rodeado por otros cuatro, de los cuales dos eran para arena y otros dos para grava, teniendo, cada uno, 16 m^3 de capacidad.

El cemento y los áridos se dosificaban en peso mediante una balanza, y después de mezclados íntimamente se trasladaban a las hormigoneras.

Con las instalaciones que quedan descritas se podía alcanzar una producción máxima de 15 m^3 de hormigón por hora.

Central de hormigonado.





La colocación del hormigón se hizo mediante cubas circulares de fondo móvil, de 500 l de capacidad, transportadas mediante grúas provistas de orugas, que se trasladaban sobre un puente provisional de servicio, especialmente construido, al efecto, a lo largo de la presa.

Desde su inauguración, la presa ha funcionado a la perfección. Como ya he indicado, las únicas filtraciones observadas han aparecido en las zonas laterales, donde el perfil es el clásico de gravedad.

Con el fin de comprobar el comportamiento de las pantallas y observar la evolución de los estados de tensión creados por el pretensado, se colocarán una serie de clinómetros en diferentes puntos para determinar la elasticidad de la estructura y obtener una precisa información sobre la influencia de las variaciones térmicas.

El mismo día que visité el salto, entraba en servicio la central hidroeléctrica, aliviando, con su ayuda, el régimen de carga de las demás centrales de la región. Todos los grupos funcionaban al máximo rendimiento, mientras que, con las alzas levantadas, el agua saltaba por el aliviadero.

★

Caía la tarde cuando me separé de Ernestina.

La dejé allí envuelta en el rumor de su cascada. Cuanto me alejaba, sentí a mis espaldas el coqueteo de su risa fresca y juvenil. Me volví a contemplarla. Su airosa figura me cautivó.

Tal vez Ernestina me pareció tan bella porque lleva nombre de mujer.

★

Fotografías facilitadas por el Ingeniero Telmo Thompson Flores, Jefe del Distrito de Río Grande do Sul del Departamento Nacional de Obras de Saneamiento, del Brasil.

Puente provisional de servicio para el hormigón de la presa.

