

CONTROL DEL HORMIGON EN LA CENTRAL RAPEL

Hernán ZABALETA*

RESUMEN

La Central Rapel, que está construyendo la ENDESA, tendrá un volumen total de hormigón de 700.000 m³.

En este informe, después de describir los procedimientos adoptados para la obtención de los agregados y la producción y confección del hormigón, se detallan los métodos de control empleados.

Este control comprende principalmente: cemento, granulometría y humedad de los agregados (correcciones consiguientes de la dosificación); consistencia del hormigón controlada por el tiempo de vibración, y resistencia a la compresión a diferentes edades. Se analizan estadísticamente los resultados, que se muestran en gráficos y tablas; estos resultados corresponden a los 600.000 m³ de hormigón ya colocados.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

La Empresa Nacional de Electricidad S.A. (ENDESA) está construyendo actualmente la Central Rapel, la que, de acuerdo con el programa de construcción previsto, deberá entrar en servicio a mediados de 1968.

Dicha Central consiste en un muro en arco de doble curvatura, de una altura máxima de 112 m, que permitirá embalsar las aguas del río que da su nombre a la Central, formando un lago de alrededor de 700.000 m³ y de una superficie aproximada de 7.000 hectáreas.

Aparte del muro mismo, la obra comprende dos vertederos en salto de esquí que flanquean al muro, y la casa de máquinas, ubicada al pie de la presa.

* Ingeniero Civil, Jefe del Laboratorio de Hormigones de la Central Rapel.

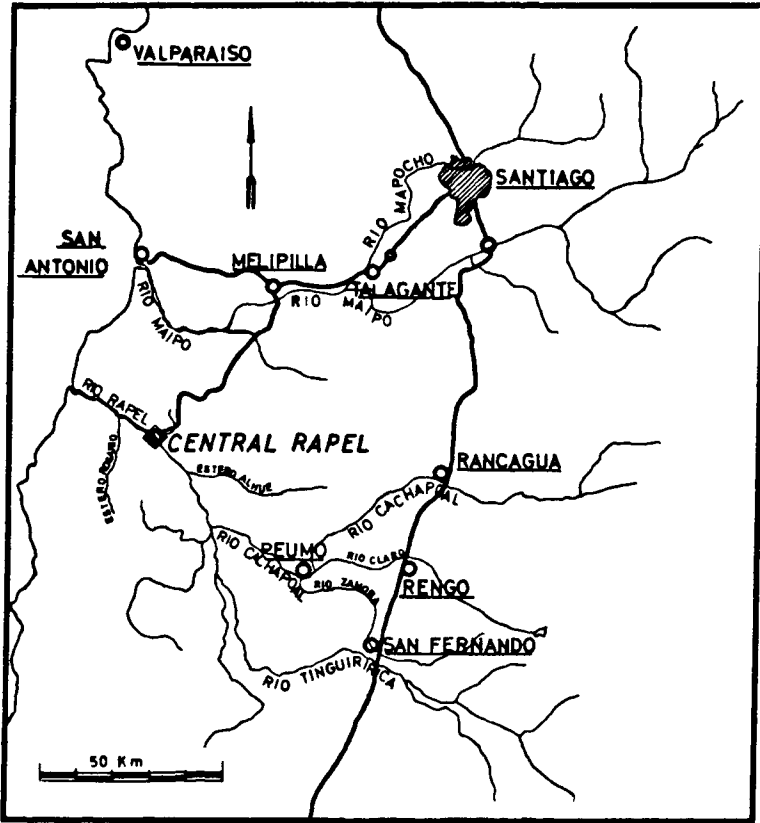


Fig. 1. Ubicación geográfica de la Central

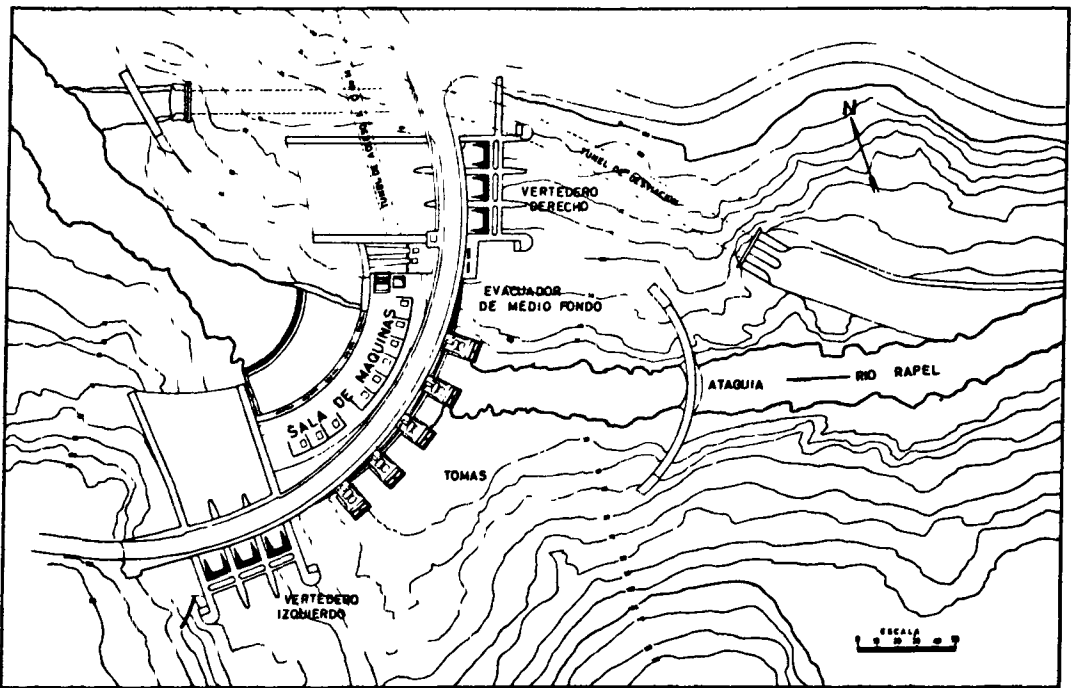


Fig. 2. Planta general de la Central

En la Figura 1 puede verse la ubicación geográfica de la Central. Las características más importantes de la obra son las siguientes:

Altura máxima del muro: 112 m.

Capacidad máxima del embalse: $750 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Superficie el embalse: 8000 hectáreas

Características hidrológicas del río Rapel:

Caudal medio anual: $187 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Crece milenaria: $10.000 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Volumen total de hormigón: 700.000 m^3 aprox.

Potencia instalada máxima (5 unidades): 350.000 KW.

En la Figura 2 se muestra la planta general de la Central.

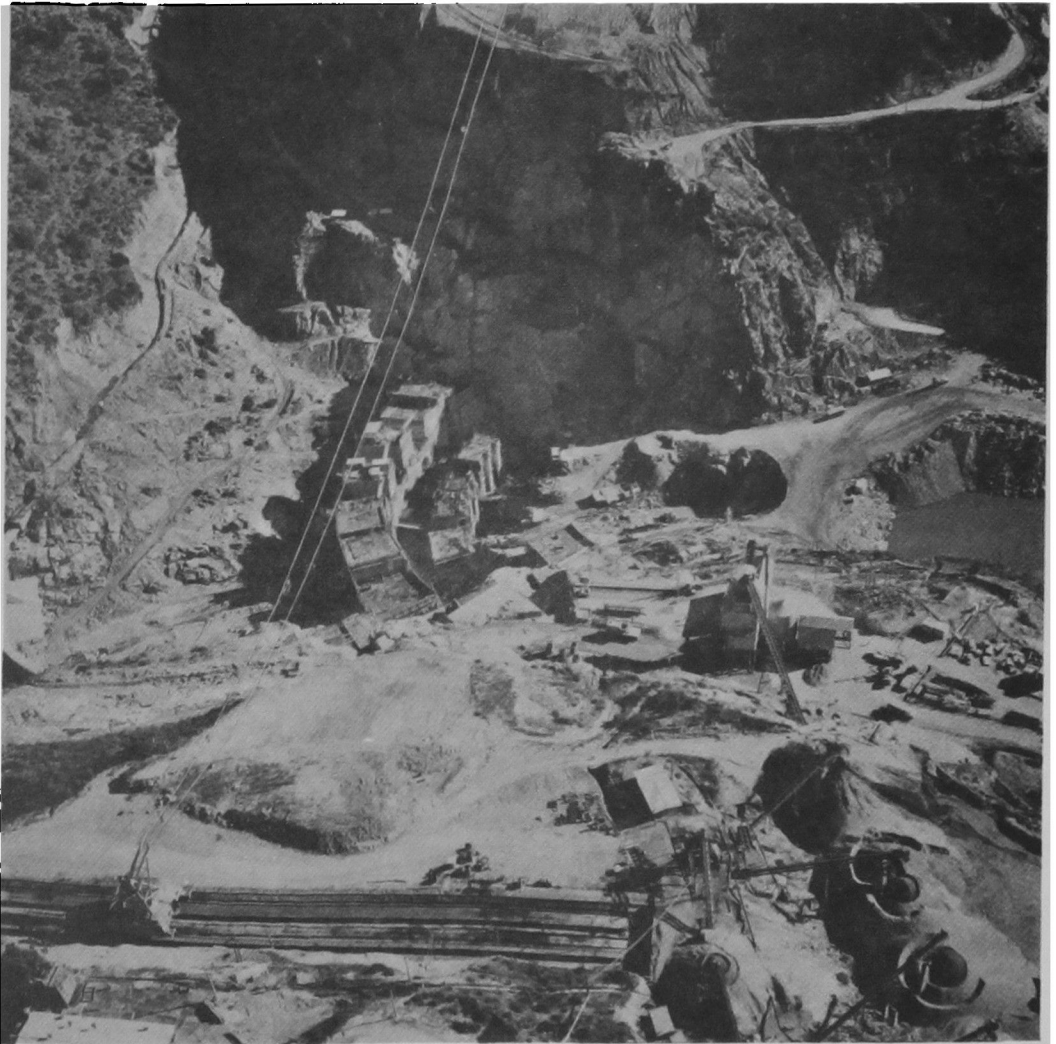


Fig. 3. Vista general de las instalaciones de foena. A la derecha, en primer plano, la planta de agregados, y detrás, la torre de hormigón. A la izquierda en primer plano, el cable-riel, y al fondo muro en construcción.

PRODUCCION Y COLOCACION DEL HORMIGON

La construcción de una obra de magnitud como la Central Rapel, ha requerido una cantidad importante de instalaciones de faena, entre las cuales se incluyen las destinadas a la producción y colocación del hormigón. (Fig. 3).

Por sernos necesario para el desarrollo del tema que nos ocupa, daremos una somera descripción de ellas en las líneas que siguen a continuación.

Planta de agregados

La Figura 4 indica esquemáticamente la disposición final adoptada para ella, y la Figura 5 es una vista de la planta. El agregado primario consiste en una mezcla en proporciones variables de agregado fluvial con roca chancada, el cual se acopia en una pila primaria. De allí es extraído mediante un túnel y transportado por cinta hasta la planta de agregados propiamente tal.

Originalmente proyectada para la selección de agregados sin lavado en los harneros, debió modificarse posteriormente agregando un harnero deshi-

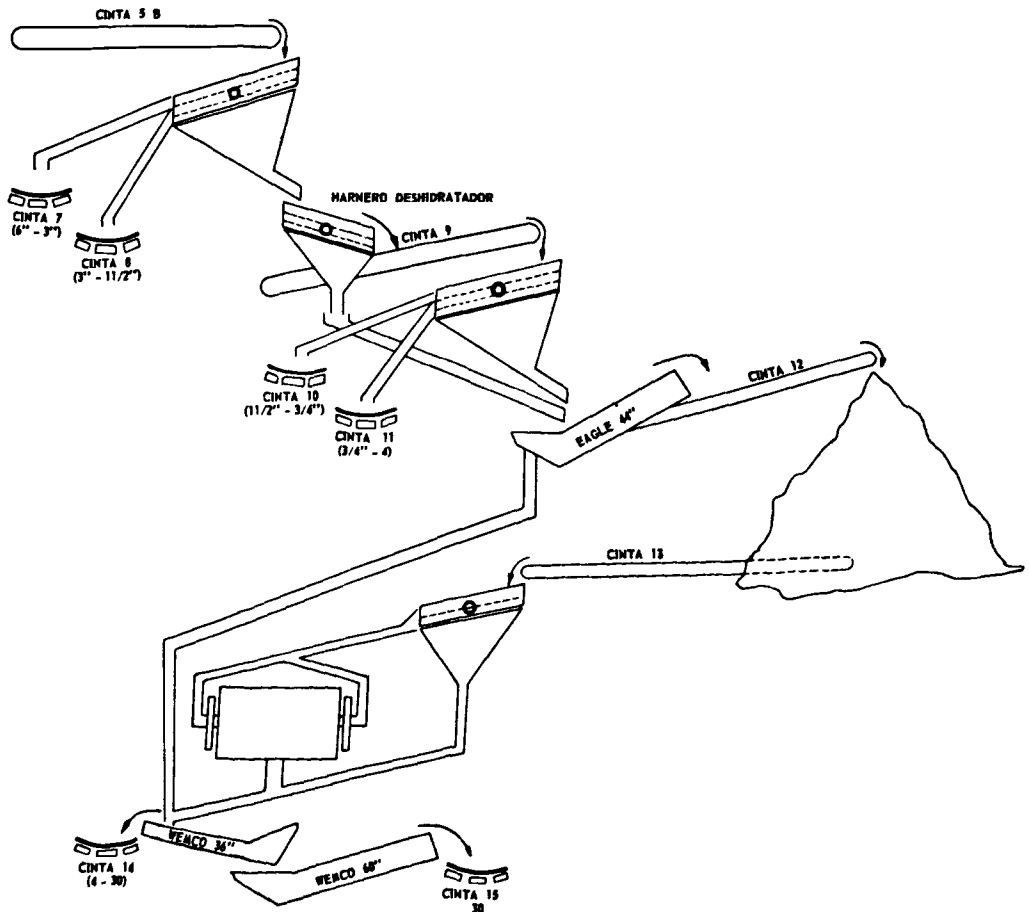


Fig. 4. Esquema de planta de harneo

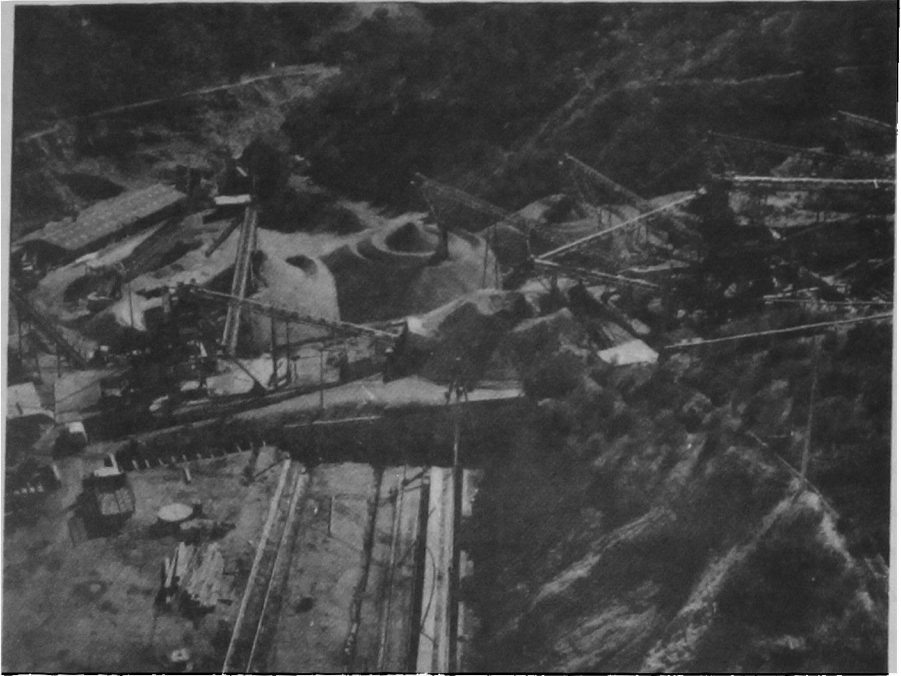


Fig. 5. Planta de agregados

dratador y un tornillo Eagle (Fig. 5) para poder efectuar una selección húmeda, debido al mal resultado de selección y limpieza obtenido en los primeros ensayos.

Puede verse que la disposición adoptada permite la producción de seis categorías de agregados: 6''-3''; 3''-1½'', 1½''-¾'', ¾''-ASTM N° 4, ASTM N° 4-ASTM N° 30 (arena gruesa) y bajo ASTM N° 30 (arena fina).

El tamaño máximo de 6'' queda fijado por la abertura de las mandíbulas del chancador primario.

La capacidad de tratamiento de la planta es de 300 toneladas de agregado primario por hora, con un consumo medio de agua de 2,30 m³ /min.

Torres de hormigón

La Figura 6 permite apreciar la disposición de la torre principal. La parte superior está ocupada por seis silos para agregados, cada uno de una capacidad de 60 m³, y dos para almacenamiento de cemento, de una capacidad aproximada de 30 m³ cada uno.

A continuación viene el piso de romanas, donde se realiza el pesaje de los agregados, cemento, agua y aditivos, que van a constituir el hormigón. En este piso está, además, el control de la torre.

Enseguida, descendiendo, se encuentra el piso de betoneras, constituido por tres betoneras de 3 m³ de capacidad (de hormigón vibrado en sitio) cada una.

El funcionamiento de la torre es automático o manual, a voluntad del operador.

Entre las características más importantes relacionadas con el control del hormigón debe señalarse que la torre cuenta con compensación de las humedades de las arenas gruesa y fina para porcentajes de humedad inferiores a 10% y, además, con un medidor de humedades de las arenas, que funciona en base a la medida de la resistencia eléctrica de la arena.

Este último, sin embargo, debió ser abandonado, porque medidas comparativas realizadas con el sistema de secado de arena indicaron falta de sensibilidad del medidor, aparte de que por permitir sólo lecturas de humedades hasta de un 11%, su uso quedaba limitado en forma importante.

Adyacentes a la torre de hormigón, tres silos para cemento con una capacidad total de 2.000 t permiten mantener un stock que asegura un abastecimiento permanente aproximadamente una semana al ritmo promedio de colocación diaria.

Aparte de la torre principal, y principalmente en las concretaduras de la Casa de Máquinas, se utiliza una torre auxiliar equipada con una betonera de

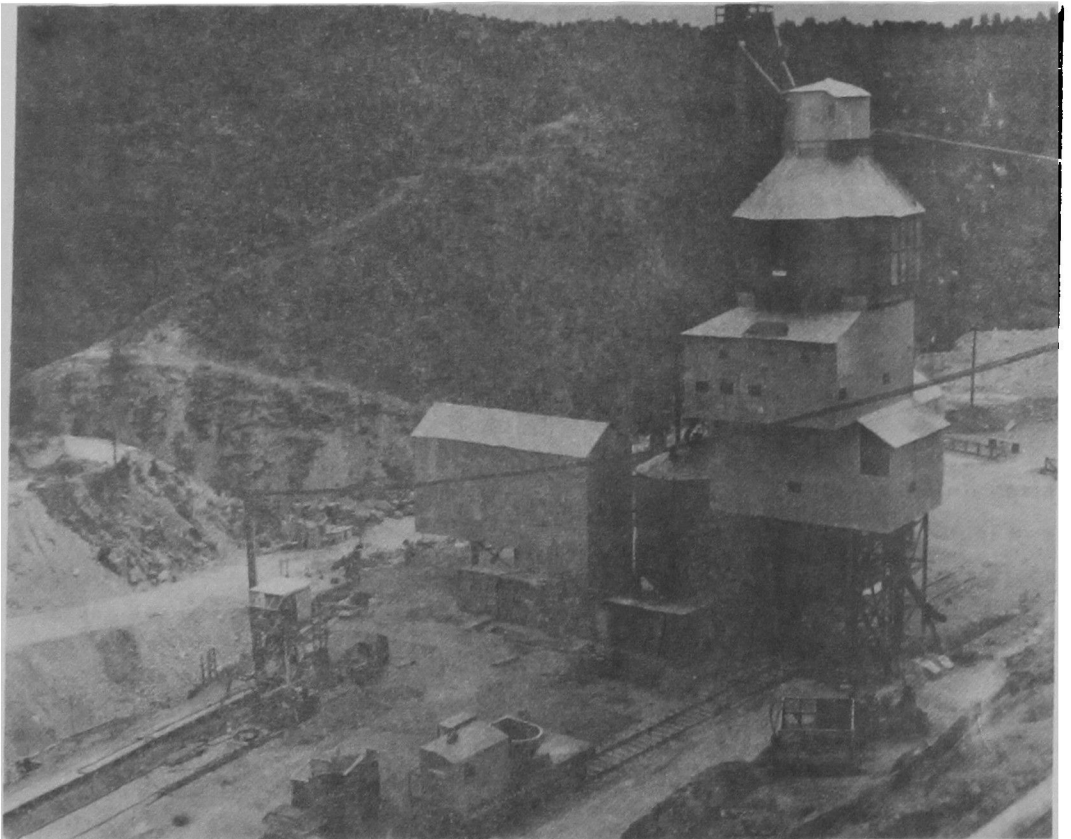


Fig. 6. Torre de hormigón

1,5 m³ de capacidad y con cuatro silos de 10 m³ de capacidad cada uno para cuatro tipos de agregados, más un silo de 8 m³ para cemento.

Transporte y colocación del hormigón

Una vez preparado, el hormigón es transportado mediante un silo-carril de 6 m³ de capacidad, o bien en un silo-camión de 3 m³ de capacidad.

Un cable-riel de 25 t de capacidad máxima y dos blondines de 12 t de capacidad máxima se encargan del transporte y colocación del hormigón en el dado en concretura. (Fig. 7).



Fig. 7. Vista del cable riel

Una vez descargada la capachada transportada (de 6 ó 3 m³ según el caso), el hormigón se esparce y compacta mediante vibradores de alta frecuencia.

La colocación del hormigón se efectúa normalmente en dados de una altura de 1,50 m concretados en capas de 0,50 m de altura. En la Figura 8 se muestra el muro en construcción.

Aparte de lo anterior, dos bombas de doble pistón y una simple permiten la concretura de partes específicas de las obras: las tomas para captación



Fig. 8. Muro en construcción

del agua, la Casa de Máquinas y concretaduras por el sistema de galerías superpuestas.

La bomba de doble pistón destinada a las concretaduras de la Casa de Máquinas es abastecida mediante camiones-betonera de 4,5 m³ de capacidad (hormigón vibrado en sitio) desde la torre auxiliar de hormigón.

SISTEMA DE CONTROL DEL HORMIGON

La magnitud y complejidad de la obra, bosquejada brevemente en las líneas que preceden, hacen necesario un control de calidad estricto del hormigón, producido a cadencia industrial con un ritmo que puede superar los 100 m³/h en momentos determinados de la construcción.

Con este objeto se ha previsto un sistema de control que se basa en dos elementos fundamentales: el Laboratorio de Hormigones y una organización de control en faena durante las concretaduras.

Control en el laboratorio de hormigones

El laboratorio está equipado para la realización de los controles del cemento de los áridos y del hormigón de acuerdo a las pautas que se indican a continuación.

Control del cemento

Incluye el control, tanto del cemento producido en fábrica, como del que se utiliza en faena.

El primero se realiza sobre una muestra representativa tomada cada 2.000 t de producción, a la cual se le realizan los siguientes ensayos:

- resistencias en mortero RILEM a 2, 7, 28, 90 y 365 días.
- calor de hidratación, por el método de la botella Thermos.
- superficie específica, según el sistema Blaine (ASTM C 204 - 55).
- peso específico, según ASTM C 188-44.
- tiempo de fraguado, según ASTM C 191 - 52.
- falso fraguado, según el Bureau of Reclamation*

El control en faena, realizado esporádicamente al azar, incluye los mismos ensayos antes indicados. Sólo el de falso fraguado se realiza sistemáticamente dos veces al día, debido a las dificultades que sobre la ejecución de los trabajos significa este fenómeno.

En la Tabla I se indican las especificaciones exigidas al cemento, que está constituido por un cemento portland tipo I ASTM con un agregado de un 30% de puzolana (ceniza volcánica).

* BUREAU OF RECLAMATION. "Concrete Manual", 7a edición, 1963, Appendix, Designation 8.

TABLA I
ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO

Tiempo de fraguado:		
inicial: mínimo 45 min.		
final: máximo 10 h		
Expansión en autoclave: máximo 0,5%		
Superficie específica Blaine: $3.400 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$.		
Calor de hidratación: máximo 70 cal/g.		
Resistencias mínimas RILEM:		
	Compresión	Flexión
	kg/cm ²	kg/cm ²
2 días	100	20
7 días	200	35
28 días	300	60
90 días	400	70

TABLA II
COMPOSICION QUIMICA DEL CEMENTO
Y DE LA PUZOLANA

	Puzolana %	Cemento %
SiO ₂	70,0	19,5
Fe ₂ O ₃	1,1	3,0
Al ₂ O ₃	16,4	6,0
CaO	1,0	64,8
MgO	0,3	2,0
Na ₂ O	3,8	---
K ₂ O	3,4	---
SO ₃	---	2,6
Perd. Cal.	4,0	1,7

Además de lo anterior, la composición química del cemento y de la puzolana no deben apartarse sensiblemente de las cifras indicadas en la Tabla II, las que corresponden a valores promedios normales para estos materiales.

Control de los áridos

Este comprende tres etapas de control: chancador primario, planta de agregados, y torres de hormigón, y se realiza en las siguientes condiciones:

Chancador primario. Las muestras, en proporción de una diaria, se toman a la salida del chancador, sobre la cinta que transporta el agregado hasta descargar en la pila primaria.

Un análisis granulométrico de la muestra permite obtener el sobretamaño de la fracción 6"-3", y, a través del resultado obtenido, regular la abertura de las mandíbulas del chancador primario.

Se ha aceptado como regla que debe cerrarse la mandíbula cuando dicho sobretamaño es igual o mayor de 20% en tres muestras sucesivas. Este procedimiento tiene por objeto conseguir que la fracción superior a 6" no exceda de un 2% en la curva del agregado total del hormigón de tamaño máximo 6", considerando la fracturación que se produce desde la salida del agregado del chancador primario hasta su llegada a las ranuras de la torre de hormigón.

Planta de agregados. Se toman muestras de los tres agregados más finos (arena fina, arena gruesa y 3/4"-Nº4, a los cuales se les efectúan análisis granulométrico, de materia orgánica y peso específico.

Esta muestra se toma diariamente y, de acuerdo a los resultados obtenidos, se estudia la necesidad de variar los factores de trabajo de la planta con el objeto de mejorar la granulometría de los agregados producidos (gasto de

alimentación de agregados, gasto de agua en las torres de harneo y planta de arena, zonas de extracción de los agregados).

Torre de hormigón. Se realizan dos muestreos diarios de agregados en las romanas de la torre de hormigón, con un intervalo de tiempo de 12 horas entre ellos aproximadamente.

El primero, en la mañana, incluye muestras de los seis agregados producidos.

El segundo, en la tarde, sólo incluye muestras de los tres agregados más finos.

A estas muestras se les somete a ensayo granulométrico, determinación de peso específico y semanalmente a ensayo de materia orgánica.

Según los resultados granulométricos se corrigen las dosificaciones del hormigón en uso de acuerdo al programa de concretadura previsto. Esta corrección se efectúa dos veces al día para los tres agregados más finos y semanalmente para los tres agregados más gruesos, considerando en esta ocasión la granulometría media de las seis muestras tomadas en la semana correspondiente.

Sólo si la granulometría de un agregado individual se aparta sensiblemente del promedio semanal en uso, se realiza una corrección de la curva granulométrica total que corrija esa variación.

La torre auxiliar de hormigón se muestrea diariamente, corrigiéndose las dosificaciones en uso con cada muestra de los cuatro agregados tomada.

La Figura 9 indica las curvas granulométricas ideales a las cuales se ajusta la dosificación del hormigón.

Con el objeto de acelerar la determinación de las dosificaciones, se han simplificado al máximo los métodos de dosificación empleados. Para este objeto, luego de comprobaciones rigurosas de la exactitud del sistema, se han

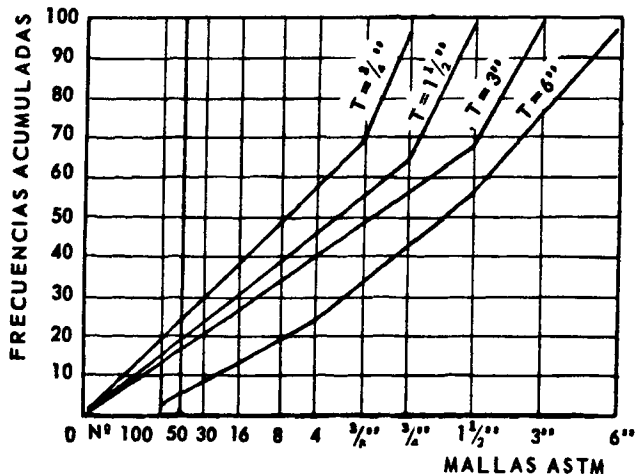


Fig. 9. Curvas granulométricas ideales, cemento + áridos.

establecido tablas en las cuales, mediante el conocimiento de los módulos de finura de los agregados individuales, puede determinarse el porcentaje correspondiente para obtener el mejor ajuste a la curva ideal.

Control de hormigón

El principal control efectuado sobre el hormigón es el de su resistencia a compresión. Además se controla por ensayos a tracción por flexión y a tracción indirecta (ensayo brasileño).

Con este objeto se toman muestras del hormigón preparado en las torres de hormigón con una frecuencia no inferior a dos muestras diarias.

Cada muestra para ensayo de compresión está constituida por ocho probetas, de las cuales se ensayan dos a una edad de 7 días, tres a 28 días y dos a 90 días. Una de cada cinco muestras consta de dos probetas adicionales para ensayo a 180 días.

Las probetas están constituidas por cilindros de 30 cm de diámetro por 45 cm de altura para los hormigones de tamaños máximos 6" y 3", y de cubos de 20 cm de arista para los de tamaño máximo 1½" y ¾".

Previamente al ensayo de compresión se rectifican las caras de ensayo con una mezcla de azufre fundido, arena y negro de humo.

Los ensayos de tracción por flexión y tracción indirecta se efectúan una vez por semana e incluyen 3 probetas: una para ensayo a 7 días y dos para ensayo a 28 días.

Inicialmente, durante la puesta en servicio de la torre principal de hormigón, se efectuaron, además, controles de granulometría en húmedo del hormigón total. Se desistió de utilizarlo como sistema permanente de control debido a las dificultades de su ejecución en relación a la precisión de los resultados.

Semestralmente se efectúa también un control del hormigón en obra mediante testigos extraídos con sonda. Este control incluye normalmente seis a ocho puntos de la obra, distribuidos en los bloques que en el momento del muestreo tienen mayor edad.

Normalmente los testigos están constituidos por cilindros de 15x22 cm y, en algunas ocasiones, por cilindros de 30x45 cm.

Control del hormigón durante las concretaduras

Para decidir el sistema de control del hormigón durante las concretaduras, se partió de la base que él debe permitir la mantención lo más uniforme posible de la resistencia y la plasticidad del hormigón.

Considerando que las romanas de la torre pesan los componentes del hormigón con suficiente exactitud para un tipo de hormigón de características determinadas (tamaño máximo, dosis de cemento y tipo de cemento), las úni-

cas fuentes de variación de los parámetros antes indicados podrán provenir de variaciones en la dosis de agua del hormigón y en la granulometría de los agregados constituyentes. A su vez, las variaciones de agua tienen su origen en las variaciones de humedad de los agregados.

Por lo tanto, evidentemente, un sistema ideal de control debe permitir conocer en cualquier momento la humedad y la granulometría interna de cada uno de los agregados componentes. Sin embargo, este conocimiento ideal instantáneo es, en la práctica, imposible, dado que la ejecución de las medidas necesarias requiere de un cierto lapso apreciable, aun cuando las condiciones de muestreo y las instalaciones para secado y barneo de los agregados sean muy eficientes. Por esta razón, deben aceptarse ciertas simplificaciones que, en otras palabras, se traducen en variaciones de los parámetros controlados alrededor de los valores óptimos.

Por otra parte, las simplificaciones no deben extremarse hasta el punto de llegar hasta un nivel de control inadecuado.

En el caso de la Central Rapel se estimó como resultado óptimo el poder mantener la razón agua/cemento dentro del valor teórico previsto $\pm 0,02$ y la plasticidad del hormigón con una variación de ± 1 cm en el asentamiento en el cono de Abrams.

Esquema de control

El esquema de control se organizó sobre las siguientes bases:

Un obrero especializado se mantiene en un punto desde donde puede observar el interior de la betonera donde se prepara el hormigón y, al acercarse al final del tiempo de revoltura, apreciar la plasticidad del hormigón. Mediante adiciones que no excedan de unos 5 l/m^3 en la dosis de agua puede corregir la plasticidad del hormigón, si éste es más seco que lo previsto. Si la corrección supera la cifra anterior, debe dar aviso a una persona calificada para corregir la dosificación.

Un segundo obrero toma muestras cada 15 minutos aproximadamente de los tres agregados más finos, a los cuales determina por secado su humedad y, una vez secos, el porcentaje que pasa por la malla N° 4 ASTM en el agregado $\frac{3}{4}$ " - N° 4, el retenido en la malla N° 16 ASTM en la arena gruesa y el retenido en la malla N° 50 ASTM en la arena fina.

Un inspector, de preparación universitaria (constructor civil), ubicado en el sitio en que se realiza la concretadura, está recibiendo constantemente la información obtenida por los dos obreros antes mencionados y, mediante esos datos, calculando la razón agua/cemento del hormigón. Si ésta aumenta sobre los límites previstos, los datos granulométricos citados le permiten realizar una corrección de granulometría del hormigón que normalice la situación.

En el caso de concretaduras efectuadas con hormigones de tamaño máximo 1½" o inferior, se controla además el asentamiento en el cono de Abrams.

Limitaciones del sistema de control

El sistema, tal como se ha descrito, presenta las siguientes limitaciones:

- a) Sólo se conoce exactamente la cantidad de agua aportada como humedad por los tres agregados más finos. La de los tres más gruesos es estimada por el aspecto de éstos y en base a un control que cada 8 horas realiza el laboratorio.
- b) La granulometría de los tres agregados más finos es estimada a partir del conocimiento de un solo valor de su curva granulométrica.

En el caso del agregado ¾" - Nº 4, las variaciones del porcentaje de infratamaños (bajo malla Nº 4 ASTM) permiten conocer la cantidad de arena gruesa aportada por este material. Aunque de diferente granulometría que la arena gruesa producida por la planta, el conocimiento de este valor da oportunidad de efectuar correcciones que compensen un exceso de arena gruesa en el hormigón.

En lo que a las arenas respecta, la Figura 10 permite apreciar la precisión con que puede estimarse el módulo de finura de ellas a partir de los porcentajes retenidos en las mallas Nº 16 y Nº 50 ASTM, para las arenas gruesa y fina respectivamente.

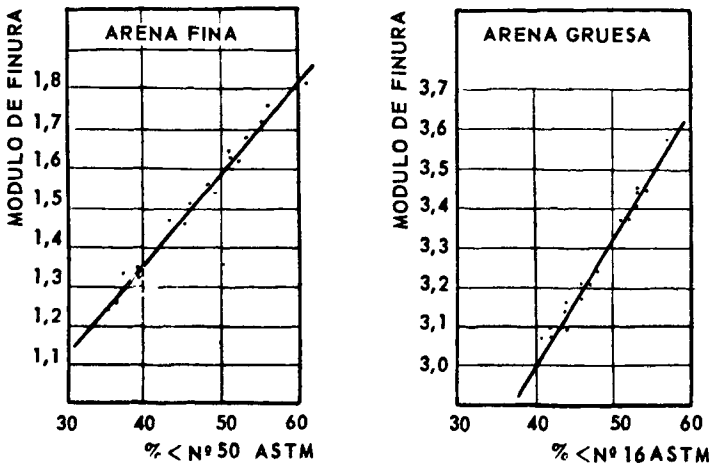


Fig. 10. Relación entre módulo de finura y porcentaje retenido en el tamiz ASTM Nº 50, para arena fina, y Nº 16 para arena gruesa.

A su vez el conocimiento de los módulos individuales de la arena permite la mantención de un módulo de finura constante en la mezcla de ambas arenas.

- c) Finalmente, en algunas ocasiones se ha presentado el caso de que se produzcan variaciones de granulometría o de humedades con mayor frecuencia que la de los muestreos correspondientes.

El acopio de arenas alcanza para volúmenes medios de 5.000 a 6.000 m³

de hormigón. Esta cantidad corresponde al volumen promedio colocado en 5 días de trabajo, que es el tiempo de drenaje del agua contenida en esos agregados. Este período, que puede estimarse aceptable en principio, no alcanza sin embargo a ser suficientemente efectivo, por el hecho de existir una sola pila para cada arena, con dos bocas de descarga muy cercanas entre sí.

Esto se ha traducido en la práctica en la utilización constante, durante los períodos de colocación intensiva de hormigón, de arenas con contenidos de humedad elevados y muy variables, debido a la producción de bolsones de agua que descargan intempestivamente, afectando varias masadas sucesivas de hormigón.

La Figura 11 permite apreciar un caso especialmente desfavorable en este sentido, correspondiente a las variaciones de humedad producidas en los tres agregados más finos en una concretadura de difícil control.

Igual fenómeno, aunque con menor intensidad, se registró en algunas oportunidades en el agregado $\frac{3}{4}$ "- N° 4, en especial cuando, por causa de un consumo superior a la producción, la pila de la planta de agregados no se mantenía llena.

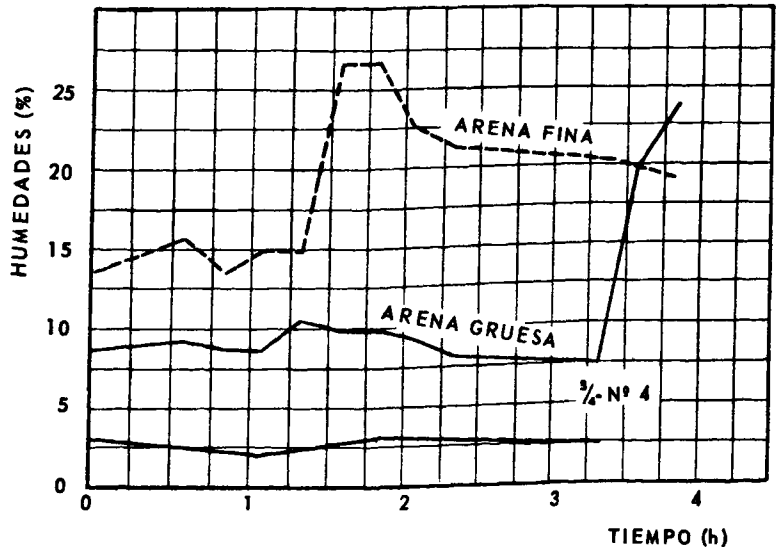


Fig. 11. Variación de la humedad de los agregados finos con el tiempo.

Falso fraguado

Un problema especial de control que se ha suscitado con frecuencia relativa ha sido el de la presencia de falso fraguado en el cemento.

La práctica ha demostrado que una diferencia de penetración superior a 12mm en el ensayo según el método antes indicado del Bureau of Reclamation, significa problemas de vaciado en el hormigón inmediatamente después de su salida de la betonera hasta su llegada al bloque en concretadura. Sin embargo, normalmente no se traduce en dificultades especiales de colocación.

Una solución de esta anomalía se ha intentado por medio del uso de aditivos (retardadores o plastificantes), sin obtenerse un resultado satisfactorio. Sólo un aumento del tiempo de revoltura en la betonera, del orden de $\frac{1}{4}$ de minuto por cada 4 mm de aumento en la diferencia de penetración en el ensayo de falso fraguado, ha permitido una normalización de la plasticidad del hormigón.

RESULTADOS OBTENIDOS

La medida de la eficiencia de un sistema de control se tiene a través de los resultados obtenidos en su aplicación.

En el caso de la Central Rapel, hay diversos puntos sobre cuya efectividad no parece conveniente enfocar nuestro análisis.

Control del chancador primario

La Figura 12 indica la distribución de frecuencias de los porcentajes de agregado mayor que 6'' contenido en la fracción 6'' - 3'' del agregado primario.

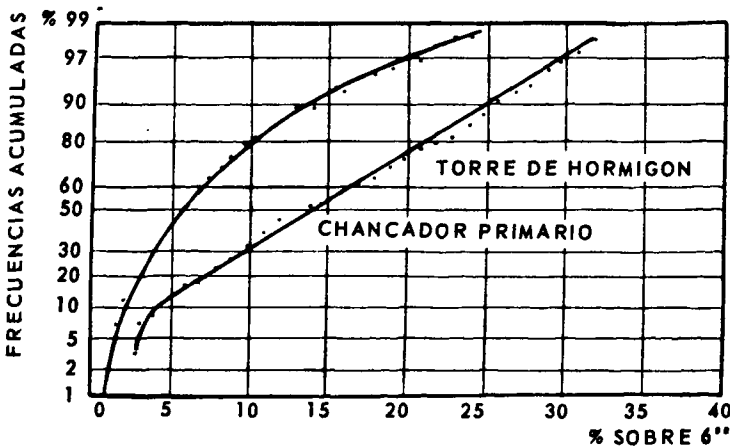


Fig. 12. Fracción superior a 6'' en el agregado 6''-3''.

De acuerdo al criterio definido anteriormente, puede verse que el resultado obtenido con el control efectuado da valores no tan buenos como lo previsto, ya que sólo un 75% de las muestras da porcentajes inferiores al 20% de agregado mayor que 6''.

Veamos ahora cómo dicho resultado se traduce en el agregado 6'' - 3'' en la torre de hormigón.

Dicho gráfico nos permite ver, en primer lugar, la importante fracturación que el agregado grueso sufre en su trayecto desde el chancador primario hasta las betoneras de la torre de hormigón. Por otra parte, considerando la dosificación teórica del hormigón de 6'', se ve que el tamaño real de este último ha oscilado entre 6'' y 7''.

Considerando la carencia de malla de 6'' en los harneros de la planta de agregados y, además, que en algunas oportunidades la alimentación del chancador primario se efectúa con material fluvial del río Rapel, con bajo porcentaje comprendido entre 4'' y 6'', se ha estimado que el sistema empleado conduce a un resultado práctico satisfactorio.

Control de la planta de agregados

Tal como se explicó anteriormente, este control tiene un carácter más bien preventivo, dado que las posibilidades de corrección son limitadas.

La Figura 13 muestra la distribución estadística de los porcentajes bajo malla N° 4 ASTM contenidos en el agregado 3/4''- N° 4.

Puede verse que un 80% de las muestras tienen un porcentaje de material bajo la malla N° 4 ASTM inferior a 10%. Este resultado puede considerarse mediocre, dado que este agregado es sometido a un doble harneo por la malla de esa abertura.

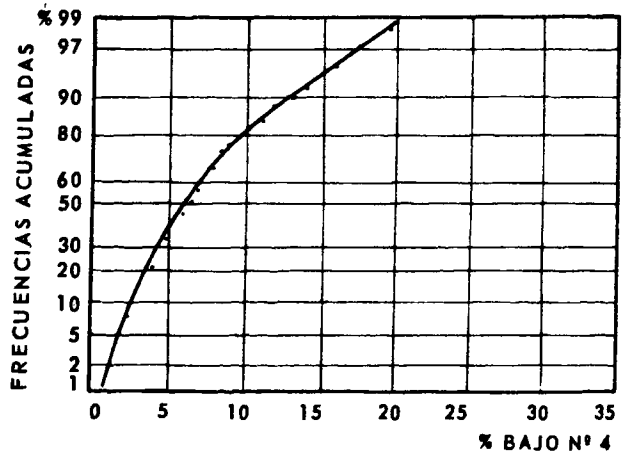


Fig. 13. Fracción inferior al tamiz N° 4 en el agregado 3/4''- 4.

En la Figura 14 se ha procedido de manera similar con los módulos de finura de las arenas gruesa y fina.

Si se considera que una variación de 0,10 en el módulo de finura de una de las arenas significa una variación de un 1% en los porcentajes de mezcla de las arenas para mantener constante el módulo de finura de la mezcla total, la Figura 14 nos indica que existe una dispersión importante en la granulometría de las arenas, ya que sólo un 30% de las muestras controladas se mantienen dentro de un rango comprendido entre el módulo de finura medio + 0,10.

Estos resultados nos están indicando que el control ejercido no fue totalmente eficaz en lograr una buena uniformidad en las granulometrías. En otras palabras, que la planta ha demostrado falta de elasticidad para obtener una mayor uniformidad que la conseguida en la práctica.

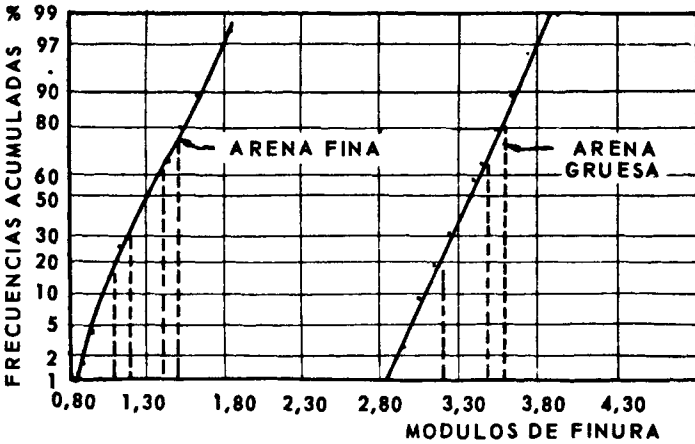


Fig. 14. Módulo de finura de las arenas gruesa y fina.

Control del hormigón

Los resultados del control ejercido sobre la fabricación del hormigón pueden analizarse desde dos puntos de vista: a) la mantención de la plasticidad, b) la resistencia.

Plasticidad

Disponemos de tres factores de juicio para juzgar su uniformidad.

Primero está constituido por las muestras de hormigón tomadas en la torre de hormigón, a las cuales se mide el asentamiento en el cono de Abrams y el tiempo de vibración necesario para su compactación.

Las Figuras 15 y 16 muestran gráficamente la distribución de frecuencias de asentamientos y tiempos de vibración respectivamente, para las muestras correspondientes a tamaños máximos 6".

En la Figura 15 puede verse que la mediana de los asentamientos de las muestras tomadas fue de 2,5 cm y que un 60% está comprendido en el rango definido por dicho asentamiento medio \pm 1 cm, y un 95% entre el asentamiento medio \pm 2 cm.

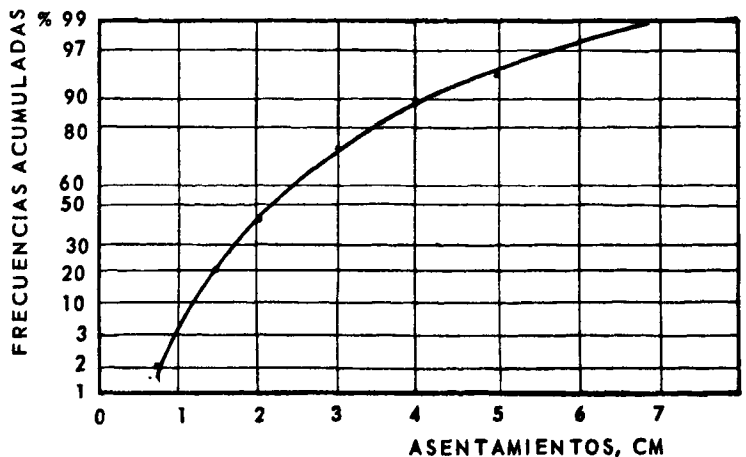


Fig. 15. Asentamientos del hormigón.

La Figura 16 indica que la media de los tiempos de vibración de las muestras fue de 15 seg, que un 50% está comprendido en un rango de 15 ± 5 seg (que de acuerdo a nuestra experiencia corresponde a un rango de plasticidad similar al indicado para el asentamiento), y un 80% entre dicho tiempo de vibración medio + 10 seg.

Ambas medidas conducen, por lo tanto, a resultados similares. Considerando la dispersión que introduce el hecho de eliminar el agregado sobre 2'' para la medida del asentamiento y sobre 4'' para la del tiempo de vibración, ellas demuestran que la plasticidad ha logrado ser mantenida en un alto porcentaje dentro de valores que, en la práctica, no interfieren con una buena compactación del hormigón, manteniendo un rendimiento de colocación apropiado.

El segundo factor de juicio lo constituyen las medidas de asentamiento que se efectúan en faena sobre los hormigones de tamaño máximo igual o inferior a $1 \frac{1}{2}$ ''.

En la Figura 17 se ha representado la distribución de los porcentajes de asentamientos comprendidos entre el asentamiento previsto ± 1 cm para 428 concretaduras en que se controló el asentamiento a cada masada correspondiente al volumen transportado por un camión-betonera. Puede verse que en alrededor de un 50% de las concretaduras, el 75% o más de los asentamientos se mantuvo dentro del rango antes indicado, no existiendo ninguna en que no quedara comprendido en dicho rango por lo menos un 50%.

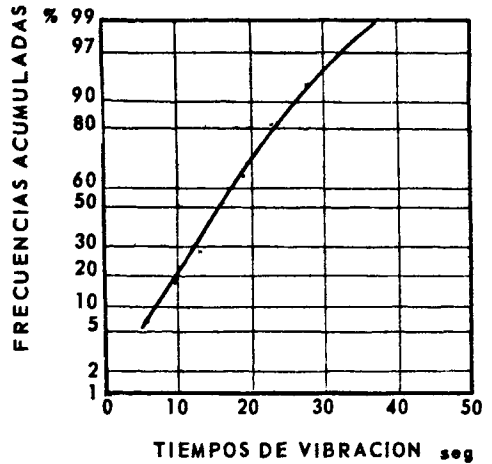


Fig. 16. Tiempos de vibración empleados.

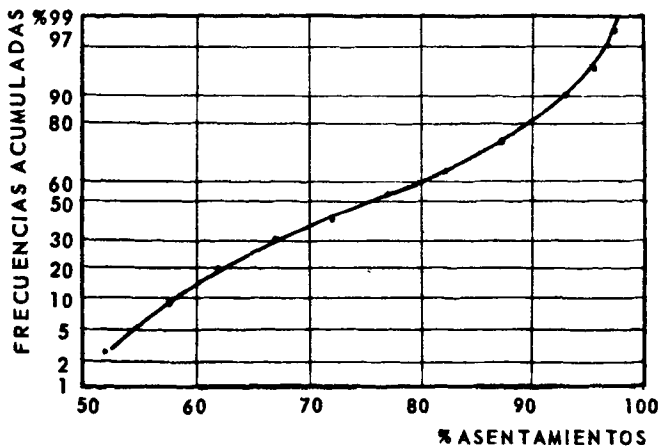


Fig. 17. Porcentajes de asentamientos que cumplían con los valores previstos ± 1 cm.

Este resultado puede considerarse satisfactorio si se tiene en cuenta que una variación de + 1 cm en el asentamiento se traduce en una variación inferior al 5% de la resistencia, manteniéndose constante la granulometría total del hormigón, y que no representa influencia importante en la colocación en faena.

Finalmente, un tercer elemento de juicio lo constituye el control de plasticidad del hormigón de tamaño máximo 6'', realizado por medida del tiempo de vibración en faena.

Este control se efectuó en una oportunidad, con el objeto de poder apreciar la variabilidad de la plasticidad del hormigón a su llegada al punto de colocación y abarcó un período de tiempo en el cual se colocaron alrededor de 10.000m³ del hormigón analizado.

TABLA III
TIEMPO DE VIBRACION EN FAENA

Tiempo de vibración	Número de masadas	%
Mayor que el normal	54	3
Normal	1.540	92
Menor que el normal	83	5
Total	1.677	100

La Tabla III resume los resultados obtenidos. En ella se indica el porcentaje de masadas de hormigón cuyo tiempo de vibración era normal, mayor que lo normal o inferior al normal. Se consideró como tiempo normal de vibración aquél que permite la compactación total de una masada de 6 m³ entre dos capachas sucesivas de bormigón: es de alrededor de 4 minutos en promedio. La compactación se efectúa normalmente por un equipo de cinco vibradores.

Esta apreciación permite obtener, independizándose del observador, una medida bastante sensible de la plasticidad del hormigón.

Esta apreciación permite obtener, independizándose del observador, una medida bastante sensible de la plasticidad del hormigón.

Como puede verse, el porcentaje de masadas de plasticidad normal sobrepasa el 90%. Las masadas más fluidas superan en porcentaje a las más secas que las de plasticidad normal.

Estimamos que el resultado anotado puede considerarse indicativo de un control adecuado de la plasticidad del hormigón.

Resistencia

En lo que a las resistencias respecta, varios son los factores que nos corresponde analizar.

En primer lugar, hasta qué punto han sido obtenidas las resistencias previstas por el proyectista, las cuales se indican en la Tabla IV en lo que concierne a las resistencias a compresión. Las resistencias a tracción no se especificaron.

En la Tabla V se indican los resultados medios de las resistencias a 7, 28 y 90 días, y los coeficientes de variación obtenidos para las diferentes partes de la obra. La Figura 18 detalla los promedios mensuales de las resis-

TABLA IV
RESISTENCIAS ESPECIFICADAS PARA EL HORMIGON

Resistencias	Cilindro 30 x 45 cm		Cubo 20 x 20 cm	
	28 días	90 días	28 días	90 días
Media semanal mínima, kg/cm ²	210	260	260	300
Individual mínima, kg/cm ²	180	220	220	260

TABLA V
RESISTENCIAS OBTENIDAS EN HORMIGONES DE OBRA

Parte de obra	Caract. del hormigón			Probeta	Resistencias medias kg/cm ²			Coef. variación, %	
	C	A/C	T		R ₇	R ₂₈	R ₉₀	V ₂₈	V ₉₀
Muro	260	0,49	6"	Cilindro	192	266	323	10	10
	280	0,53	3"	Cilindro	180	263	312	9	6
Tomas	370	0,54	3/4"	Cubo	215	303	400	9	
Casa Máquinas	330	0,56	1 1/2"	Cubo	183	262	328	14	10
Vertederos	260	0,49	6"	Cilindro	192	271	325	11	10
	280	0,53	3"	Cilindro	184	257	327	10	8
	220	0,58	6"	Cilindro	177	207	258	15	13

C = Dosis de cemento, kg/m³

A/C = Relación agua / cemento en peso

T = Tamaño máximo del agregado

R₇, R₂₈ y R₉₀ = Resistencias medias a la compresión a 7, 28 y 90 días.

V₂₈ y V₉₀ = Coeficientes de variación de las resistencias a 28 y 90 días

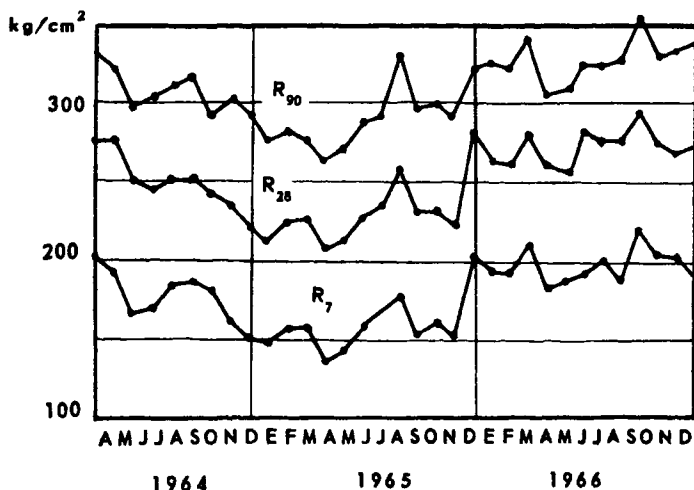


Fig. 18. Promedios mensuales de las resistencias del muro en el periodo 1964 - 1966.

tencias correspondientes a las muestras del muro para el período 1964 - 1966. De ambas puede deducirse que, en general, las resistencias especificadas han sido obtenidas ampliamente. Una excepción se presenta en el mes de abril de 1965 causada por una baja en las resistencias del cemento, hecho que obligó a sobredosificar temporalmente los hormigones.

Un segundo factor relacionado con las resistencias que debemos analizar, es en qué grado representan las del hormigón colocado en obra. Estimamos que un criterio adecuado en este sentido consiste en comparar entre sí los resultados de los testigos extraídos del hormigón en sitio y de las muestras de hormigón fresco correspondientes. Los valores anotados en la Tabla VI nos permiten hacer esta comparación.

TABLA VI
COMPARACION DE RESISTENCIAS ENTRE MUESTRAS Y TESTIGOS, (kg/cm²)

R_t	337	345	255	300	325	278	270	235	305	250	309
R_h	346	340	225	300	339	303	201	201	299	298	298
R_t	305	305	337	225	261	283	308	260	media = R_t = 289		
R_h	276	301	299	252	269	280	388	314	media = R_h = 290		

R_t = Resistencia de testigos extraídos de obra, reducidos a cilindro 30 x 45 cm y a 90 días de edad.

R_h = Resistencias de las muestras tomadas del hormigón fresco, a los 90 días de edad.

Como los testigos tienen edades y dimensiones diferentes a las de las muestras, hemos hecho una conversión de las resistencias de los primeros a su equivalencia en cilindro de 30 x 45 cm a 90 días de edad. Para este objeto hemos recurrido a las tablas del Concrete Manual del Bureau of Reclamation y a la curva de endurecimiento del hormigón deducida de los ensayos de resistencia de las muestras de tamaño máximo 6" hasta 180 días de edad.

Aun cuando la aplicación de fórmulas de reducción como las indicadas introduce un factor de dispersión y tiende a desmejorar la correlación entre los valores individuales, una comparación entre las resistencias medias puede servirnos como criterio adecuado de comparación. Según podemos ver en la Tabla VI, estas resistencias medias no difieren entre sí, lo cual nos indica que las muestras de laboratorio son representativas del hormigón colocado en obra.

Sin embargo, tomando en consideración que las muestras de hormigón representan un volumen parcial de hormigón del total colocado en las obras, nos queda por analizar si el orden de magnitud de las variaciones producidas en las concretaduras corresponde al de las muestras ensayadas en el laboratorio.

Si aceptamos que la resistencia depende fundamentalmente de la razón agua/cemento del hormigón, las variaciones de ésta serán un índice de las variaciones de resistencia.

Una estimación podemos obtenerla a través de los controles de humedad efectuados en la torre de hormigón y en el laboratorio.

La Tabla VII indica, a la izquierda, la distribución de las razones agua-cemento obtenidas en laboratorio en base a las medidas de humedades de todos los agregados constituyentes del hormigón y de la dosis de agua en uso en el momento del muestreo.

Como puede verse, un 74% de las razones agua/cemento está comprendido dentro

del rango de variación que hemos aceptado como óptimo, y un 94% dentro del valor fijado por el laboratorio $\pm 0,04$. Una variación de esta magnitud indica que un 96% de las resistencias ha logrado mantenerse dentro de un rango aproximado $R \pm 0,10 R$, siendo R la resistencia media; lo que a su vez significa un coeficiente de variación del orden de 5%, valor que concuerda bien con los señalados en la Tabla V.

En la Tabla VII, a la derecha, hemos anotado la distribución de los rangos de variación de las razones agua/cemento calculados por los inspectores de hormigón, basados en el conocimiento de las humedades de los tres agregados más finos y una estimación de la de los agregados gruesos durante las concretaduras.

Dichos valores muestran una concordancia aceptable con los anteriores, lo cual nos permite asegurar con buen fundamento que los coeficientes de variación obtenidos de las muestras son representativos del hormigón colocado en obra.

TABLA VII

DISTRIBUCION DE LAS RELACIONES AGUA - CEMENTO

Calculada en el laboratorio		Estimada en obra	
Rango A/C	%	Rango A/C	%
$(A/C)_t$	23	$(A/C)_t \pm 0,01$	96
$(A/C)_t \pm 0,02$	74	$(A/C)_t \pm 0,02$	86
$(A/C)_t \pm 0,04$	94	$(A/C)_t \pm 0,04$	99
$(A/C)_t \pm 0,05$	100	$(A/C)_t \pm 0,06$	100

$(A/C)_t$ = Razón agua/cemento teórica del hormigón.

OBSERVACIONES FINALES

En las líneas que preceden hemos querido dar un breve resumen de la forma en que se ha establecido el sistema de control de calidad del hormigón producido para la Central Rapel y de los resultados a que este sistema ha conducido.

Dado que los resultados obtenidos pueden considerarse adecuados a la magnitud y condiciones particulares del trabajo, nos ha parecido que podría constituir un aporte de cierto interés para los especialistas en esta materia que en el futuro se vean abocados a problemas similares.

Por otra parte, nos ha guiado también la idea de tratar de hacer notar el evidente interés que el control de calidad del hormigón representa para la seguridad y buena ejecución de los trabajos, sin que él signifique un recargo importante en el costo del hormigón (en el caso de Rapel el costo adicional del control puede estimarse inferior al 2% del costo del hormigón colocado).

Finalmente nos resta decir que factores importantes en los buenos resultados son la comprensión de las jerarquías superiores y la colaboración de un personal eficiente y compenetrado de su labor, con los que ha tenido la suerte de contar el autor de estas líneas en su desempeño en la Central Rapel.

QUALITY CONTROL OF CONCRETE AT RAPEL POWER PLANT

SUMMARY:

In the Rapel Power Plant, at present in way of construction by ENDESA, some 700,000 cubic meters of concrete will be placed. In this paper, after a brief description of the equipments and installations being used for the grading of aggregates and the making of concrete, a detailed discussion is made of the control systems used at the Plant. Such control comprises cement, gradation and moisture content of aggregates (to adjust accordingly mix proportions), concrete consistency through time spent for vibration, and concrete compressive strength at 3 ages.

Results corresponding to some 600.000 m³ of concrete already placed are presented and statistically analysed.