

# XIV JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGÓN

## CONTROL DE HORMIGÓN MASIVO EN FUNDACIÓN CALDERA PLANTA CELULOSA VALDIVIA

**FECHA** : OCTUBRE 2003  
**EMPRESA** : READY MIX SUR S.A.  
CEMENTOS BIO BIO S.A.

**AUTORES** : VICTOR CARRASCO B. Ingeniero Constructor  
Jefe de Centros Técnicos y Asesoría Cementos Bio Bio S. A.

EDGARDO REICH L. Ingeniero Civil  
Jefe de Operaciones Ready Mix Sur S.A.

---

1.-	RESUMEN.	2
2.-	ANTECEDENTES GENERALES.	2
3.-	DEFINICIONES TÉCNICAS.	3
3.1.-	DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN	3
3.2.-	DOSIFICACIÓN PROPUESTA	5
3.3.-	TEMPERATURA DEL HORMIGÓN Y SU TENDENCIA A FISURACIÓN.	6
3.4.-	DEL GRADIENTE TÉRMICO.	9
3.5.-	PROTECCIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA EVITAR FISURACIÓN.	10
3.6.-	COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN	11
5.-	RESULTADOS DE TERRENO	12
5.1.-	PRODUCCIÓN Y COLOCACIÓN	12
5.2.-	MEDICIONES DE TEMPERATURA	13
6.-	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	14

## **1.- Resumen.**

Una de las más importantes obras de la Celulosa Proyecto Valdivia de Celco, contemplaba hormigones masivos para la fundación de la caldera recuperadora. Esta faena considera un volumen total de 2600 m<sup>3</sup> de hormigón grado H035, los que desde un principio, por su rapidez de colocación, se definió deberían ser colocados con bomba. Se estudiaron las alternativas para una faena continua, los cementos disponibles en el mercado nacional, aditivos, etc., con el objetivo de controlar las retracciones térmicas y definir la infraestructura necesaria para esta faena particular.

Se realizaron estudios considerando alternativas con resistencias a 28 y 90 días, con cementos de diferentes grado, con o sin aditivos retardadores, además de esquemas operativos y logísticos para abordar la faena, dotación de bombas, plantas, camiones y abastecimiento de materias primas.

Finalmente, se decidió optar por el uso de cemento especial Bio Bio del tipo Siderúrgico y dividir la faena en dos etapas. La primera contemplaría la colocación de 1470 m<sup>3</sup> y la segunda, cuatro días después, con un volumen de 1150 m<sup>3</sup>.

Para la faena se planificó desde un punto de vista técnico-operativo la colocación del hormigón, y se estudio la generación de temperatura y su descenso hasta llegar a la de servicio. Se llevó un estricto control de los procedimientos de colocación, y un registro de la temperatura de la masa de hormigón en el tiempo, para controlar los gradientes térmicos entre la masa y el medio ambiente, definir el curado y protección de la estructura.

## **2.- Antecedentes Generales.**

La fundación de la caldera recuperadora del proyecto Celulosa Valdivia de Celco, consistió en una losa de un espesor de 1,8 metros, de un volumen de 2600 metros cúbicos de hormigón grado H035, al inicio de la obra, ya que se encontraba en la ruta crítica de programación. Esta fundación en particular sostendría el corazón energético de la planta, por lo que su funcionamiento debería estar asegurado sin ningún inconveniente. Esto obligó a generar un

equipo multidisciplinario entre la constructora, los mandantes, asesores y el proveedor de hormigón.

Los mayores problemas que se enfrentaban eran la retracción térmica y los gradientes térmicos con las condiciones ambientales de fines de invierno en la zona de Valdivia, además de los procedimientos de colocación y logística de preparación de este gran volumen.

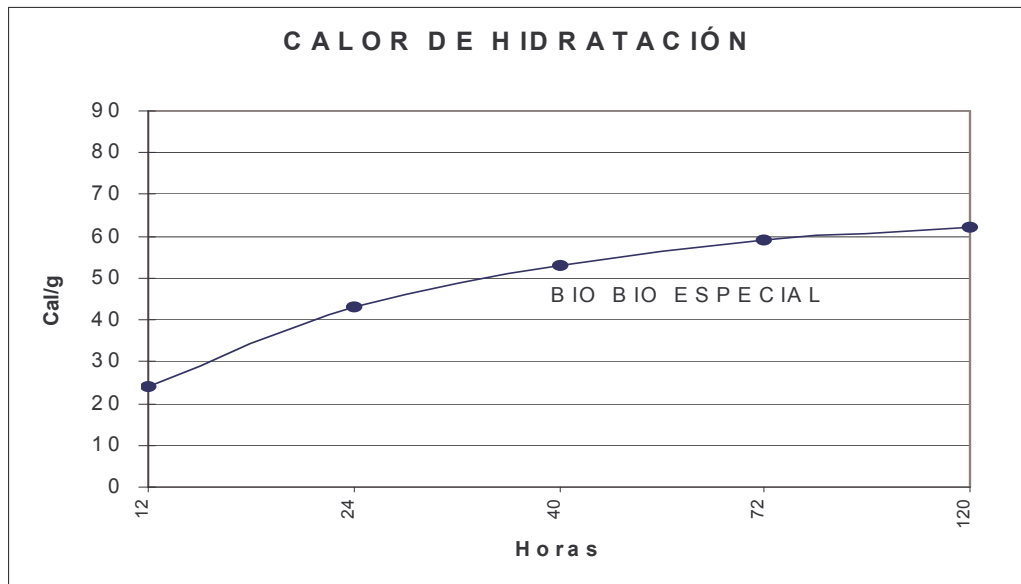
### 3.- Definiciones Técnicas.

#### 3.1.- Dosificación del Hormigón

El mayor reto de esta faena, era controlar y evitar al máximo la posibilidad de fisuras por gradiente térmico. Esto obligaba a utilizar

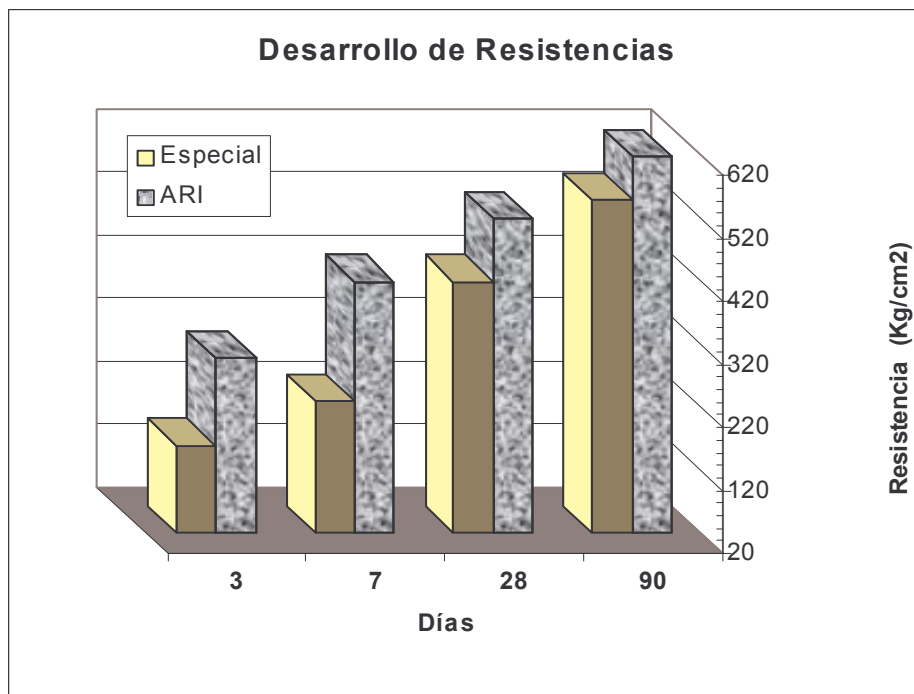
- i) un cemento de bajo calor de hidratación,
- ii) la menor cantidad posible de cemento.

Para el punto i) no existió duda, se eligió el cemento de más bajo calor de hidratación existente en el mercado nacional, el cemento Bio Bio Especial Siderúrgico, que solo se produce en la planta de Cementos Bio Bio S.A. en Talcahuano.



Calor de Hidratación	
Horas	Cal /G
12	24
24	43
40	53
72	59
120	62

Respecto al punto ii), éste se encontraba limitado por las necesidades de bombeabilidad de la mezcla, ya que la arena no aportaba los suficientes finos bajo malla #50. Adicionalmente se evaluó la alternativa de bajar la relación a/c e incorporar el uso de aditivo superfluidificante, además de cambiar la especificación de la resistencia a 90 días.



Resistencias a Compresión (Kg/cm2)				
EDAD (días)		7	28	90
BIO BIO ESPECIAL		230	420	550
BIO BIO ARI		420	520	620

A partir de las resistencias preliminares obtenidas en los hormigones de prueba con 420 kg. de cemento por m<sup>3</sup>, se descartó el uso de aditivo y se mantuvo la

especificación de la resistencia medida a los 28 días, quedando sólo por evaluar la forma y rangos de control de temperaturas.

### 3.2.- Dosificación Propuesta

Finalmente, después de realizadas las pruebas necesarias, la dosificación que se utilizaría en la faena es la siguiente

Cemento Bio Bio Especial	410 Kg/m3
Arena Amco Los Ciruelos	850 Kg/m3.
Gravilla Amco Los Ciruelos	465 Kg/m3
Grava Amco Los Ciruelos	535 Kg/m3
Agua	158 Lt/m3
Plastiment HER	1,78 Lt/m3
Peso por m3 de hormigón	2420 Kg/m3
Relación a/c	0,385

El árido combinado queda

TAMIZ mm.	ARENA 1 46,0%	ARENA 2 0,0%	GRAVA 29,0%	GRAVILLA 25,0%	MEZCLA 100%	BANDA NCH163 ANEXO B	BANDA DE TRABAJO	
50	100	100	100	100	100			
40	100	100	100,00	100	100	100	95	100
25	100	100	62,00	100,0	89		84	94
20	100	100	8,80	98,9	73	60-80	68	78
12,5	100	100	0,90	54,4	60		55	65
10	100,0	100	0,90	25,7	53	40-80	48	58
5(#4)	87,7	87,7	0,80	1,4	41	24-66	36	46
2,5(#8)	73,1	73,1		0,5	34	15-55	30	38
1,25(#16)	59,8	59,8			28	10-42	24	32
0,63(#30)	35,6	35,6			16	6-30	12	20
0,31(#50)	9,2	9,2			4	3-19	1	7
0,16(#100)	2,2	2,2			1	2-8	0	3

### Observaciones.

- Los áridos cumplen los requisitos especificados en la norma Nch 163.
- El árido total se enmarca en la banda para un equipo de bombeo.

- Para hormigones bombeados de tamaño máximo 40 mm. es recomendable que el % de granos finos bajo malla #50 ASTM, incluido el cemento, sea igual o mayor a 450 kg/m<sup>3</sup>, lo que cumple la dosificación propuesta (410+(9,2%\*850)=488).
- El tipo de cemento propuesto es el más recomendable para hormigonado en masa, donde se requiere un bajo calor de hidratación y un desarrollo lento de dicho calor.

### 3.3.- Temperatura del hormigón y su tendencia a fisuración.

Para la dosificación propuesta, se realizó la simulación teórica de las temperaturas en la masa.

Para el cálculo, primero se determina la temperatura estimada de fabricación (salida de hormigonera), según lo establecido en la norma NCh170 en la sección E.2.3.2, y considerando las siguientes temperaturas de los materiales

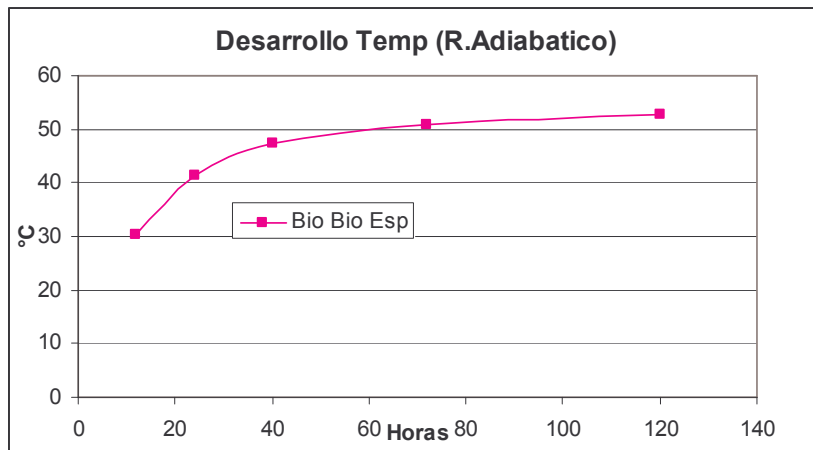
Aridos	17 °C
Cemento	27 °C
Agua	10 °C

Se obtiene una temperatura inicial teórica de hormigón fresco a la salida de la hormigonera de 16 °C., que es un valor similar al controlado en hormigones en la zona.

Con el calor de hidratación del cemento propuesto (dado en 3.1) y considerando el caso más desfavorable, con una temperatura inicial del hormigón de 16°C, y el uso de 410 kg/m<sup>3</sup> de cemento Bío Bío especial, se tiene (en regimen adiabático)

$$T_i = t_c + \frac{m_c * Q}{d_h * c_h}$$

- Donde
- t<sub>c</sub>** = temperatura hormigón fresco, 16°C
  - m<sub>c</sub>** = masa cemento (410 kg)
  - Q** = calor de hidratación desarrollado kcal/kg
  - d<sub>h</sub>\*c<sub>h</sub>** = 625 kcal kg/°C



Reemplazando en la fórmula se tiene.

- a 12 horas un  $T_i = 32\text{ }^\circ\text{C}$
- a 24 horas un  $T_i = 44\text{ }^\circ\text{C}$
- a 40 horas un  $T_i = 51\text{ }^\circ\text{C}$
- a 72 horas un  $T_i = 55\text{ }^\circ\text{C}$
- a 120 horas un  $T_i = 57\text{ }^\circ\text{C}$

Ahora, considerando el intercambio de calor con el medio ambiente:

$$Z = \frac{Kt}{2e * dh + ch}$$

donde:

- Kt** = coeficiente de transmitancia térmica suma de  $K_2$  y  $K_1$  correspondientes a la cara superior e inferior de la losa
- e** = espesor, m

Aceptando para este caso  $K_1 = 0$  (no hay pérdida de calor por la cara inferior, lo que si bien no es estrictamente correcto, corresponde al caso más desfavorable)

$$K_2 = \frac{1}{Re + \sum e/\lambda}$$

se obtiene que  $K_2 = 0,749\text{ m h }^\circ\text{C /kcal}$ ,

donde

- Re** = resistividad externa
- $\lambda$  = Coeficiente conductividad térmica (hormigón = 1.41) en  $\text{kc/h m }^\circ\text{C}$

luego **Z** = 0,0003328

Calculados  $T_i$  y  $Z$  puede estimarse la temperatura a distinta edad del hormigón.

$$T_h (\text{hrs}) = (1 - Z)^{h-1} \left[ \frac{T_i (1 - Z) - T_a}{(1 + 0,0016)^h} \right] + T_a$$

Luego, considerando una temperatura ambiente durante la descarga de  $16\text{ }^\circ\text{C}$ , se obtiene:

Temperatura masa hormigón a 12 horas =  $31,6\text{ }^\circ\text{C}$

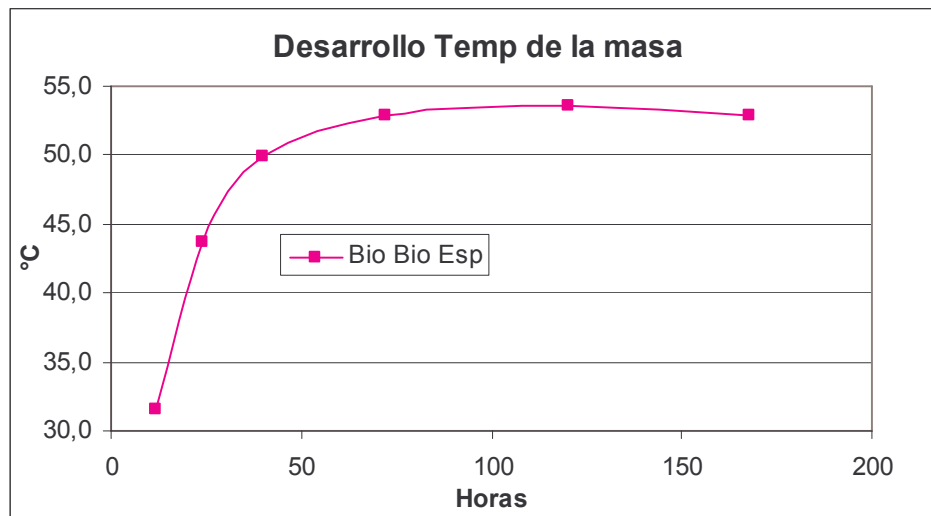
Temperatura masa hormigón a 24 horas =  $43,8\text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura masa hormigón a 40 horas =  $49,8\text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura masa hormigón a 72 horas =  $52,9\text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura masa hormigón a 120 horas =  $53,5\text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura masa hormigón a 168 horas =  $53,0\text{ }^\circ\text{C}$



En el espesor de la losa, necesariamente se genera una zona de tracción en la superficie expuesta y una de compresión en el núcleo, para igualar tensiones producto de la restricción interna a la libre deformación.

Contemplando el valor máximo, la gradiente térmica generada entre el núcleo y la superficie sería de  $53,5 - 16 = 37,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Para el caso más desfavorable, el grado de restricción puede estimarse con  $d$  igual a  $\frac{1}{4}$  del espesor de la losa y considerando una gradiente térmica aproximadamente lineal.

$$Gr = ( (L/d - 2) / (L/d+1) ) = 0,98$$

Así se prevé una retracción térmica total:  $RT = 10^{-5} * 37,5 = 375 * 10^{-6} \text{ m/m}$

La retracción efectiva será:  $0,98 * 375 * 10^{-6} = 369 * 10^{-6} \text{ m/m}$

Aceptando por otra parte una deformabilidad máxima sin fisuración del hormigón del orden de  $200 * 10^{-6} \text{ m/m}$  se comprueba que  $RT > 200 * 10^{-6}$ , por lo es probable que el hormigón se fisure.

### 3.4.- Del gradiente térmico.

El libro “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, señala:

*“ El concreto reforzado estructural masivo con contenidos elevados de cemento (300 a 600kg/m<sup>3</sup>) no puede hacer uso de muchas de las técnicas de colado ni de muchos de los factores de control antes mencionados para mantener las temperaturas bajas a fin de controlar los agrietamientos. Para estos concretos (usados a menudo en losas de cimentación y en centrales de energía), una buena técnica consiste en (1) colar la sección completa de concreto en una vaciada continua. (2) evitar restricciones externas de los elementos de concreto adyacentes, y (3) controlar las deformaciones térmicas internas evitando que el concreto experimente un diferencial de temperatura excesivo entre el concreto interno y la superficie. Esto se hace manteniendo caliente al concreto por medio de aislamientos (toldos, mantas acolchadas o arena sobre láminas de polietileno). La experiencia y algunos estudios han mostrado que para evitar los agrietamientos superficiales, el diferencial máximo de temperatura entre el concreto del interior y el del exterior no debe sobrepasar 20°C. También se reducen los agrietamientos internos. Algunas fuentes indican que el diferencial máximo de temperatura (MTD) para un concreto que contenga granito o caliza (es decir, agregados de bajo coeficiente térmico) deberá ser de 25 y 31°C, respectivamente. Sin embargo, se debe presuponer un diferencial máximo de temperatura de 20°C, a no ser que pruebas con la mezcla real de concreto por usar demuestren que otros valores de diferenciales máximos de temperatura sean permisibles.*

*Si se reduce el diferencial de temperatura a 20°C ó menos, el concreto se enfriará lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiental con poco o ningún agrietamiento superficial siempre y cuando no se encuentre restringido por refuerzo continuo que atraviese la superficie de contacto de secciones adyacentes u opuestas de concreto endurecido. El concreto restringido se agrietará debido a la posible contracción térmica después del enfriamiento. El concreto sin restringir no se agrietará si se siguen los procedimientos adecuados y si se revisa y controla el diferencial de temperatura. ....”*

Lo anterior concuerda perfectamente con lo expuesto en puntos precedentes, estableciendo que para disminuir cualquier probabilidad de fisura por fisuración térmica, se debe controlar que no exista un gradiente térmico superior a 20 °C. Además se deberán identificar las restricciones externas e internas de la masa de hormigón para evitar fisuración por coacción interna o externa.

### **3.5.- Protección de la estructura para evitar fisuración.**

Ya revisados los aspectos propios del hormigón, corresponde definir la forma de protección para controlar el gradiente térmico. Será necesario conocer las características térmicas de la zona, dadas por las temperaturas ambientales, y las diferencias entre el día y la noche.

En el caso de esta obra, se definió crear un microclima sobre la estructura. En la superficie se colocó una capa de arena húmeda, arpillera, aislapol y polietileno, y sobre toda la estructura una carpa a 1,5 metros por sobre la superficie lo que permitía crear un ambiente de tipo invernadero el que incluso puede ser calefaccionado. Por lo tanto, estimada la temperatura del centro de la masa, es posible definir la temperatura límite bajo la carpa contemplado la aislación de superficie.

Cuando el gradiente de térmico de 20 °C es, equivalente a una contracción de  $200 * 10^{-6}$  m/m, es necesario proteger la superficie de modo de reducir la gradiente. Utilizando la relación conocida.

$$\frac{\lambda_h}{e_h} (T_h - T_s) = \frac{\lambda_a}{e_a} (T_s - T_a)$$

donde

$\lambda_h$  = coeficiente conductividad térmica hormigón (1,41 kcal/h m°C)

$\lambda_a$  = coeficiente conductividad térmica para la aislación de poliestireno expandido (0,033 kcal/h m °C para una densidad de 20 Kg/m<sup>3</sup>)

$T_h$  = Temperatura núcleo hormigón

$T_s$  = Temperatura superficie hormigón

$e_h$  = Espesor hormigón

$e_a$  = Espesor protección

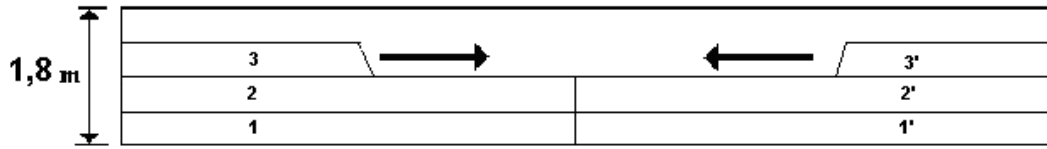
$T_a$  = Temperatura ambiente (bajo carpa)

Considerando una temperatura máxima de la superficie del hormigón de 33 °C, y una temperatura ambiente mínima de 12 °C (bajo carpa) se obtiene que la aislación debe tener un espesor de 0.0442 m, por lo que es recomendable utilizar como aislación planchas de poliestireno expandido de 50 mm, después de 6 a 8 horas de colocado el hormigón.

Todas las protecciones térmicas deben ser retiradas en forma programada y paulatina de modo de no generar un shock térmico.

### **3.6.- Colocación del Hormigón**

Dado el volumen de cada faena, el hormigón será colocado por medio de dos bombas en frentes opuestos en cuatro capas de 45 cm de espesor. Para la capacidad de producción y colocación de hormigón, en el mejor de los casos existe un tiempo entre capa de 140 minutos. Bajo las condiciones zonales, y ya que se contempló el uso de aditivo retardante, este tiempo entre capas no debe ser superior a 8 horas, por lo que existe un margen de seguridad razonable para la faena.

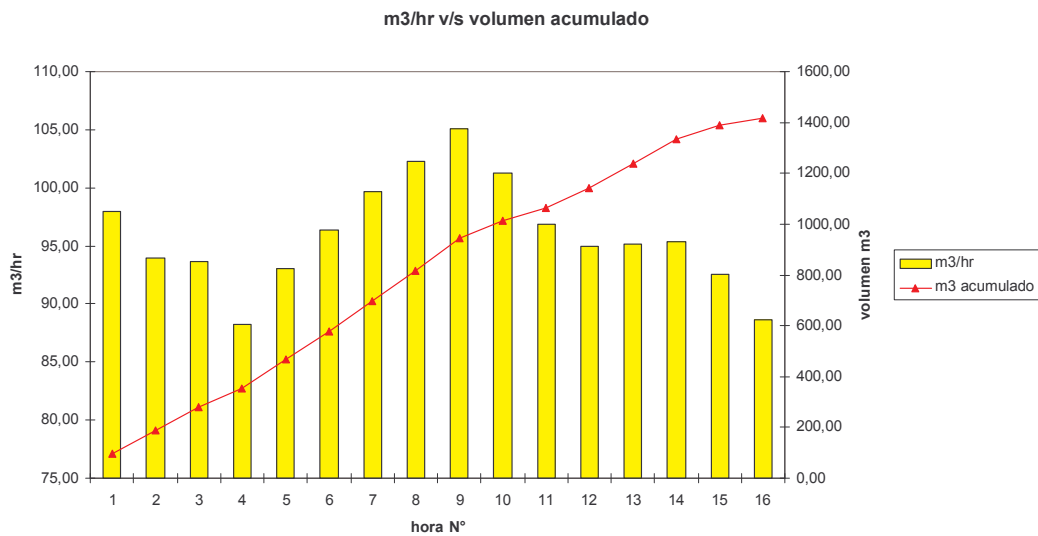


## 5.- Resultados de Terreno

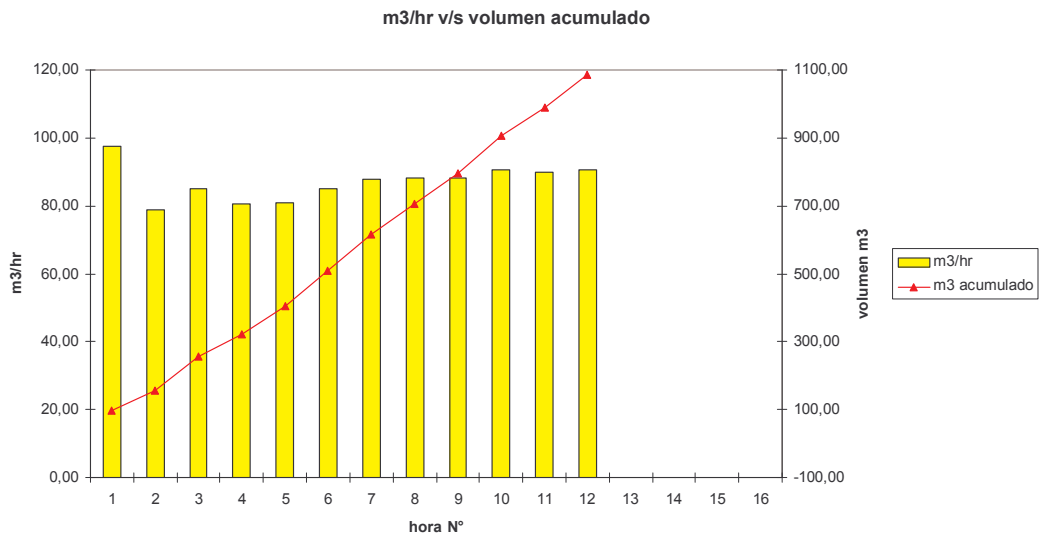
En obra se controlaron parámetros que permiten revisar la validez del estudio y obtener ciertas conclusiones de los métodos utilizados de protección, colocación y producción del hormigón.

### 5.1.- Producción y Colocación

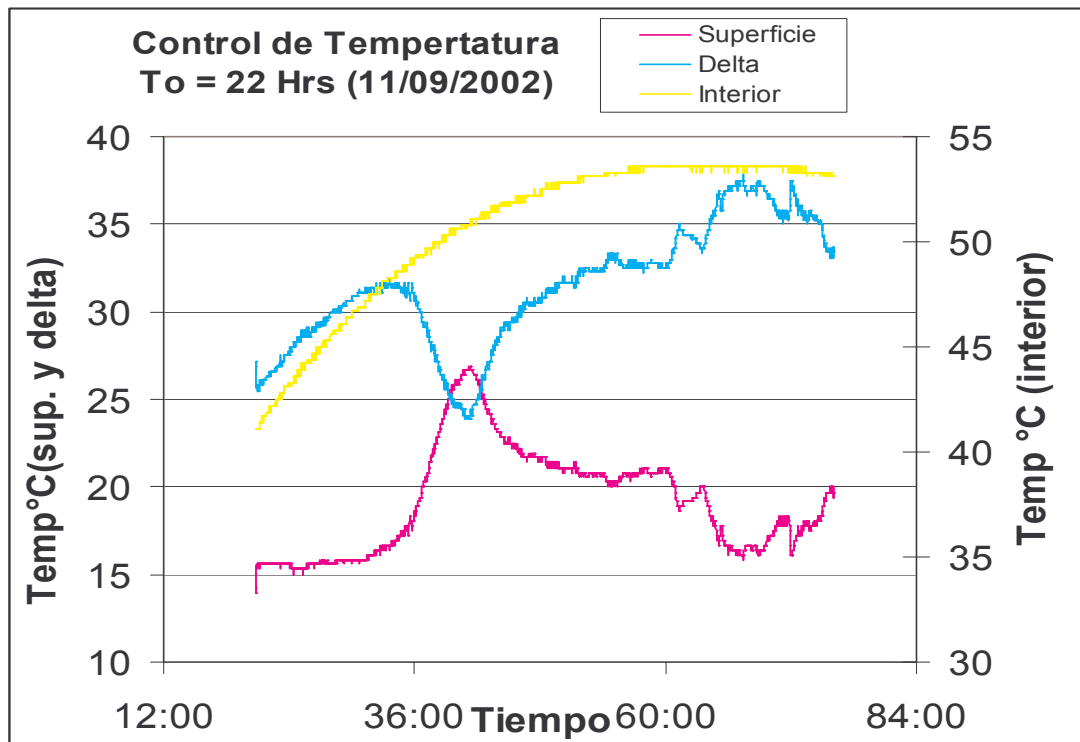
La capacidad de producción y entrega de hormigón durante la primera faena



La capacidad de producción y entrega de hormigón durante la segunda faena



### 5.2.- Mediciones de Temperatura



Del gráfico se puede apreciar que se cumple con las hipótesis establecidas en el estudio y modelación.

## **6.- Conclusiones y Recomendaciones**

- Una adecuada planificación de abastecimiento de materias primas, producción y colocación del hormigón, son esenciales para asegurar el éxito de la faena. Esto fue lo que permitió lograr la continuidad necesaria en la faena y no alterar los ritmos de la construcción.

Enfrentado a los problemas técnicos se pueden sacar las siguientes conclusiones

- Se comprueba una vez más que la máxima generación de calor de un hormigón masivo es a las 72 horas
- Para el cálculo de las temperaturas que se generan en la masa, parte importante es el cemento, además de materias primas y las condiciones locales. La elección del cemento Bio Bio Especial Siderúrgico fue la correcta.
- La correlación entre el cálculo teórico y las mediciones reales es casi exacta, con lo que se valida el método y se destaca la importancia del conocimiento de las condiciones locales y obviamente de las materias primas utilizadas, en especial el cemento que se destaca por su regularidad
- Los controles y procedimientos para no generar tensiones por temperatura fueron correctamente concebidos por cuanto no se registraron fisuras. Cabe destacar que la temperatura máxima generada se puede considerar baja para el hormigón colocado y espesor de la masa.