

RESPUESTA TÉRMICA DE PRESAS DE HORMIGÓN DURANTE EL PERÍODO DE EXPLOTACIÓN NORMAL

S. Paganini^{*}, J. Buraschi^{**}

^{*} Grupo de Métodos Numéricos en Ingeniería FI
Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina

^{**} Grupo de Métodos Numéricos en Ingeniería FI
Universidad Nacional del Comahue
RED Ingeniería SRL – Antártida Argentina 240 – Nqn

e-mail: sapagani@uncoma.edu.ar, jburasch@uncoma.edu.ar

Key words: Presas, Hormigón, Temperatura.

Resumen. La distribución de temperatura en el interior de una presa de hormigón durante su etapa de operación normal, luego de disipado el calor generado durante su construcción, es un elemento que debe ser precisamente caracterizado por la influencia que esos cambios generan en la deformación de la misma. En este trabajo se realiza un estudio detallado de la evolución estacional de este parámetro en el cuerpo de la presa de Piedra del Águila, se determina el marco esperable a partir de una modelación por elementos finitos y se comparan los resultados obtenidos con aquellos medidos en el sistema de auscultación dispuesto en los módulos de presa.

1. INTRODUCTION

El análisis de las deformaciones de una presa de hormigón en operación requiere de la comparación entre valores de desplazamiento medidos y aquellos esperados a partir de modelos de comportamiento en elementos finitos. En este marco resulta una herramienta básica conocimiento de la distribución de temperaturas en su interior y su variación con los cambios estacionales del ambiente que la rodea.

Este trabajo busca establecer un patrón de comportamiento estacional en la respuesta térmica de una presa como punto de partida para construir un modelo de respuesta global que permita servir de herramienta de confrontación con los parámetros medidos en el sistema de auscultación.

Como punto de arranque, se estudia la distribución de temperatura en sus contornos con el objeto de evaluar el aporte térmico de cada uno de los elementos que inciden sobre la presa.

Para ello se cuenta con los registros de un numeroso grupo de termómetros instalados en diferentes módulos de la presa Piedra del Águila, los cuales permiten validar las predicciones realizadas. En este sentido, en la figura N° 1 se detalla la ubicación de los dispositivos instalados en el módulo 28, de los cuales, un número significativo permanece en funcionamiento y con registros confiables.

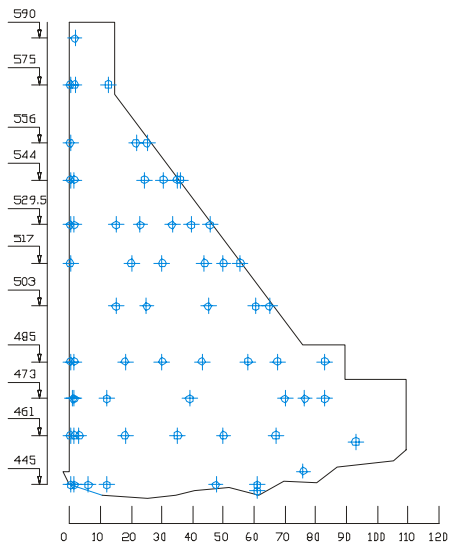


Figura N° 1

En segundo lugar se realiza una estimación básica de las características principales del comportamiento a partir de modelos unidimensionales.

Finalmente, se realiza un análisis bidimensional a fin de incluir la influencia de la geometría de la presa y las particularidades de la distribución de temperatura en los paramentos, comparándose los resultados del modelo numérico con aquellos medidos en los dispositivos instalados en el cuerpo de la misma.

2. CONDICIONES EN LOS CONTORNOS.

2.1.- Distribución de temperaturas en el paramento de aguas abajo

2.1.3. Modelos de Evolución

Como se observa en la figura N° 1 existe un numeroso grupo de dispositivos instalados prácticamente sobre la superficie del paramento de aguas abajo de la presa. Las mediciones realizadas en estos instrumentos desde la construcción configuran una base de datos con una cantidad de registros que superan los 10 000. A fin de caracterizar la temperatura en el paramento para cada época del año se procedió a su procesamiento, representación gráfica y cálculo de aquellos parámetros estadísticos que permiten resumir la respuesta a una ley de forma conocida. En este sentido, la observación directa de los gráficos de evolución sugieren una evolución en la temperatura del paramento caracterizada mediante los siguientes aspectos principales:

- de forma esperable, la evolución es del tipo periódica anual con valores extremos durante los meses de Enero/Febrero y Julio/Agosto, tal como se observa en la Figura N° 2 para un termómetro típico.
- La distribución de temperatura es regular en altura, con valores muy similares en cada toma de datos para el conjunto de dispositivos instalados en un módulo de presa.
- Similar regularidad se observa a lo largo del eje de presa, módulos 18, 22, 28 y 34.

Lo mencionado permite caracterizar la temperatura del paramento de la presa mediante un simple patrón de comportamiento. A fin de determinar los parámetros de este patrón se realizó un análisis estadístico de las mediciones de un conjunto de dispositivos de respuesta representativa del conjunto, el cual asumió dos patrones de evolución ligeramente diferentes:

- **A) Patrón estacional armónico:** la temperatura es asumida mediante una variación armónica de período anual respecto de un valor medio aproximadamente constante a lo largo de los años.
- **B) Patrón estacional, no armónico:** sobre los términos estacionales se considera un término correctivo tendiente a modificar la distribución de respuesta anual y las pequeñas diferencias de comportamiento respecto de la evolución armónica observada en los valores medidos.

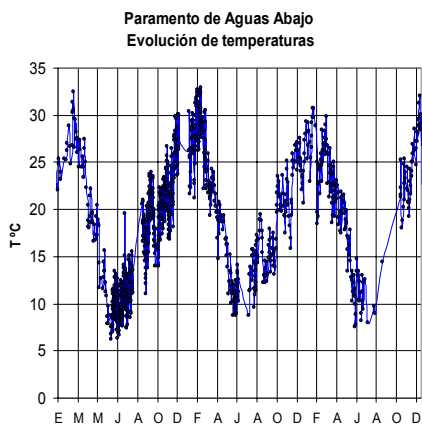


Figura N° 2

A) Análisis Estacional Armónico

A.1.) Procedimiento estadístico

Conforme a la forma de evolución observada en los registros de temperatura se asume que la misma responden a la siguiente ley temporal:

$$T = T_m + \rho \cdot \text{Cos}(\omega(t-\theta)) \quad (1)$$

Donde:

T_m = Temperatura media anual

ρ = amplitud estacional

$\omega = 2\pi/12$

τ = mes o fracción de mes (Ej.: $\tau = 1.5 \equiv 14$ de Febrero)

θ = mes o fracción de mes donde se registra el máximo estacional.

Con los registros “t” y “T” de cada termómetro durante el período 1992 – 2000 se determinaron, para cada instrumento, los parámetros de la ecuación anterior mediante procedimientos de regresión lineal múltiple basado en técnicas de mínimos cuadrados.

Conforme a la regularidad ya mencionada entre los diferentes dispositivos instalados en el paramento, se determinaron valores medios como promedio de los parámetros estadísticos de cada dispositivo.

Una formulación alternativa a (1) puede ser escrita como :

$$T = T_m + A \text{ Seno}(\omega t) + B \text{ Cos}(\omega t) \quad (2)$$

Las relaciones entre A, B, ρ y θ pueden establecerse en base a la representación de Argand, de donde:

$$\rho = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{A}{B}\right)$$

La ventaja –considerable- de trabajar con (2) surge que el proceso de minimización de las ecuaciones de residuo conducen a sistemas de ecuaciones lineales mientras que al aplicar directamente la ecuación (1) el sistema resultante es no lineal, incrementándose las dificultades de cálculo.

A.2.) Resultados Obtenidos

Del análisis descripto en A.1. surgen los siguientes parámetros de referencia:

- El valor de temperatura media anual en la superficie puede establecerse como promedio de los registros medios anuales obtenidos en los termómetros instalados en cotas 575,

556, 544, 517 y 503 de los módulos 18, 22, 28 y 34. Del proceso estadístico sobre las mediciones realizadas en los últimos 10 años, se obtuvo para el modelo armónico un valor de temperatura media anual igual a 19.5 °C ($\approx 20^\circ\text{C}$).

- Un punto significativo es la reducida dispersión respecto del valor citado de los valores medios de cada termómetro del módulo 28, el cual resultó $\pm 0.75^\circ\text{C}$ lo cual permite configurar con precisión el estado térmico del paramento.
- La respuesta medida en cada punto a lo largo del año puede caracterizarse como el valor medio indicado más una magnitud variable en forma periódica. La amplitud máxima de esas variaciones es establecida mediante el análisis estadístico del conjunto de mediciones en cada instrumento.
- La amplitud media, determinada como promedio de las amplitudes en cada punto medido a lo largo del paramento resulta de 7.5°C , aunque su dispersión es algo mayor a aquella calculada para los valores medios : $\pm 1.8^\circ\text{C}$

De acuerdo al modelo implementado las temperaturas medidas en la superficie del paramento de aguas abajo pueden caracterizarse mediante la siguiente expresión:

$$T_D [^\circ\text{C}] = T_D^m + A_D^m \cdot \text{Cos}[\omega(\tau - \tau_0)]$$

donde:

$$T_D^m \approx 20^\circ\text{C}; \quad A_D^m \approx 7.5^\circ\text{C}$$

$$\omega = 2\pi/12, \quad \tau = \text{mes (1=enero, 2=febrero, etc)}$$

$$\tau_0 = \text{mes en el cual la temperatura es máxima: } 0.71 \text{ (21 de Enero)}$$

En síntesis, la temperatura medida en el paramento de aguas abajo, conforme el modelo estacional, resulta:

$$T_D [^\circ\text{C}] = 20 + 7.5 \cdot \text{Cos} \left[\frac{2\pi}{12} (\tau - 0.71) \right]$$

A.3. Análisis de la “performance” del modelo armónico.

El grado de ajuste de la aproximación propuesta a los registros medidos puede establecerse mediante algunos parámetros objetivos, tales como el “coeficiente de correlación” y el “desvío”. Para el primer caso, se obtuvieron coeficientes de correlación elevados, del orden del 90% lo cual resulta indicativo de que la distribución propuesta “captura” la esencia del comportamiento medido en obra.

Sin embargo, la observación directa de la curva de ajuste y la comparación con los valores medidos muestran algunas diferencias producto de mecanismos no representados por el modelo. Efectivamente, como se observa en la figura N° 3 para un termómetro típico, la evolución predicha por el modelo armónico “anticipa” los máximos aproximadamente un mes. Se entiende que una mejor distribución podría ser obtenida manteniendo la periodicidad anual pero introduciendo una función de corrección variable en el tiempo, como se verá en el siguiente punto.

B) Corrección del ajuste estacional

A fin de considerar las variaciones observadas respecto de una evolución de tipo armónico, se introduce un término correctivo adicional igual a:

$$T_c = A_C \cdot [\text{Seno}(\omega t)]^2 + B_C \cdot \text{Seno}(\omega t) \cdot \text{Cos}(\omega t) = \text{Seno}(\omega t) [A_C \cdot \text{Seno}(\omega t) + B_C \cdot \text{Cos}(\omega t)] = \text{Seno}(\omega t) [\rho_C \cdot \text{Cos}(\omega(t - \theta_C))] \quad (3)$$

Reiterando el análisis estadístico sobre los registros de los termómetros del paramento pero adicionando a los términos estacionales el término correctivo indicado por la expresión (3), se obtienen los valores del conjunto de parámetros que caracterizan el modelo. En síntesis, la expresión corregida para la evolución de temperaturas en el paramento de aguas abajo puede considerarse como:

$$T = 17.94 + 7.87 \cdot \text{Cos}[\omega(t - 0.68)] + \text{Seno}[\omega t] \cdot (3.51 \cdot \text{Cos}[\omega(t - 1.56)])$$

En la Figuras N° 4 y 5 se representó la función de ajuste mencionada y los registros medidos en un termómetro típico. En ellas se observa que el factor de corrección incorporado permite mejorar la predicción de los períodos en donde se desarrollan valores picos (máximos y mínimos). Si bien los valores de temperatura media y amplitud predichos por ambos modelos son muy similares, la principal diferencia entre ambos radica en que el modelo corregido predice temperaturas máximas desfasadas aproximadamente 1 mes respecto del modelo estacional, situación que, como se indicara, se corresponde con la tendencia puesta de manifiesto por los registros instrumentales.

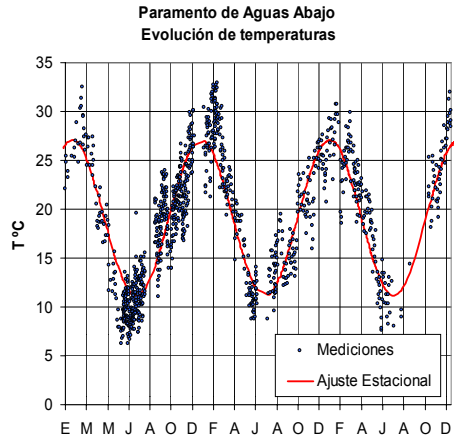


Figura N° 3

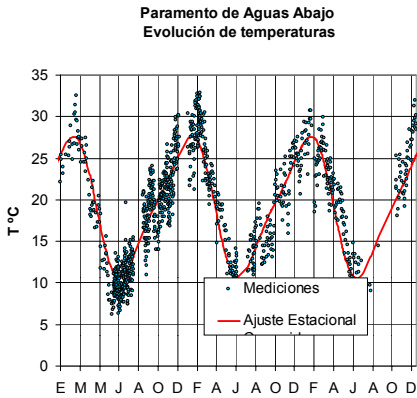


Figura N° 4

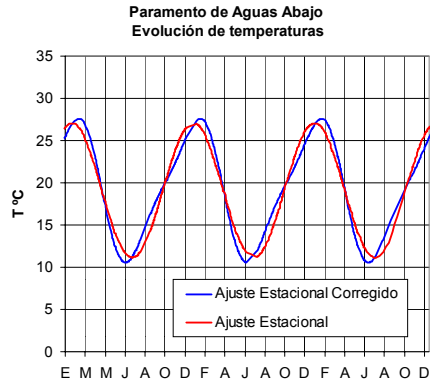


Figura N° 5

2.2. Distribución de temperaturas en el paramento de aguas arriba

La temperatura en la cara de aguas arriba de la presa puede asumirse igual a la temperatura del agua del embalse. Su evolución a lo largo del tiempo presenta un carácter estacional el cual puede ser descrito mediante la siguiente expresión:

$$T_U [^{\circ}\text{C}] = T_U^m(y) + A_U^m(y) \cdot \text{Cos}[\omega(\tau - \tau_0 - \varepsilon)]$$

Donde:

$T_U^m(y)$ = Temperatura media del agua a una profundidad y .

$A_U^m(y)$ = Amplitud estacional a una profundidad y .

ε = diferencia de fase entre la variación de temperatura de la cara de aguas arriba y la de aguas abajo.

2.2.1. Distribución de temperaturas medias

A. Aproximación de Bofang-Zhanmei

En “Design Specifications of Concrete Arch Dams of the People’s Republic of China” se recomienda la adopción de una distribución exponencial asintótica a la temperatura del fondo, de acuerdo a una ley como la indicada a continuación:

$$T_W^m(y) = c + (T_{surf} - c)e^{-0.04y} \quad \text{con:} \quad c = \frac{(T_{bot} - g \cdot T_{surf})}{(1 - g)} \quad ; \quad g = e^{-0.04H}$$

En la figura N° 6 se representó la distribución aproximada de acuerdo a la expresión anterior para el caso de Piedra del Águila en donde:

$$T_{bot}^m \approx 8^\circ\text{C}$$

y

$$T_{surf}^m \approx 13^\circ\text{C}$$

Sin embargo, la distribución indicada no se ajusta a los valores de temperatura medidos en Piedra del Águila, fundamentalmente en los tramos superiores, tal como se verá a continuación.

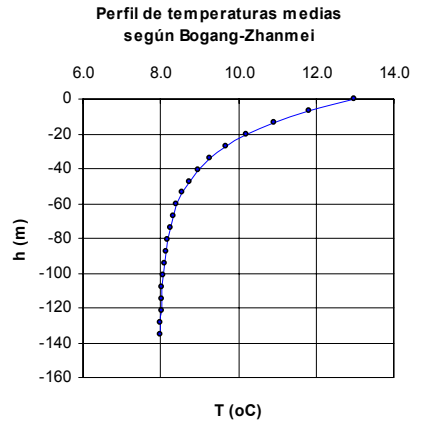


Figura N° 6

B. Distribución de temperaturas medias de las mediciones.

Existen en el cuerpo de la presa de Piedra del Águila un muy importante número de termómetros instalados con el propósito principal de evaluar el proceso de enfriamiento progresivo posterior a la construcción. En particular, sobre el paramento de aguas arriba, se instalaron termómetros a una distancia de aproximadamente 10 cm de la cara de hormigón en correspondencia con las cotas 587,575, 556, 544, 530, 517, 503, 485, 473, 461 y 445. Tal distribución se instrumentó para los módulos 18,22, 28 y 34.

Por otra parte, dentro de las tareas de monitoreo ambiental del embalse llevadas adelante por el concesionario del aprovechamiento se realiza la medición de temperatura del agua del lago hasta profundidades variables de 70 a 80 m con intervalos de 1 a 5 m.

A fin de proceder al análisis sistemático del conjunto de información disponible se implementó la siguiente metodología:

- *Carga de datos y graficación* de la respuesta registrada a lo largo de los años por los termómetros instalados a 10 cm del paramento.
- *Clasificación de la respuesta* observada según el grado de confiabilidad de los registros. El mismo fue establecido en base al grado de coherencia que un registro particular posee respecto de la distribución de temperaturas del sector en donde se encuentra instalado y de la media obtenida para su cota de instalación en el resto de los módulos.
- *Cálculo de los valores de temperatura media y de la amplitud de las variaciones*

estacionales: Este análisis partió de asumir que la temperatura en cualquier punto responde al modelo de evolución armónica indicado para T_U . Por otra parte, se observa de los gráficos de respuesta que tal modelo representa ajustadamente la forma en que se distribuyen las temperaturas en un punto a lo largo del año. En base a la forma asumida se realizó un análisis estadístico consistente en calcular los parámetros del modelo de evolución por el método de regresión lineal múltiple. Los valores de temperatura media anual y amplitud térmica calculados se detallan en la Tabla N° 1. En la misma se detalla también el grado de correlación del modelo con los registros disponibles y su desvío estándar como medida de la dispersión de los registros respecto de los valores medios anuales.

- *El grado de correlación* obtenido es en todos los casos elevado, a excepción de las mediciones en los niveles inferiores en donde la dispersión de los registros es más acentuada y su distribución a lo largo del tiempo más irregular que en los niveles superiores. No obstante ello, la amplitud en tales profundidades es muy reducida, del orden de 1°C, por lo cual el hecho carece de significación en relación a la caracterización de la temperatura a lo alto del paramento.

Finalmente, a modo de síntesis, en la figura N° 7 se representó la distribución de temperaturas medias en el embalse para diferentes profundidades registradas en los módulos de presa y directamente en el agua durante las tareas de monitoreo ambiental.

De su observación es posible extraer un conjunto de conclusiones muy significativas:

- *De los datos*: Existe una marcada coherencia de los valores medios determinados para cotas similares en los diferentes módulos, con dispersiones reducidas del orden de 1°C o inferiores.
- La coherencia mencionada se mantiene cuando se comparan los valores medidos en el paramento con aquellos registrados en el agua. Esta conclusión es muy significativa ya que las determinaciones se realizan con dispositivos y metodologías muy diferentes por lo cual permiten validarse una a otra y concluir en que la distribución indicada representa en forma realista las temperaturas existentes en la presa.
- En forma contraria a lo esperado en base a la distribución sugerida por Bofang-Zhanmei, se observa una permanencia de los valores medios en los primeros 25 m de profundidad en donde la temperatura media anual del agua resulta muy similar e igual a 13 °C.
- Luego de ese “escalón” se observa una reducción paulatina de temperaturas con la profundidad, fundamentalmente en el rango 25-70 m, por debajo del cual los valores de temperatura media se mantienen prácticamente constantes e iguales a 8 °C.

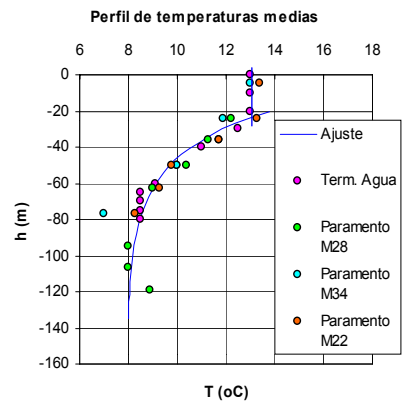


Figura N° 7

- La respuesta observada por debajo de los 25 m de profundidad puede representarse con bastante precisión con el modelo de distribución de Bofang-Zhanmei como se observa en la figura anterior en la cual se incluye junto a los valores medios instrumentales, el ajuste propuesto. En el mismo, se ha supuesto un valor ficticio para $T_{surf}=21$, considerándose su validez únicamente para el rango de profundidades inferior a 25 m.

En síntesis, la distribución de temperaturas medias sobre el paramento de aguas arriba de Piedra del Águila puede considerarse como:

- Entre 0 y 25 m: temperatura media anual igual a 13 °C
- Entre 25 m y fondo: $T_W^m(y) = c + (T_{surf} - c) \cdot e^{-0.04y}$
con $T_{surf}=21$, $c=7.941$ ($T_{bot}=8^\circ\text{C}$)

El grado de aproximación del ajuste propuesto es caracterizado por el desvío estándar respecto de los valores medidos: ± 0.4 °C .

2.2.2. Amplitud estacional

A. Aproximación de Bofang-Zhanmei

En forma similar a lo indicado en relación a la distribución de los valores de temperaturas medias en el paramento de la presa, en “Design Specifications of Concrete Arch Dams of the People’s Republic of China” se recomienda la adopción de una distribución con decrecimiento exponencial de las amplitudes estacionales de acuerdo la siguiente ley:

$$A_W(y) = A_{W0} \cdot e^{-0.018y}$$

En la expresión indicada A_{W0} representa el valor de la amplitud estacional en superficie, que para el caso del embalse Piedra del Águila la misma resulta del orden de ± 5.5 °C.

En función de lo mencionado, se representó en la figura N° 8 la distribución esperable de amplitudes de acuerdo al modelo indicado.

No obstante, en forma similar a lo acontecido con el modelo de distribución de temperaturas medias, la variación de amplitudes con la profundidad predicha por la expresión anterior no permite representar con precisión las particularidades del embalse Piedra del Águila. Esta singularidad es estudiada en el punto siguiente.

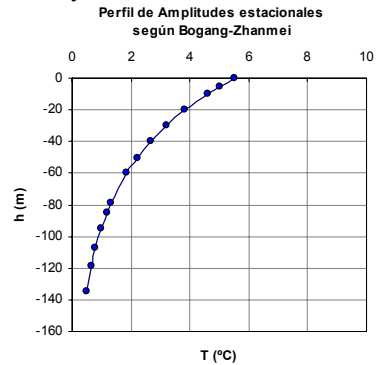


Figura N° 8

B. Distribución de amplitudes estacionales en los registros obtenidos en el sistema de auscultación.

Se detallan en este apartado los valores de amplitudes medias determinadas en el estudio estadístico realizado sobre el conjunto de registros de temperatura disponibles en los módulos 18, 22, 28 y 34 y que fuera oportunamente descripto en el punto 2.1.2.

De ese análisis se obtuvieron las amplitudes medias de la respuesta de cada instrumento, las cuales son representadas en la figura N° 9.

En la misma se incluyen las amplitudes características de aquellas mediciones obtenidas en diferentes profundidades del embalse durante las tareas de monitoreo ambiental.

Resultan destacables similares observaciones a aquellas indicadas en relación al perfil de temperaturas medias, esto es:

- Existencia de una buena correlación entre los registros obtenidos en el paramento de la presa y las mediciones por medio de termómetros de mercurio en el embalse.
- La amplitud estacional en los primeros 25 m resulta prácticamente constante e igual a 5.5 °C, situación contrapuesta a la indicada por el modelo de Bofang-Zhanmei.
- Por debajo de los 25 m la amplitud se reduce en forma significativa con la profundidad hasta hacerse prácticamente imperceptible en cercanías del fondo del lago frente a los módulos más elevados.

En síntesis, es posible caracterizar la magnitud de amplitudes estacionales en el paramento de aguas arriba en base a las siguientes consideraciones:

- Entre 0 y 25 m: Amplitud igual a 5.5 °C.
- Entre 25 m y fondo: $A_W(y) = 5.5 e^{-0.025(y-25)}$

2.2.3. Temperaturas instantáneas

En base a lo analizado en los puntos anteriores el valor de la temperatura en la superficie del paramento de aguas arriba puede caracterizarse en base a las siguientes expresiones:

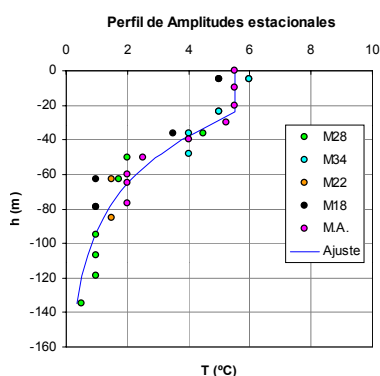


Figura N° 9

Para $0 \leq y \leq 25$ m:

$$T_U [^\circ\text{C}] = 13 + 5.5 \cdot \text{Cos} \left[\frac{2\pi}{12} (\tau - \tau_o - \varepsilon) \right]$$

Para $y > 25$ m:

$$T_U [^\circ\text{C}] = 7.941 + 13.059 e^{-0.04y} + 5.5 e^{-0.025(y-25)} \cdot \text{Cos} \left[\frac{2\pi}{12} (\tau - \tau_o - \varepsilon) \right]$$

3. MODELO BÁSICO DE INTERPRETACIÓN

3.1. Ecuación de gobierno y parámetros constitutivos.

A fin de estimar las características generales de la distribución de temperaturas en el interior de la presa y su régimen de variación a lo largo del año se planteó un sencillo modelo 1D sobre el cual se resolvió la ecuación de transferencia del calor por conducción no estacionaria:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho \cdot c}{K} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Durante la etapa de construcción se realizaron numerosos ensayos sobre los hormigones de diferentes dosificaciones que integran el cuerpo de la presa, determinándose en cada caso el coeficiente de difusividad térmica $D=K/\rho c$. Los valores medios obtenidos, para los hormigones de la presa, resultaron:

Hº 4,5/90 $D=0,0031 \text{ m}^2/\text{h}$ $\rho = 2460 \text{ Kg}/\text{m}^3$ $a/c=0,57$ Cont. Cem. $135 \text{ Kg}/\text{m}^3$

Hº: 12/90 $D=0,0033 \text{ m}^2/\text{h}$ $\rho = 2510 \text{ Kg}/\text{m}^3$ $a/c=0,45$ Cont. Cem. $180 \text{ Kg}/\text{m}^3$

adoptándose, para el modelo básico, un valor medio de $D=0,0032$ para ambos tipos de hormigones.

3.2. Solución numérica

Se consideraron 3 casos básicos, representativos de las cotas 544, 529 y 517 de la presa. La longitud del dominio 1D coincide con el ancho de la presa en esas cotas y las condiciones de borde son aquellas resultantes del modelo estadístico armónico para las cotas indicadas.

La solución fue obtenida directamente por un esquema de diferencias explícito con un Δt igual a 15 días. El muy reducido valor de la difusividad térmica asegura que, aún para valores de Δt como los indicados (e incluso mayores) se satisfagan las condiciones de estabilidad de la solución.

3.2.1. Solución en el tiempo

En la figura N° 10 se representó la evolución esperable en el tiempo para diferentes puntos ubicados del interior de la presa en la cota 544 durante un año típico. La solución para el resto de los niveles posee características similares.

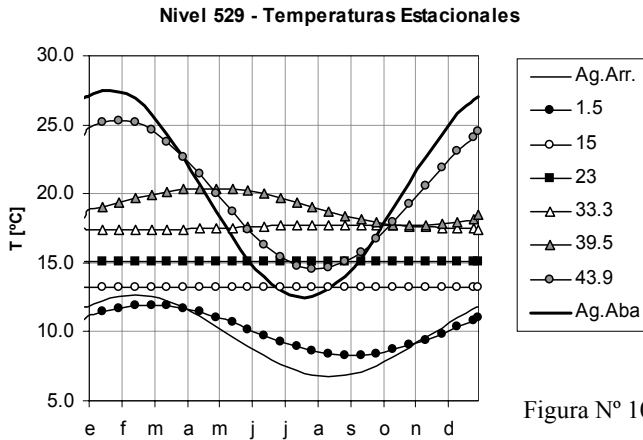


Figura N° 10

La evolución y distribución de las temperaturas estimadas en el interior de la presa presentan las siguientes características principales:

- Evolución estacional, armónica, a lo largo del año.
- Amplitudes rápidamente decrecientes hacia el interior de la presa.
- Desfasaje significativo del instante de ocurrencia de los máximos con relación a los paramentos.

En síntesis, la evolución de las temperaturas en el interior de la presa mantiene un patrón de respuesta armónico aunque fuertemente desfasado en cada punto respecto de la evolución en los paramentos.

3.2.2. Parámetros de comportamiento.

A. Distribución de temperaturas medias

Considerando las características estacionales de la respuesta en el interior, la misma puede ser caracterizada mediante los valores de Temperatura media, Amplitud de la respuesta y Desfasaje en el tiempo.

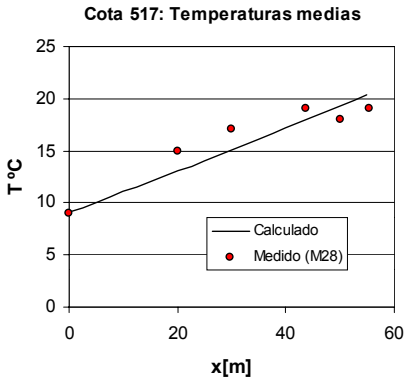


Figura N° 11

En las figuras N° 11 a 13 se representó la distribución de temperaturas medias a lo ancho de la presa en las cotas analizadas.. En las mismas se referenciaron los valores medios medidos, obtenidos por análisis estadístico de los termómetros instalados en el cuerpo de la presa.

Se hace incapié que tal distribución no se corresponde con la distribución de temperaturas instantáneas en ningún momento a lo largo del año.

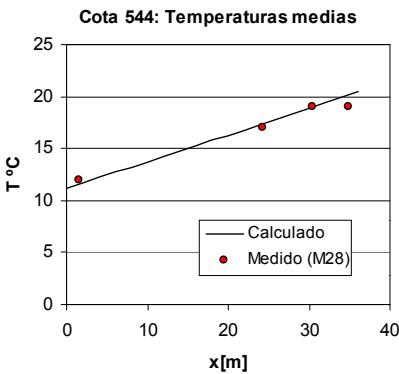


Figura N° 12

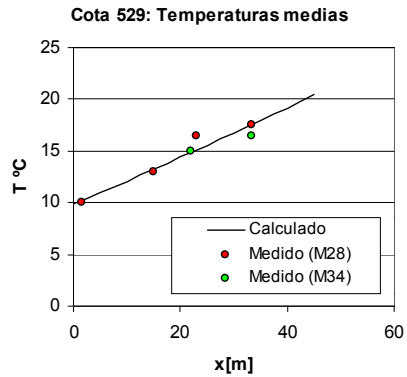


Figura N° 13

B. Distribución de Amplitudes.

Un análisis similar se realizó en relación a las amplitudes de variación estacional observadas en el interior de la presa y su comparación con aquellas predichas por el modelo básico de interpretación. En las figuras N° 14 a 16 se representan los resultados obtenidos. De la distribución obtenida resultan significativos los siguientes puntos:

- El modelo básico 1D predice amplitudes cuya magnitud y distribución se ajustan a las medidas en obra.
- La respuesta observada permite caracterizar una “cáscara” de aproximadamente 10 m en la

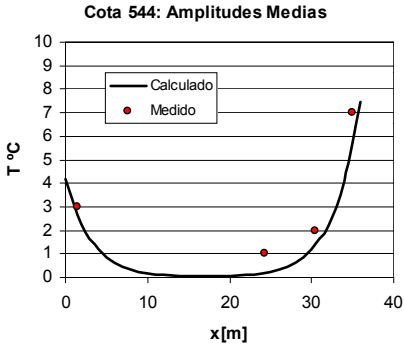


Figura N° 14

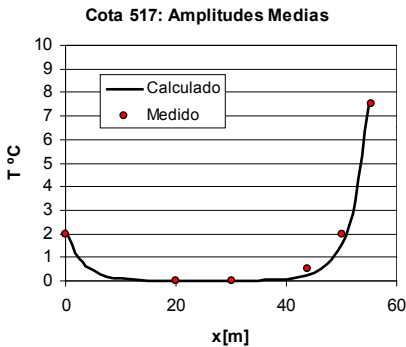


Figura N° 15

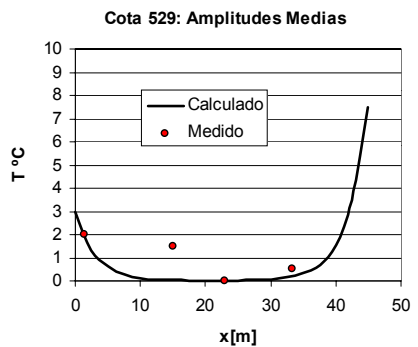


Figura N° 16

cual las temperaturas presentan variaciones periódicas.

- El “núcleo” de la presa, no resulta afectado por las variaciones estacionales, manteniendo una temperatura prácticamente constante a lo largo del año.
- Las deformaciones estacionales observadas en los registros de péndulos y mediciones microgeodésicas de la presa, responderían únicamente a aquellas generadas por el enfriamiento y calentamiento estacional de la “cáscara” mencionada.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO BÁSICO. ANÁLISIS 2D

A fin de incorporar dentro del modelo de comportamiento las particularidades que impone la geometría de la presa y la distribución de temperaturas en ambos paramentos se construyó un modelo 2D representativo del módulo 28 de la presa de Piedra del Águila. La solución de la ecuación de gobierno –similar a la indicada para el problema 1D pero añadiéndole un término convectivo en la dirección “y”- fue calculada mediante para la malla de elementos finitos que se muestra en la Figura N° 17.

4.1. Resultados instantáneos

En la figura N° 18 se representó la evolución estacional a lo largo del año de las temperaturas calculada en diferentes puntos de la presa, para la cota 529. En la misma se evidencian claramente las características puestas de manifiesto por el modelo básico, esto es, el amortiguamiento de las variaciones estacionales hacia el centro de la presa.

Se observa también un leve apartamiento en la curva de evolución respecto del modelo armónico en función de haberse considerado aquí el patrón estacional no armónico para la representación de las temperaturas del paramento de aguas abajo.

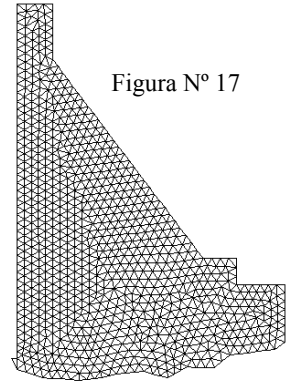
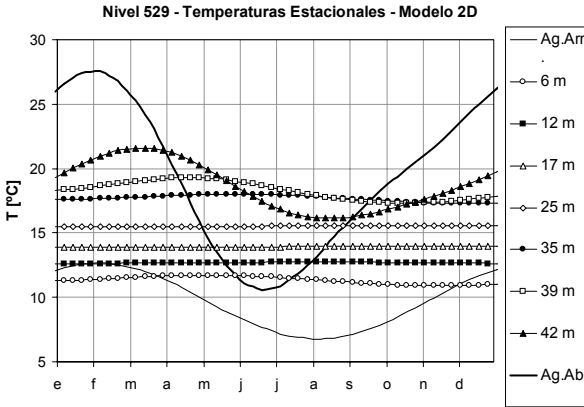


Figura N° 17

Figura N° 18

4.2. Parámetros de Comportamiento

En forma similar a lo realizado en el modelo 1D se determinaron los valores medios anuales de temperaturas resultantes de modelo para puntos característicos del interior de la presa. Su distribución en las cotas analizadas junto con las amplitudes estacionales en cada nivel se representaron en las figuras N° 19 a 24.. En las mismas se representaron también los valores medidos en el sistema de auscultación a fin de poner en evidencia la correlación entre lo predicho y lo desarrollado en la presa.

Cota 544- Temperaturas Medias

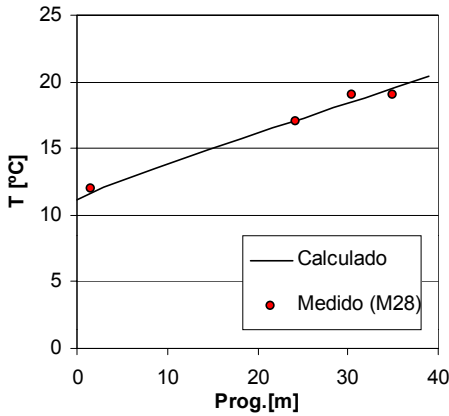


Figura N° 19

Cota 544- Amplitudess Medias

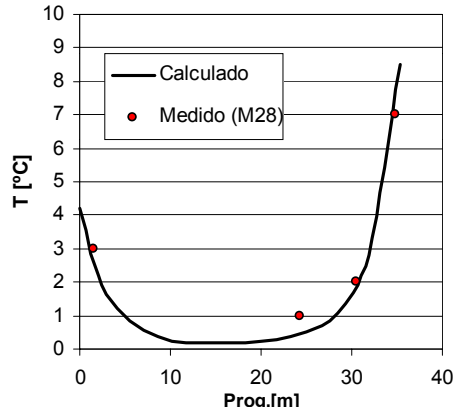


Figura N° 20

Cota 529- Temperaturas Medias

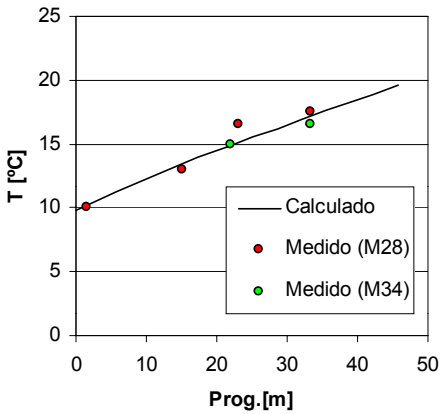


Figura N° 21

Cota 529- Amplitudes Medias

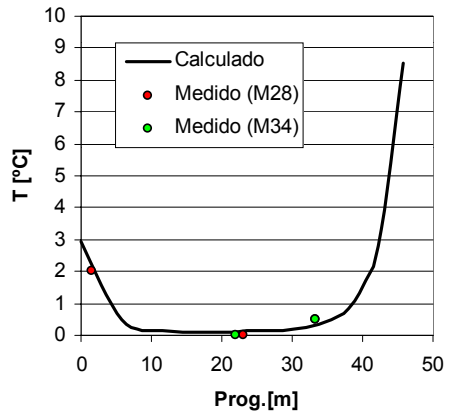


Figura N° 22

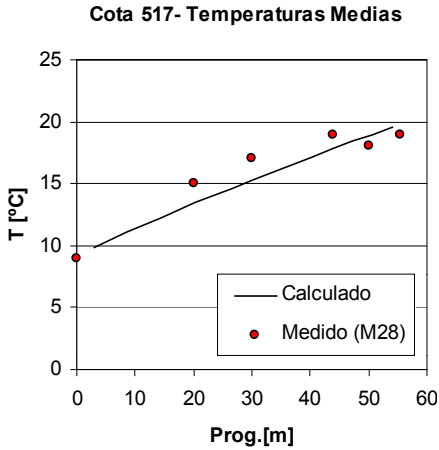


Figura N° 23

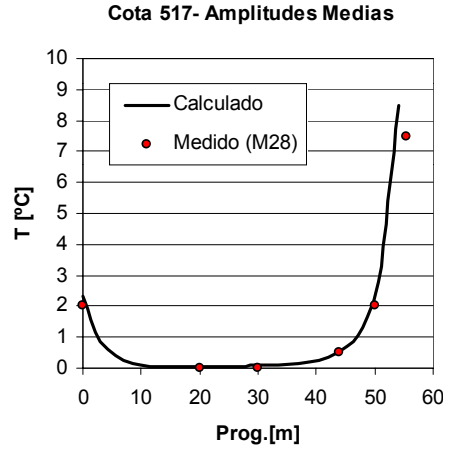


Figura N° 24

5. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió caracterizar tanto la distribución de temperaturas en el interior de la presa como sus variaciones estacionales generadas por los cambios experimentados en el aire y en el agua. Este análisis, aún considerando modelos sencillos de interpretación, permitió cuantificar ajustadamente tanto los valores esperables en cada instante de tiempo como su distribución en el cuerpo de la presa.

La consideración de la respuesta no estacionaria de la presa permitió justificar los valores observados en el sistema de auscultación instalado y conformar una base confiable para la estimación de deformaciones de carácter estacional. Permitió además caracterizar el horizonte final de temperaturas medias esperables una vez disipado el calor generado durante su construcción. (Figura N° 25)

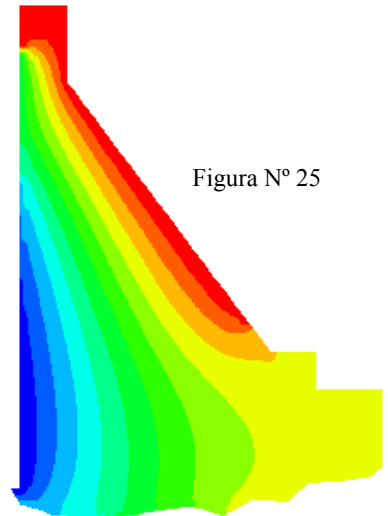


Figura N° 25

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a las autoridades y profesionales de Hidroeléctrica Piedra del Águila por permitir la utilización de los registros de temperatura de la presa para la realización de este trabajo. Agradecen también a los profesionales de la empresa RED Ingeniería SRL por poner a disposición esa información y por las valiosas y desinteresadas opiniones para colaborar en su desarrollo.