

# *Efectos y remedio de la expansión del hormigón de la presa “Baygorria”*

Julio C. Patrone.

Sub-Gerente Ingeniería de Presas y Embalses, U.T.E, Uruguay

**Resumen:** La presa “Rincón de Baygorria”, situada sobre el río Negro (Uruguay) fue afectada a pocos años de su puesta en servicio por un fenómeno que comprometía seriamente la generación de su Central hidroeléctrica. El problema fue estudiado con el auxilio de la técnica de auscultación de presas y permitió comprobar el desarrollo de una modesta pero nociva reacción álcali- sílice en el cono de hormigón de apoyo de las turbinas. El trabajo presenta las etapas de investigación cumplidas y la definición del proyecto de intervención definitiva.

## **Introducción**

La presa “Rincón de Baygorria” es una estructura de hormigón de gravedad, fundada sobre un subsuelo basáltico, cuyo macizo presenta diferentes grados de alteración y diaclasado. Su sección transversal típica puede observarse en la Fig. 1. El embalse a que dio lugar opera con escasas fluctuaciones de nivel, en torno a la cota 54,00 m.s.n.m.

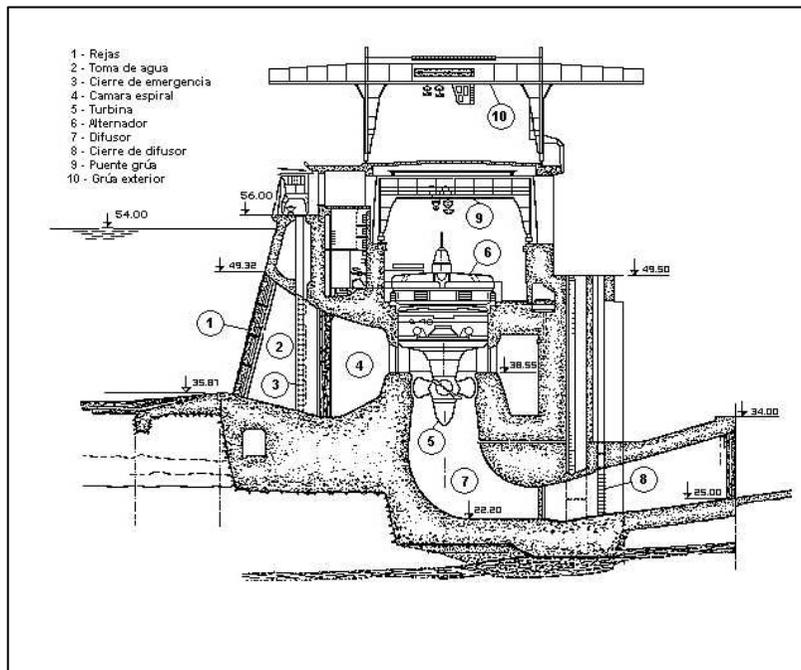


Figura 1.

Consta de una cortina de inyecciones de impermeabilización, perforada desde la galería más profunda, bajo la zona de la casa de máquinas y el aliviadero. Asimismo durante su construcción, fue necesario consolidar capas de basalto muy fisurado bajo los tubos de aspiración de las turbinas, mediante inyecciones de consolidación, que se controlaron mediante el relevamiento de puntos testigo en la citada galería.

Las tres turbinas son del tipo Kaplan, de eje vertical y su sección transversal típica se muestra en la Fig. 2. La entrada en servicio fue en 1960.

Sin embargo, en febrero de 1966, luego de vaciada la cámara espiral de la Turbina I, para ejecutar una inspección de las zonas sumergidas, se observó que algunas palas móviles del distribuidor se encontraban atascadas contra la estructura fija de la turbina.

La luz de montaje entre palas y anillo inferior y entre aquellas y la tapa de turbina había desaparecido. El atascamiento fue acompañado de la rotura de varias bielas. Una situación similar se observó en las otras dos turbinas cuando fueron inspeccionadas.

## 2. PRIMERAS MEDIDAS ADOPTADAS.

La primera medida adoptada, en consulta con el fabricante, fue la restitución de las luces mediante el esmerilado del anillo superior. Allí también se propuso realizar una tapa de turbina regulable en altura, que permitiera ajustar la posición del anillo superior. Esta solución implicaba el desmontaje de la unidad por un período prolongado, lo que no era factible y además no reconocía una causa de la anomalía observada, por lo cual no eran de descartar otros desórdenes.

Ante tal falta de certeza, U.T.E como propietaria y operadora de la presa, resolvió incluir el rebaje del anillo superior dentro del plan de mantenimiento programado de las turbinas, a la par que instrumentó los primeros controles de luces entre anillos del distribuidor y palas móviles. Si, como se pensaba en aquel momento, las deformaciones responsables del atascamiento debían amortiguarse y cesar después de unos

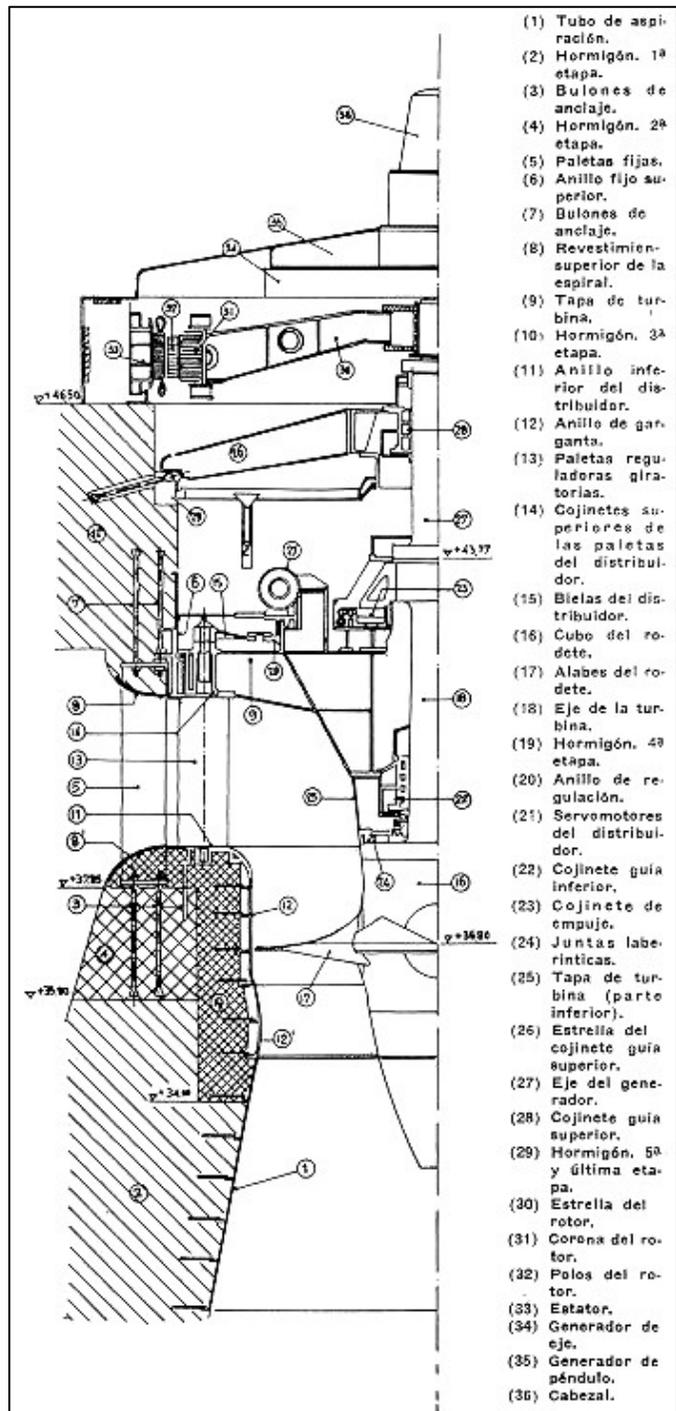


Figura 2

pocos años, la medida resultaba sencilla, rápida y económica. Sin embargo, los hechos fueron mostrando que el acortamiento de luces continuaba a ritmo sensiblemente constante, sin mayores indicios de amortiguamiento. Es así que hacia 1978 U.T.E decide encarar una campaña sistemática destinada a investigar el origen del disturbio, y resolverlo, en lo posible, actuando sobre el mismo.

### **3. LA POST-AUSCULTACION.**

Si bien la existencia de los desplazamientos fue siempre clara, las mediciones efectuadas no tenían precisión suficiente como para definir la velocidad del acortamiento de luces, sus variaciones en el tiempo y sobre todo la localización de la anomalía. Se trataba de mediciones muy influidas por la temperatura, por las imperfecciones de los blindajes, incluyendo los espesores esmerilados y de irregular periodicidad.

Para definir el programa de control, al que podríamos llamar como la auscultación de los hechos consumados, o directamente la “post-auscultación”, se analizaron las causas probables, que se agruparon en tres categorías:

- desajuste del vínculo entre las componentes de la turbina, básicamente la tapa, y la obra civil.
- deformaciones de los hormigones del cono y la espiral .
- deformaciones diferenciales del subsuelo de cimentación.

Cada uno de estos esquemas daba origen a efectos medibles diferentes, que podrían ser corroborados con la auscultación a implementar. Por ej.en caso de cumplirse la primera hipótesis, la tapa de turbina descendería sólo o con deformación de su anillo de apoyo y ni las palas fijas del distribuidor ni el anillo inferior registrarían deformaciones; en cambio debería aparecer una diferencia de nivel en el anillo superior entre las palas fijas y móviles.

La auscultación comprendió a la presa, en la zona de la casa de máquinas y la galería de control profunda y especialmente la zona sumergida de la Turbina II.

Se instalaron referencias para nivelación de precisión en los diferentes módulos estructurales de la presa, para comprobar deformaciones inducidas desde la fundación, complementadas con indicaciones de péndulos directos e invertidos ubicados en pozos de bombas de dichas estructuras.

En las cámaras entre turbina y alternador de las tres unidades, se colocaron bases en posiciones diametralmente opuestas para medición de deformaciones y rotaciones mediante extensómetros de barra invar de un metro y clinómetro ópticos, respectivamente. Su propósito fue comprobar desplazamientos relativos entre la tapa de turbina y la viga anular de apoyo, así como deformaciones e inclinaciones de ésta última.

Por último, en la zona más comprometida por el incidente, esto es en la zona sumergida de la turbina, se instalaron bases para medición de distancias entre los anillos superior e inferior del distribuidor y sobre las propias palas fijas. Se utilizó un dispositivo especial, denominado “distometer” (de la casa Kern), calibrado en cada medición, construido en metal invar y dotado de alambre invar para la ejecución de las mediciones. Como complemento, se colocaron bases para clinómetro óptico en los anillos superior e inferior, tendientes a detectar giros por deformaciones diferenciales tanto del hormigón del cono, como de la viga anular de apoyo de la tapa de turbina.(Fig.3). Sobre la pared de la espiral y del lado exterior del cono, se instalaron bases para extensómetros, orientadas a medir elongaciones del hormigón.

Los instrumentos fueron instalados en 1981 y la frecuencia de mediciones fue mensual en las estructuras siempre accesibles y al menos anual en la zona sumergida, en coincidencia con los períodos de mantenimiento programado de las turbinas.



- en la zona sumergida, tanto las mediciones con distometer entre anillos superior e inferior del distribuidor, como los giros de éste último, presentaron una evolución neta prácticamente lineal en un período de casi siete años. No se observaron efectos irreversibles ni sobre las palas fijas, ni sobre el anillo inferior ni sobre la pared externa del cono y la espiral. (Fig.4).



Figura 4.

Estas conclusiones permitieron confirmar la existencia y vigencia del proceso de acortamiento de luces entre anillos, con la propiedad de que el acortamiento en la línea de medida más próxima al eje de la turbina era claramente superior al registrado en la línea exterior, indicación que resultó compatible con el giro observado en el anillo inferior, en tanto el anillo superior mostró giros despreciables.

La velocidad media de acortamiento se situó en el orden de 0,2 mm por año, valor a priori modesto, pero altamente perjudicial si se tienen en cuenta las tolerancias de montaje y las exigencias de servicio del equipamiento mecánico.

Estas comprobaciones situaron el problema en nítida correspondencia con el segundo grupo de hipótesis, en particular con aquellas que cuestionaban el comportamiento del hormigón del cono. Como consecuencia, fue descartado aquí un efecto global, que pudiera comprometer la estabilidad de la presa, tal como se desprendía de las causas que asignaban el problema a las características del subsuelo de fundación, ampliamente tratado durante la construcción de la obra.

Por otro lado, sin embargo, las observaciones in situ mostraron que el hormigón se encontraba en excelente estado, sin fisuras visibles, ni siquiera en la zona de juntas entre estapas de colado.

Al contrario, en la parte superior del cono, en el acordamiento entre éste y el anillo de garganta se observaron deformaciones significativas del metal, en toda la circunferencia del anillo. La Fig. 5, como croquis simplificado muestra los decalajes entre piezas metálicas, que en origen no deberían existir.

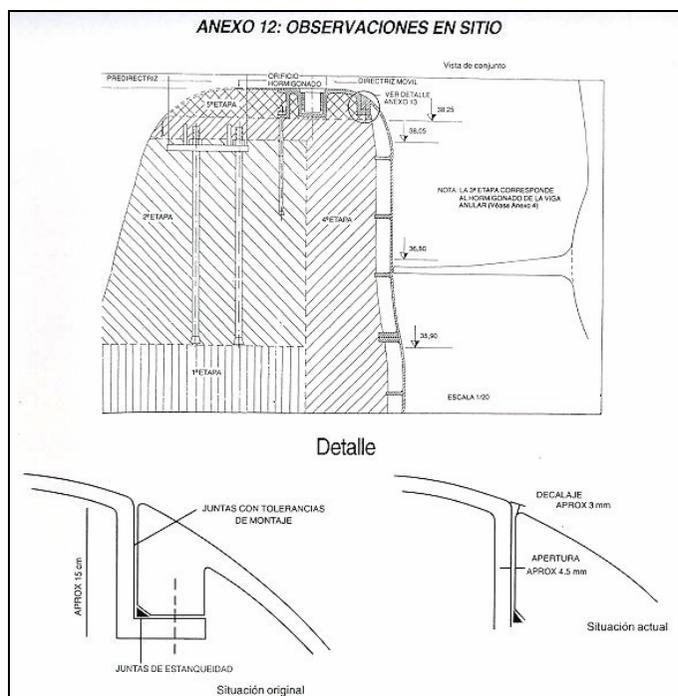


Figura 5.

### **5. ANALISIS DE CAUSAS.**

De lo expuesto, no pudo obtenerse a priori una explicación franca. No obstante, resultó claro que los desplazamientos irreversibles medidos debían estar vinculados a uno o más fenómenos localizados de deformación. La hipótesis más probable se centró en la expansión del hormigón del cono, en particular en el de última etapa de colado (Fig. 5). Esta fase, llamada cuarta etapa, tuvo dificultades de ejecución durante la obra, debido a la estrechez del sitio y la cantidad de armaduras de anclaje presentes. Allí se coló un hormigón de menor tamaño máximo de agregado grueso, también de origen basáltico como en el resto de la obra, y se realizó una mezcla más plástica y trabajable, incluso con adición de agentes aireantes y fluidificantes.

Aquí se planteó que el efecto expansivo podría asociarse a una reacción del tipo álcali-sílice (RAS) entre el cemento y los agregados, con el agua como agente catalizador.

Otra alternativa, la fluencia lenta del hormigón de apoyo bajo las palas fijas, fue descartada en principio, por no resultar compatible con una evolución cuasi-lineal tras 25 años de puesta en obra. Tampoco la intensa fisuración característica de esos procesos, acompañaba el cuadro de situación observado.

La hipótesis de expansión, en cambio, se fundó en el característico comportamiento lineal de una RAS, registrado en una zona débilmente solicitada. Resultaba además muy probable que involucrase sólo a la última etapa de colado, lo que resultaba compatible también con la inclinación registrada en el anillo inferior.

Es muy probable que la reacción pudiera haber estado presente en otros sectores de la obra. No obstante, la modestia de su entidad (en media 0,2 mm/año) habría impedido que sus efectos se hicieran notorios.

Con esta presunción fundada sobre el origen más probable del desorden observado, U.T.E orientó sus investigaciones posteriores.

## **6. LAS INVESTIGACIONES POSTERIORES.**

Los datos disponibles no permitían reconocer a la expansión del hormigón, y más aún a la RAS, como causa determinada del problema.

Fue necesario realizar investigaciones complementarias directamente sobre muestras del hormigón del cono. Para ello se extarjaron testigos representativos de las diferentes etapas de colado del cono y se realizaron dos grandes tipos de ensayos.(Fig. 3).

### **6.1 Ensayos mineralógicos.**

En 1990, se ejecutaron en Francia (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées), análisis mediante láminas delgadas, al microscopio óptico, al microscopio electrónico de barrido y microsonda. Con el primero se reconocieron los agregados reactivos y con el segundo se tuvo una visualización fina de las degradaciones y de los geles de expansión. Los resultados indicaron que las muestras de hormigón de de las diferentes etapas de colado, no eran reactivas, exceptuando la última, o sea la cuarta fase. Aquí se observaron signos claros de RAS, con o sin cristalización de etringita como gel expansivo. Los agregados utilizados tenían origen basáltico, por lo cual dado que la fracción arenosa estuvo constituida casi exclusivamente por sílice, bajo diversas formas, los álcalis corresponden esencialmente al cemento, a los aditivos y aeventualmente a los alcalinos liberados por los agregados basálticos. Resultó pues que los aditivos condujeron a aumentar el tenor en sodio equivalente, por un enriquecimiento en potasio, que parece tener la propiedad la propiedad de romper el equilibrio relativo del hormigón y precipitar la reacción.

### **6.2 Ensayos de expansión.**

Hacia 1998 y ya en plena búsqueda de la solución definitiva, se completó el conocimiento del fenómeno con ensayos físicos que permitieron evaluar la magnitud de las expansiones remanentes. La persistencia de la expansión resultaba entonces decisiva a la hora de definir el tipo de intervención a ejecutar sobre la obra, para resolver el problema en forma definitiva.

Sobre testigos extraídos de ubicaciones próximas a los de 1990, se realizaron en Argentina (Universidad Nacional de La Plata), determinaciones físicas, químicas y ensayos de expansión residual, en condiciones normalizadas y ambiente saturado de humedad durante un año, así como observaciones sobre lámina delgada por microscopía y difracción.

El hormigón de cuarta fase, de menor tamaño máximo de agregado grueso, tuvo además el mayor contenido de cemento. Luego, el tenor de álcalis es casi el doble del de las otras fases. Presentaba claras evidencias de RAS: clastos de agregado grueso con fuerte argilización y mortero degradado; el contacto entre los clastos del basalto y el basalto está enmascarado por el gel expansivo, producto de la reacción.

Las muestras tuvieron una expansión remanente importante, del orden del 0,08 % al cabo de un año, todo lo que corroboró la vigencia del fenómeno, luego de casi 40 años de construida la obra. Si este resultado fuera extrapolado a los 4 metros de altura del hormigón, en la zona del cono afectada, estaría representando una expansión remanente del orden de 3 mm, adicionales a los 7,5 mm producidos desde 1960.

Las otras fases de hormigonado, mostraron un material compacto, con buen contacto entre agregados y mortero y de mayor tamaño máximo de agregado grueso. En ningún caso se determinó reactividad.

## **7. APROXIMACIONES TEORICAS.**

Con el fin de determinar con mayor precisión los efectos previsibles de la expansión, tanto de la ya registrada como de la remanente, se reprodujo mediante un modelo de elementos finitos, el comportamiento de las diferentes partes involucradas, esto es hormigones y piezas metálicas. Se

utilizó el esquema de incremento térmico uniforme en toda la masa afectada por la RAS, como es corriente en estudios de este tipo de fenómenos, aún cuando el mismo está lejos de poder ser considerado como de naturaleza homogénea. Se planteó un modelo espacial y luego otros bidimensionales con simetría axial y submodelos parciales para el anillo inferior y los demás revestimientos metálicos. Los resultados obtenidos se consideraron así como orientativos de los estados tensionales existente y previsible.

#### 7.1. Modelación de las tensiones actuales.

En cuanto al hormigón, si bien el modelo arrojó resultados tensionales algo elevados, los mismos no resultaron compatibles con el buen estado general observado. El hecho fue atribuido a que el proceso de expansión se produce en forma gradual y en su transcurso las tensiones se relajan por el simultáneo desarrollo de la fluencia lenta del mismo hormigón, lo que habría atenuado los valores que aporta el modelo exclusivamente a partir de la expansión.

En relación con las piezas metálicas, el estado de deformaciones impuesto generó tensiones que muy probablemente se hayan redistribuido por haberse alcanzado la plastificación en algunos puntos de los materiales más dúctiles, como el anillo inferior, construido en fundición. De todas maneras, para una deformación histórica media de 7,5 mm, las tensiones equivalentes máximas de Von Mises en el anillo inferior alcanzaron localmente casi a 700 MPa, valor muy superior a la tensión de falla de la pieza (210 MPa), en la unión de ésta con la brida de apoyo del anillo de garganta. (Fig. 6). Se debió considerar entonces, seriamente, que el anillo inferior había llegado a la falla y que por ende, no resultaba razonable continuar solicitándolo. Lógicamente por la velocidad media que caracteriza al fenómeno es muy probable que la tensión límite de falla haya sido superada localmente varios años antes, presumiblemente en la década de 1970.

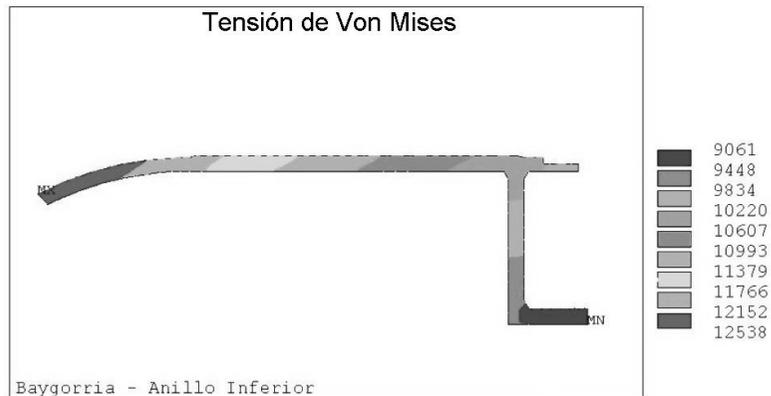


Figura 6.

A efectos de verificar este resultado teórico, se descubrió la zona de unión entre el anillo inferior y el anillo de garganta. Se pudo comprobar en las zonas relevadas que efectivamente existe la fractura prevista por el modelo.

Así, los hechos condujeron a establecer que el anillo inferior, en cualquier alternativa de solución, debía ser cambiado.

En cuanto a los otros revestimientos, la situación más comprometida alcanzaba al anillo de garganta, donde las tensiones para el desplazamiento histórico de 7,5 mm se situaron por encima del valor de fluencia de estos aceros (240 MPa), aún cuando es previsible una reducción tensional por efectos de plastificación, por el decalaje observado en la brida de unión con el anillo inferior y por la incidencia que sin duda ha de haber tenido la fracturación allí comprobada. (Fig.7)

## 7.2 Modelación de la expansión remanente.

Para estimar el efecto de la expansión remanente, se realizó un análisis no lineal por elementos finitos sobre la piezas comprometidas. Así fue posible comprobar que para el anillo inferior, la expansión necesaria para producir la plastificación general del anillo es del mismo orden que la ocurrida hasta el presente (aproximadamente 7,5 mm). De modo que un nuevo anillo construido con materiales más dúctiles, podrá seguramente absorber estas deformaciones y solicitaciones derivadas, así como tolerar reparaciones en caso de una eventual anomalía.

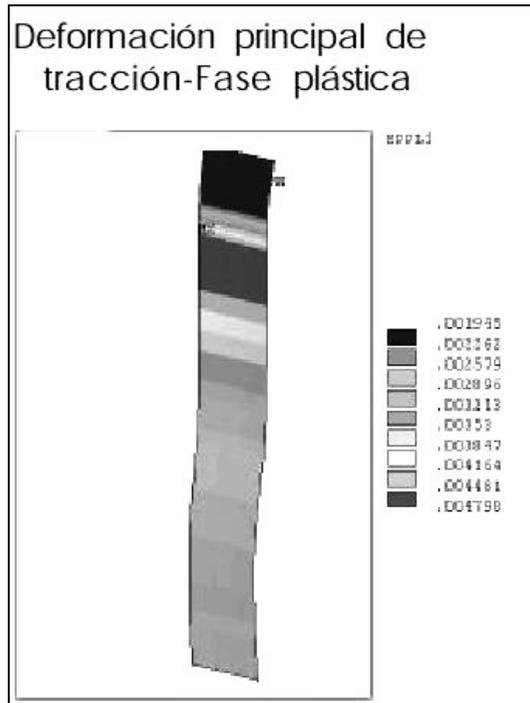


Figura 7.

En cuanto al anillo de garganta, las tensiones máximas con la expansión actual ya estaban en el inicio de la fluencia y con la remanente (fijada en un límite superior de 7,5 mm) gran parte del revestimiento estará plastificado : no obstante, si bien las deformaciones máximas máximas totales son importantes (del orden del 0,6%), las mismas están muy por debajo de las deformaciones plásticas de rotura de estos aceros, que son del orden del 20%.(Fig.7).

En consecuencia, la futura expansión del hormigón del cono, no compromete la integridad del actual revestimiento del anillo de garganta y por ende, no será necesario su reemplazo en la intervención prevista.

## **8. REMEDIOS Y SOLUCION ADOPTADA.**

### **8.1 Mantenimiento e intervenciones parciales.**

A partir de la detección del atascamiento de las palas móviles en 1966, el mantenimiento en servicio de las turbinas de Baygorria, fue garantizado por los controles periódicos de las luces mecánicas entre anillos y palas móviles y la consecuente restitución de las mismas mediante el ya indicado procedimiento de esmerilado o rebaje de espesores en el anillo superior.

Los trabajos se realizaron sin mayores dificultades desde entonces, aún cuando implicaron el desarrollo de afinadas tareas de precisión y en buena medida, artesanales.

No se produjeron en tanto, nuevos inconvenientes ni incidentes.

El procedimiento, no obstante, presentaba limitaciones derivadas de la incertidumbre sobre el eventual debilitamiento de la pieza cuyo espesor se continuaba rebajando.

Hacia 1990, y en virtud de la prosecución del fenómeno, se complementó el ajuste, con la suplementación en altura de la caja portacojinetes de las palas móviles. Esta intervención permitió obtener una holgura adicional de 0,2 mm, que complementada con eventuales esmerilados posteriores, habilitó un margen de entre 10 a 12 años para continuar con la investigación del proceso y decidir acerca de la solución definitiva.

## 8.2 Las alternativas planteadas.

Desde que se comprobó en 1990 la vigencia de un proceso de expansión por efecto de una RAS en el hormigón de cuarta etapa del cono, se observó que la remoción completa de este hormigón, constituía la alternativa que resolvía el problema, actuando sobre el origen comprobado de la anomalía.

Si la RAS involucraba a toda esta fase y las demás no eran reactivas, la demolición de este hormigón y su sustitución por otro no reactivo (o bien la modificación del diseño dejando parte de ese volumen hueco, como en otras turbinas de este tipo) conformaba una alternativa segura. No obstante, tal intervención implicaba el desmontaje completo de las unidades por períodos prolongados, y un lucro cesante muy importante, que superaba ampliamente el costo de obra directo.

Por otra parte, las evidencias recogidas, tanto por la instrumentación instalada como por las observaciones in situ y los ensayos de laboratorio, mostraban que este hormigón, pese a estar afectado por la RAS, no presentaba signos de deterioro, y su buen estado general se condecía en mucho con valores tensionales no exigentes. Por ello y como alternativa a la remoción completa se plantearon y analizaron dos variantes.

La primera refería al eventual tratamiento del hormigón de cuarta fase con inyecciones químicas, en base a sales de litio, a presiones elevadas, como forma de mitigar la expansión o amortiguar sus efectos. Como es conocido, el tratamiento con productos químicos de este tipo es usado en la mezcla del hormigón fresco y ha probado en esos casos disminuir las eventuales expansiones de los hormigones resultantes. Se cuenta además con experiencias en hormigones ya endurecidos, en particular sobre pavimentos, donde la impregnación con soluciones en base a nitrato de litio, ha reducido las expansiones por RAS en el orden de hasta un 30 o 40%. En cambio, no se conoce experiencia probada en hormigones endurecidos en masa, como es el caso de Baygorria.

Una solución de esas características debía ser previamente ensayada en laboratorio, para comprobar si la inyección a presión, adecuadamente distribuida podía ser capaz de penetrar en la masa afectada, difundirse y detener aunque fuera parcialmente la reacción. Los últimos avances en el tema mostraron que incluso, la técnica debía completarse necesariamente con la aplicación simultánea de un campo eléctrico, ya que la sola inyección a presión no parecía suficiente como para permitir la circulación y difusión del fluido en la masa del hormigón.

Esta alternativa resultó en principio atractiva por implicar un menor tiempo de ejecución de obra y por lo tanto de indisponibilidad de máquina. Además no requería de acciones sobre los componentes mecánicos de la turbina. En su contra se situaban la falta de certeza acerca de su efectividad, la carencia de experiencia probada en situaciones similares y en última instancia, la inseguridad sobre si realmente era posible esperar, en el mejor de los casos, algo más que una reducción de la expansión del orden del 30 al 40%, lo que en verdad, no parecía suficiente.

Por otro lado, se estudiaron y no resultaron exitosos los intentos por introducir juntas o cortes en el hormigón problema. Mediante el mismo modelo de elementos finitos que se mencionó al evaluar el estado tensional en el cono, se determinó que la incidencia de cortes a diferentes alturas no iba más allá de reducir en un 30% los desplazamientos verticales, debido al

comportamiento solidario entre las diferentes fases de hormigonado y entre éstas y el revestimiento metálico.

### 8.3 La solución adoptada.

Las alternativas planteadas no resolvían con certeza el problema de la expansión, a excepción de la solución de demolición completa del hormigón y consecuente desarme total de las turbinas. Pero de las conclusiones de los estudios, surgía claramente la necesidad de cambiar la pieza metálica de fundición que conforma el anillo inferior del distribuidor.

Asimismo los propios estudios comenzaron a mostrar que los restantes elementos no resultaban comprometidos, aun teniendo en cuenta un margen de expansión remanente significativo y seguramente mayor al que tendrá lugar en la práctica.

En consecuencia, la intervención proyectada pudo limitarse al reemplazo del anillo inferior, pieza que puede considerarse desde ya como fallada, por otro de geometría y ductilidad apropiadas. Asimismo alcanzaría con remover el hormigón del cono situado inmediatamente por debajo del anillo inferior y no todo el hormigón afectado por la RAS. El proyecto (Figs. 8 y 9) contempla sustituir el anillo inferior por otro de acero inoxidable, sin retirar las palas móviles, lo que evita levantar la tapa de turbina y por ende el desarme completo de la turbina.

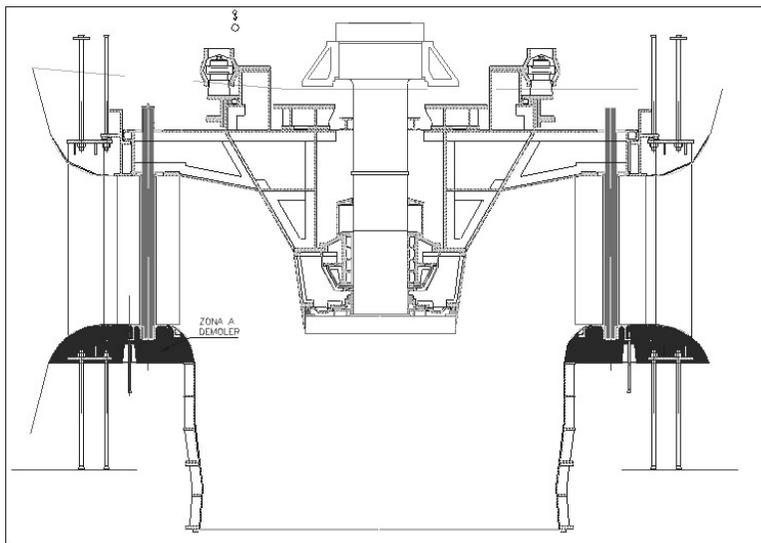


Figura 8.

La intervención implica así además tiempos de ejecución y costos por lucro cesante significativamente menores.

El hormigón de cuarta etapa no retirado seguirá reaccionando pero sus efectos no pondrán en riesgo la integridad de los demás revestimientos. Tampoco habrá compromiso para el hormigón reactivo que no se remueve. Así, la solución tendrá un período de vigencia prolongado, mayor aún si se tiene en cuenta una previsible y ya insinuada reducción del ritmo histórico de acortamiento de luces.

A su vez el nuevo anillo se situará en una posición tal que las luces totales iniciales entre anillos y palas móviles sean tales que permitirán absorber la expansión sin necesidad de nuevos esmerilados. Y para cuando éstos resulten eventualmente inevitables, se ha previsto un mecanismo de placas de desgaste desmontables, en el diseño del nuevo anillo inferior, que

