

Nº Comité de Estudio: 11

Nº IV SESEP: CE.11.01e

RUPTURA DEL VÁSTAGO DEL CILINDRO HIDRAULICO DE LA COMPUERTA Nº 01 DEL VERTEDERO DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE ITAIPU

Ing. RAUL A. GARCETE MANTILLA
ITAIPU BINACIONAL

Ing. CARLOS ALBERTO LIMA DA SILVA
ITAIPU BINACIONAL

Ing. RAUL A. GARCETE MANTILLA
Central Hidroeléctrica de Itaipu Binacional
Edif. De Producción, 3º Piso – SMIM.DT
Teléfono: (061) 599-2698 – email: rag@itaipu.gov.py

RESUMEN

La ruptura del vástago del Servomotor Derecho de la Compuerta Nº 1 del Vertedero de la Central Hidroeléctrica de Itaipu, ocurrido el 14/07/94, ocasionando la pérdida del cilindro y el impedimento de la operación de la compuerta se constituyó en un hecho de suma importancia por los siguientes motivos: magnitud del siniestro ocurrido; seguridad de la presa; pérdida de la confiabilidad operativa del vertedero; inexistencia de hechos idénticos en compuertas similares y cantidad significativa de servomotores, con proyectos idénticos en operación en varias centrales.

Tratado inicialmente como un caso aislado, en la medida en que los estudios se desarrollaron, se vió claramente que los demás 27 cilindros instalados estaban expuestos a los mismos riesgos, exigiendo así acciones muy urgentes.

Tratando de determinar la causa de la fractura y definir las acciones a ser tomadas, para el restablecimiento de la confiabilidad operativa del vertedero y consecuentemente la seguridad de la presa, fue elaborado un programa para el estudio del problema.

El examen detallado de las informaciones obtenidas, resultaron en acciones de modificación del proyecto original y de mantenimiento.

Por lo tanto, además de la necesidad de verificación de la carga y del estado de tensiones que este tipo de vástago está sujeto, las inspecciones periódicas y limpieza del vástago y de las rótulas son extremadamente importantes para la confiabilidad operacional de las compuertas y consecuentemente del Vertedero.

Palabras claves: Compuerta de Segmento, Concentración de Tensiones, Confiabilidad Operativa, Corrosión Intercristalina, Geometría del Vástago, Vástago, Inspección Periódica, Réplica Metalográfica, Seguridad de la Represa, Servomotor, Vertedero.

1. INTRODUCCION

En la inspección periódica del mantenimiento de la Compuerta, ocurrió la ruptura del vástago del Servomotor Derecho, durante el cierre en comando local. Esta operación estaba siendo realizada sin flujo de agua (con el stop-log colocado). La compuerta había sido abierta totalmente (16,25 m) y luego después del inicio de cierre, ocurrió la ruptura del vástago en la posición de 16 m de abertura.

Este trabajo tiene por finalidad presentar los estudios realizados, las conclusiones y las providencias que resultaron del análisis de la ruptura del vástago del Servomotor Derecho de la Compuerta N1 del Vertedero de ITAIPU.

2. CONSECUENCIA INMEDIATA

Durante la caída del Servomotor Derecho, debido a la ruptura del vástago, el cilindro colidió con el brazo de la Compuerta, permaneciendo suspendido por el muñón (**Ver Figura 1**).

La compuerta quedó abierta en la posición 16 m, sustentada solamente por el Servomotor Izquierdo, siendo impedida para operación después del cierre de la misma.

Como se verificó, según la memoria de cálculo, que solamente un servomotor sería capaz de realizar el cierre de la compuerta, y después de la verificación por la Ingeniería que los daños serían mínimos y fácilmente reparables, en caso de falla del servomotor restante, se procedió a la operación de cierre con los siguientes cuidados especiales:

- colocación de durmientes de madera a lo largo de la solera, para minimizar el daño en caso de rompimiento del vástago del servomotor;
- el cierre fue realizado manualmente, con velocidad reducida (50 mm / min);
- los stop-logs de la compuerta a ser cerrada, así como el de la compuerta adyacente deberían estar colocados en el momento del cierre.



Fig. 1 - Situación de la Compuerta y Servomotor después del accidente

3. ACCIONES PRELIMINARES

3.1. Desmontaje e Inspecciones

Fue realizado el desmontaje de los Servomotores Derecho (con vástago roto) y también del Izquierdo para inspección y verificación del estado en que se encontraban.

El Servomotor Izquierdo estaba en buen estado de conservación, pero en el cilindro del Servomotor Derecho fue constatado, después de varias mediciones, ovalización de hasta 4 mm, en consecuencia de la colisión.

Fue verificada también, una fuerte corrosión a lo largo de la superficie de la sección rota del vástago, cercano al borde, como muestra la **Figura 2**.

Es sabido que el acero inoxidable se oxida bajo determinadas condiciones como, por ejemplo, se existiese contacto con determinados cuerpos oxidables, o si permanece en servicio sin limpieza.



Fig. 2 - Sección del Vástago Roto

Después de las inspecciones y consultas a algunos fabricantes de mecanismos hidráulicos, concluyese que la pérdida del cilindro y del vástago del Servomotor Derecho era total y sin posibilidad de recuperación.

3.2. Análisis de la Fractura

Para determinación de la causa de la fractura, la ITAIPU solicitó el reanálisis de la memoria de cálculo original del Servomotor a una de sus consultoras, también contrató a la Universidad Federal de Santa Catarina - Brasil (UFSC) para proceder a los estudios de la mecánica de la fractura y el análisis del comportamiento mecánico del vástago.

3.3. Resultados Preliminares

Los primeros resultados obtenidos de la Consultora Oficial de ITAIPU y de la UFSC no apuntaron para la misma dirección, de acuerdo a la **Tabla 1**, pues la Consultora indicó para un subdimensionamiento de la extremidad del vástago, mientras que la UFSC consideró la "corrosión intercrystalina" como causa de la falla, sugiriendo el mecanizado en esta región de 2 mm en el radio, para eliminación de esta corrosión en los demás vástagos, ya que los vástagos estaban bien dimensionados.

Análisis de Tensión		Proyecto Original	Consultora	UFSC 1° Parecer
Tracción		121	121,1	123,6
Flexión	Rozamiento en las Rótulas	No Observado	124,3 (Rozamiento $f=0,15$)	31,18 (Rozamiento $f=0,036$)
	Peso Propio	No Observado	No Observado	No Observado
Concentración De Tensiones	Factor de Forma	No Observado	KT= 2,156 KF= 2,131	No Observado
	Estado de la Superficie	No Considerado	Inspeccionar los Vástagos	Inspeccionar los Vástagos
Tensión en el Diámetro 250 mm		121	245,4	154,8
Tensión Total en la Transición de Diámetros		No Observado	526	No Observado

Valores en MPa

Tabla 1 – Comparación de las Revisiones de la Memoria de Cálculo del Servomotor

4. ACCIONES DEFINITIVAS

Delante de la incompatibilidad de los pareceres mostrados en el ítem anterior, la ITAIPU elaboró un "Programa" con las siguientes características y finalidades:

- Obtener un parecer seguro;
- Verificar si la falla fue un caso aislado;
- Obtener, a lo largo del desarrollo de tal programa, la garantía de la "Confiablez Operacional del Vertedero", a través del desempeño de los demás 27 servomotores con sus respectivos vástagos;

El "Programa" se fundamentó en los siguientes puntos:

- . Cálculo Analítico
- . Experiencia del Mantenimiento y del Desempeño del Servomotor
- . Ensayos del Prototipo
- . Estudios en la UFSC.

4.1 . Cálculo Analítico

Después de haber realizado una revisión del cálculo original de la sección crítica del vástago, donde ocurrió la fractura, llevándose en consideración las tensiones de flexión, a consecuencia del rozamiento en los cojinetes (rótula) y el peso propio del Servomotor, así como el aumento de las tensiones de tracción y flexión consecuentes de los factores de concentración de tensiones, no contemplados originalmente por el fabricante, se verificó dos situaciones distintas:

- Que a lo largo del Ø 190 mm (extremidad del vástago) la tensión máxima de trabajo quedó en torno de 220 MPa, superando ampliamente la tensión admisible originalmente adoptada (138 MPa);
- Que en las transiciones de diámetro, existentes en las extremidades del trecho de Ø190 mm (región de la fractura), llevándose en consideración los factores de concentración de tensiones, la tensión máxima de trabajo quedó en torno de 566 MPa, sobrepasando la tensión mínima de fluencia del material (550 MPa), determinada a partir de bibliografía.

Estos resultados apuntaron para un estudio mas aprofundado de las tensiones en estas regiones, a través de métodos de cálculos mas sofisticados, como análisis estructural por el Método de Elementos Finitos.

4.2. Experiencia del Mantenimiento y del Desempeño del Servomotor

A esta altura se podría concluir que la extremidad del vástago quedó subdimensionada, dentro de los criterios de seguridad de proyecto determinados por ITAIPU. Este hecho hizo con que las atenciones se focalicen hacia la seguridad de los 27 vástagos de los demás Servomotores, y consecuentemente el desempeño operacional del Vertedero. Así mismo, no se podía dejar de considerar los siguientes hechos:

- Las compuertas estaban en operación por un período de 12 años;
- La ruptura del vástago tubo su origen en una fisura transversal, cuyo desarrollo estaba asociado a un proceso de corrosión, no habiendo sido causada exclusivamente por sobrecarga;
- En el instante de la ruptura del vástago del Servomotor Derecho, el Servomotor Izquierdo fue sometido a un esfuerzo transitorio de maniobra, aproximadamente 3 veces mayor que el valor del régimen experimentado inmediatamente antes, conforme ilustrado en la **Figura 3**;
- El Servomotor Izquierdo fue capaz de completar el descenso de la Compuerta, como era de esperar, pues esta era una condición exigida por ITAIPU en el proyecto;
- Las inspecciones visual y de líquido penetrante en la extremidad del vástago del Servomotor Izquierdo, no revelaron ningún daño aparente.

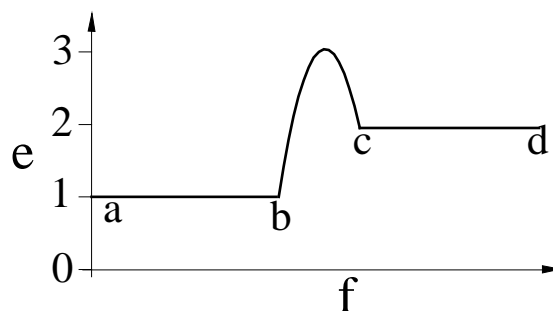


Fig. 3 - Esfuerzo de Transición de Maniobra del Servomotor Izquierdo

- (e) Esfuerzo de maniobra (f) Tiempo
(a – b) Antes de la ruptura
(b – c) Transitorio en consecuencia de la ruptura
(c – d) Después de la ruptura

Por los hechos antes expuestos, aliados a los estudios e inspecciones realizados abajo, se procuró obtener la constatación de una de las siguientes hipótesis:

- . La ruptura de vástago se constituyó de un caso aislado;
- . Los 27 vástagos de los demás servomotores estaban sujetos al mismo mecanismo y riesgo de falla.

4.2.1. Estudios Realizados:

- Las tensiones de los demás 27 vástagos, suministrados por los certificados de calificación en la fabricación, quedaron en média 924 MPa para la ruptura, 815 MPa para la fluencia y 18,6% para el alargamiento. Valores estos iguales a los del vástago roto;
- Por ocasión de la consulta sobre el desempeño de este equipo a las concesionárias brasileñas, cuyas centrales (en número de ocho) poseen servomotores con proyecto idéntico, la UHE de Tucuruí informó el hecho el 28/06/95 de una falla semejante en una de sus compuertas, cuyo proyecto, dimensiones y capacidad son casi idénticas a los de ITAIPU. (**Ver Tabla 2**)

CENTRAL	AÑO DE OPER.	CANT.	VANO (m)	ALTURA (m)	CAPAC. DE LOS CILINDROS (kN)
Foz do Chopim	1969	1	12,5	6,0	2 X 180
Coaracy Nunes	1974	10	12,5	14,1	2 x 530
Capivara	1976	8	15,0	15,6	2 x 1030
São Simão	1977	9	15,0	18,78	2 x 1315
Paulo Afonso IV	1979	8	11,5	19,65	No Disponible
Itumbiara	1979	6	15,0	18,06	2 x 1350
Foz do Areia	1980	4	14,5	20,25	2 x 1720

Tucuruí	1982	23	20,0	21,22	2 x 3030
Itaipu	1982	14	20,0	21,34	2 x 3430

Tabla 2
Centrales con el Mismo Proyecto

- Para verificación de la existencia de corrosión en los demás 27 vástagos en operación en ITAIPU, fue realizada por la UFSC, un análisis metalográfico via técnica de réplica. Después de la realización del ensayo en tres vástagos en aparente buen estado, los resultados mostraron que todos ellos estaban sujetos al mismo tipo de corrosión que produjo la falla en el Servomotor Derecho.

4.2.2. Inspecciones Realizadas:

- En la inspección de los 27 vástagos de los demás servomotores, diversas anomalías fueron detectadas destacándose:

- . Fisuras en algunos vástagos con hasta 3 mm de profundidad, en la región de Ø190 mm, reveladas a través de líquido penetrante;
- . "Pittings" de corrosión en la región de Ø190 mm, reveladas a través de examen visual y/o ensayo de líquido penetrante;
- . Acabado superficial con rugosidad por encima de lo recomendable para las condiciones de trabajo.

Estas anomalías detectadas en los estudios e inspecciones realizadas, permitieron identificar el mismo mecanismo de falla que resultó en la fractura del vástago del Servomotor de la Compuerta N01, lo que confirmó definitivamente la susceptibilidad a la falla de los demás 27 vástagos.

Por lo tanto, por ocasión de la inspección en la región crítica de los demás 27 vástagos, fueron realizados los siguientes servicios (Ver Figuras 4 y 5):

- . ensayo con líquido penetrante;
- . eliminación de las fisuras y "pittings" de corrosión;
- . pulido para mejoría de la rugosidad superficial;
- . protección de la región contra el ataque corrosivo.



Fig. 4 - Estado de Conservación de la Rótula

Estos procedimientos tuvieron como objetivo, aumentar la seguridad operacional del Vertedero hasta la eliminación total de las causas de la falla.

4.3 . Ensayos del Prototipo

De modo a conocer las cargas dinámicas actuantes en el vástago en las condiciones de operación, y consecuentemente las tensiones dinámicas, fueron realizadas mediciones, en una de las compuertas, de las tensiones reales de trabajo de tracción y flexión, en la región crítica, a través de extensómetros.

Los resultados obtenidos confirmaron la revisión del cálculo analítico, habiendo sido medida una tensión de tracción máxima de 208 MPa en la fibra inferior de la sección Ø190 mm, valor este muy próximo del valor teórico calculado de 220 MPa, dando validez así al modelo de cálculo adoptado. Ver **Tabla 3**.

Cabe acotar que estos valores medidos y calculados no contemplan los efectos de concentración de tensiones, presentes en la transición de la sección donde ocurrió la fractura.

Análisis de Tensión		Cálculos Itaipu	Ensayos Prototipo	UFSC 2º Parecer
Tracción		---	99	115,8
Flexión	Rozamiento en las Rótulas	(rozam. f=0,100)	69	112,4 (roz.. f=0,036)
	Peso Propio	40	40	Observado
Concentración De Tensiones	Factor de Forma	No Observado	No Observado	Kt=3,807 Kf=4,101
	Estado de la Superficie	No Observado	No Considerado	Inspeccionar los Vástagos
Tensión en el Diámetro 250 mm		220	208	228,2
Tensión Total en la Transición de Diámetros		No Observado	No Observado	901,8

Valores en MPa

Tabla 3 - Comparación entre la 2º Evaluación de las Tensiones

4.4. Estudios en la UFSC

4.4.1. Análisis metalográfico

Consistió básicamente de análisis via microscopio electrónico de barrido y metalografía via microscopio optico, habiendo presentado las siguientes constataciones:

- el material tiene características frágiles, pero dentro de lo esperado;

- la fractura se originó de una corrosión intercrystalina, originada por factores externos (medio ambiente);

Mediante las constataciones citadas, la UFSC hizo la siguiente recomendación:

“Remover toda corrosión, con un buen grado de acabado, desbastando 4 mm en el diámetro de 190 mm de la sección crítica del vástago”.

Es importante resaltar que luego de verificada las tensiones en los vástagos, a lo largo del diámetro de 190 mm, en 220 MPa, bien por debajo de la tensión de ruptura que es de 924

Mpa, una disminución de 4 mm en el diámetro sería perfectamente posible.

4.4.2. Análisis de tensiones vía elementos finitos

Visando determinar con mayor precisión las tensiones actuantes en la sección crítica del vástago, como consecuencia de cargas estáticas (determinadas a partir de las verificaciones realizadas en los ítems anteriores) y dinámicas (determinados a partir de espectros de vibración, medidos por ITAIPU, en el vástago del servomotor a través de acelerómetros), fueron realizados análisis utilizándose el método de elementos finitos.

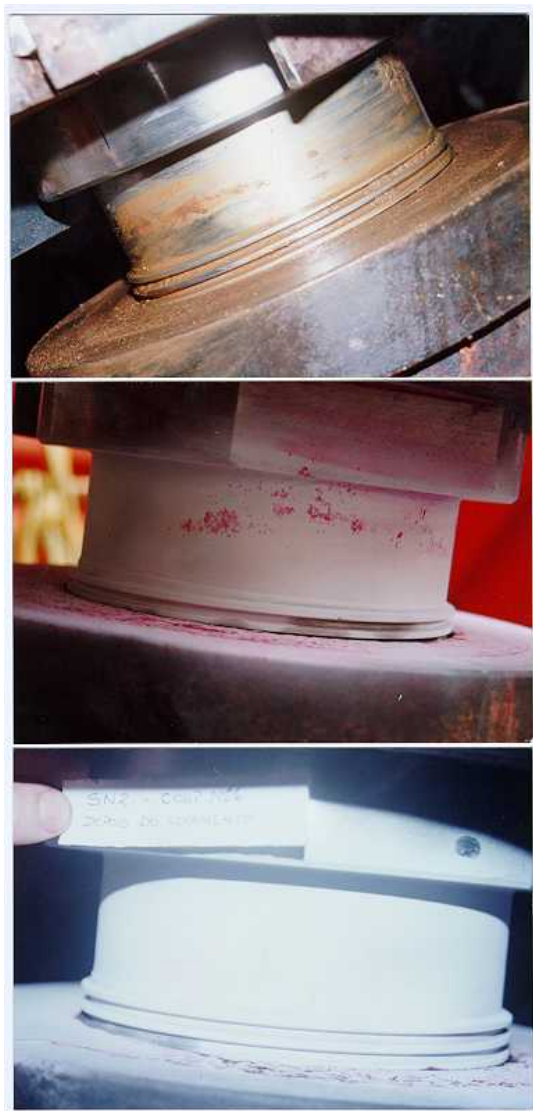


Fig. 5 - Inspección en las Extremidades Inferiores de los Vástagos

- a) Condición antes de la inspección
- b) Inspección con líquido penetrante
- c) Inspección con líquido penetrante después del pulido

Los resultados obtenidos, indicaron que las cargas dinámicas no producen tensiones significativas, ya que la mayor amplitud encontrada fue de 0.55 mm pico a pico en la frecuencia de 0.5 Hz en la abertura de la compuerta (para este vástago específico, solamente amplitudes por encima de 5.76 mm pico a pico en la frecuencia de 3.0 Hz, serían capaces de provocar tensiones alternadas importantes para nucleación de fisuras).

En contrapartida, las cargas estáticas condujeron a sollicitaciones severas en las regiones de transición de los diámetros (ver **Tabla 3**), pues son amplificadas por los factores de concentración de tensiones, alcanzando una tensión máxima de 901,8 MPa, sobrepasando la tensión de fluencia del material (815 MPa), casi alcanzando la tensión de ruptura (924 MPa), siendo así concluido por la UFSC:

"se torna difícil evitar la nucleación de fisuras de fatiga, principalmente si el medio ambiente es agresivo al material".

4.4.3. Evaluación de la vida de fatiga

La evaluación de la vida de fatiga fue realizada con el levantamiento de la curva de velocidad de propagación de una fisura con el tiempo (da / dN), bajo cargas dinámicas impuestas, a partir de cuerpos de prueba retirados del propio vástago roto. Se obtuvo como resultado:

- Las tensiones dinámicas provenientes de la compuerta en operación con flujo de agua, no son capaces de propagar una fisura de 1 mm, existente en la región del vástago mas desfavorable en términos de tensión, no comprometiendo así la integridad estructural del vástago.

- Las operaciones relevantes para el daño de fatiga son las de movimiento de la compuerta sin flujo de agua. Por lo tanto, considerándose una fisura de 1 mm existente en el vástago, en la región mas desfavorable en términos de tensión, la propagación se daría en 83,5 operaciones de cierre. El modelo adoptado partió de consideraciones bastante conservativas.

Por lo tanto, considerando que del rescate de datos históricos de operación de las compuertas, el número máximo de aberturas fue de 45 veces en el año 1992, se obtiene al menos dos años de operación del servomotor como previsión, hasta que haya una completa propagación de la fisura con movimentación exclusivamente a seco. En las condiciones normales de operación de las compuertas, con flujo de agua, se estima que la vida será significativamente mayor, visto que los niveles de vibración medidos en los ensayos realizados fueron apreciablemente inferiores.

5. PARECER FINAL

El exámen detallado de todos los datos, ensayos y análisis obtenidos, mostró una gran coherencia entre los resultados, de acuerdo al resumen abajo:

- Las características de la ruptura del vástago, mostraron una fractura frágil intercrystalina;
- El hecho de corrosión y/o fisuras en otros vástagos inspeccionados, caracterizaran el mismo mecanismo de falla en su etapa inicial de desenvolvimiento;
- El cálculo del fabricante, dejando de considerar cargas significativas, desembocó en una condición de trabajo del vástago bajo una elevada solicitación;
- Los nuevos cálculos realizados, que fueron confirmados por los ensayos de extensometría, condujeron a mayores valores de tensiones;
- Los factores de concentración de tensiones actuantes en la región de transición, revelaron los altos niveles de tensiones en que la región de la fractura estaba sujeta.

La conjunción de esos factores permitió un parecer seguro cuanto a la causa de la fractura del vástago de la Compuerta N01, pudiendo afirmar:

“ La ruptura del vástago ocurrió por la acción de una solicitación excesiva, asociada a un proceso corrosivo, facilitando así la nucleación y la propagación de fisuras hasta la ruptura frágil”.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

FINALES

Como resultado de los estudios arriba descriptos, la solución para la garantía de la confiabilidad operativa del Vertedero y consecuente seguridad de la presa, pasó por las siguientes acciones:

6.1. Para la sustitución del Servomotor averiado:

1º) Aprobación de un vástago con detalle constructivo diferente del proyecto original, constituido de una sección mayor y sin detalles concentradores de tensión. (Figura 6.)

2º) Aprobación del revestimiento cerámico para el vástago, a fin de obtenerse mayor vida con menor costo de mantenimiento.

Tanto el proyecto del detalle constructivo de la punta del vástago, como el vástago con su revestimiento cerámico con la marca CERAMAX, fueron desarrollados y suministrados por la Bardella / Hydraudyne.

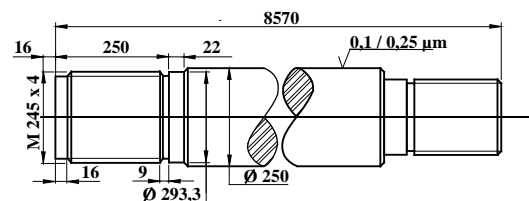


Fig. 6 - Detalle del Vástago nuevo que sustituye al vástago roto.

6.2. Para los demás 27 vástagos en operación:

1º) Aprobación de nueva forma geométrica de la región crítica, de acuerdo a la Figura 7, propuesta por la UFSC. Esto permitió una reducción de las tensiones actuantes, en la región de concentraciones de tensiones de 901,8 MPa para 547,5 MPa (Ver Tabla 4) , resultando en un factor de seguridad de 1,68, reaprovechándose así los vástagos con significativa reducción del costo (US\$ 900.000.00).

2º) Eliminación de la corrosión intercrystalina existente en los demás 27 vástagos, a través del mecanizado de 4 mm en el diámetro de 190 mm, con un acabado superficial de Ra = 1,6 µm.

Para realización de las dos acciones arriba citadas, fue adoptado un programa de recuperación de todos los demás 27 servomotores, constando de los siguientes principales itens:

- Desmontaje de los servomotores compuerta por compuerta;
- Ensayos de líquido penetrante y ultrasonido en todo el vástago;
- Modificación geométrica de la punta del vástago, a través del mecanizado;
- Mejoría del acabado superficial para Ra = 1,6 µm;
- Cambio de todos los retenes de los servomotores.

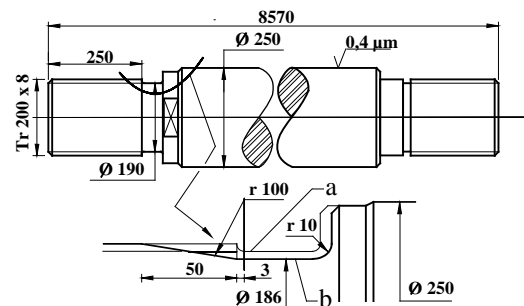


Fig. 7 - Modificación del Perfil Original de los Vástagos Existentes a)- Perfil Original b)- Perfil Modificado

3º) Eliminación del ataque corrosivo sobre los vástagos, a través de inspección y limpieza periódica y de la aplicación, en la región crítica, de un protector anticorrosivo (Metal Protector – Molykote).

Análisis de Tensión		Consultora	UFSC 2º Parecer	UFSC Parecer Final
Tracción		121,1	115,8	115,8
Flexión	Rozamiento en las Rótulas	124,3 (Rozamiento f=0,15)	112,4 (Rozamiento f=0,036)	112,4 (Rozamiento f=0,036)
	Peso Propio	No Observado	Observado	Observado



Concentración De Tensiones	Factor de Forma	Kt= 2,156 Kf= 2,131	Kt=3,807 Kf=4,101	Kt=2,207 Kf=2,596
	Estado de la Superficie	Inspeccionar Los vástagos	Inspeccionar los vástagos	Inspeccionar los vástagos
Tensión en el Diámetro 250 mm		245,4	228,2	228,2
Tensión Total en la Transición de Diámetros		526	901,8	547,5

Valores en MPa

Tabla 4 - Comparación entre los Resultados Finales de Evaluación de las Tensiones

4º) Mudanza en los procedimientos de la Planilla de Inspección y Control de los Servomotores de las Compuertas del Vertedero, que anteriormente no contemplaban principalmente cuidados especiales con la limpieza y el estado de conservación del vástago y de las rótulas inferiores y superiores. Las inspecciones están siendo realizadas por periodicidad de acuerdo a la descripción abajo, por lo tanto independiente del número de operaciones de la compuerta:

Inspección Anual:

- Lavar todo el vástago expuesto del servomotor con agua y jabón neutro;
- Inspeccionar el vástago del servomotor cuanto a ralladuras y estado general de conservación;
- Retirar el anillo bipartido e inspeccionar la extremidad del vástago del servomotor en cuanto al estado general de conservación. Realizar ensayo de líquido penetrante en esta región.
- Inspeccionar el anillo bipartido en cuanto al estado general de pintura. Granallar y pintar si necesario.

Inspección Cuadrienal:

- Cumplir la inspección anual y, adicionalmente: Desacoplar el vástago del servomotor del ojal de la compuerta y realizar:
 - Inspección de la rótula inferior en cuanto al desgaste y estado de las superficies de contacto (cromo / teflon). Cambiar se es necesario;
 - Limpiar la rótula con bencina rectificada;
 - Inspeccionar el eje del ojal de la compuerta con líquido penetrante;
 - Cambiar los retenes de cierre de la rótula inferior. El espacio vacío debe ser llenado con grasa nueva (Lumomoly TF-92 da LUMOBRÁS), sin presión. No debe ser aplicado grasa en las superficies de deslizamiento de la rótula, que debe trabajar a seco;
 - Acoplar nuevamente el vástago y mover la compuerta verificando la eculización de las presiones en las cámaras inferiores en los dos cilindros, así como las velocidades de cierre y amortiguamiento.

Inspección Octoanual:

- Cumplir la inspección cuadrienal y, adicionalmente: Desacoplar el servomotor de la compuerta, transportarlo para el área de montaje y desmontarlo, efectuando:
 - Inspección por líquido penetrante en todo el vástago;
 - Inspección de la rótula superior en cuanto al desgaste y estado de las superficies de contacto (cromo / teflon). Cambiar si es necesario;
 - Limpiar la rótula con bencina rectificada;
 - Montar el servomotor cambiando todos los retenes;
 - Inspeccionar el eje superior del muñón del servomotor con líquido penetrante;
 - Montar nuevamente el servomotor en la compuerta;
 - Cambiar los retenes de cierre de la rótula superior. El espacio vacío debe ser llenado con grasa nueva (Lumomoly TF-92 da LUMOBRÁS), sin presión. No debe ser aplicado grasa en las superficies de deslizamiento de la rótula, que debe trabajar a seco.

Para la movimentación de la compuerta sin flujo de agua:

Por el hecho de que los mayores niveles de vibración fueron encontrados en los movimientos de la compuerta sin flujo de agua, debido al rozamiento de las gomas laterales con la pista de acero, la movimentación, en esta condición, solo deberá ser realizada con la lubricación de las gomas laterales de retención, através de chorro de agua o aplicación de vaselina líquida.

7. RECOMENDACIÓN FINAL

Además de la necesidad de verificar la carga y el estado de tensión al cual el vástago está sujeto, las inspecciones periódicas y la limpieza del vástago y de las rótulas son extremadamente importantes para la confiabilidad operacional de las compuertas y consecuentemente del Vertedero.

Para minimizar costos de mantenimiento en nuevos proyectos, o en caso de cambio de los vástagos, recomendamos la utilización de vástagos con revestimiento cerámico y con el mínimo de reducción del diámetro.

8. REFERENCIAS

1. BADONI, ATB - Vertedouro Mecanismo Oleodinâmico - Memorial de Cálculo - Doc. 5066-10-75312-P, Jan/82.
2. IECO-ELC - Comportas de Segmento do Vertedouro - Ruptura da Haste do Cilindro Hidráulico da Comporta n1 - Relatório Preliminar de Avaliação - Doc. 5066-50-0100-P-R0, Nov/94.
3. PORTO, L.C.;UHE-Itaipu - Esforços Atuantes na Comporta do Vertedouro, maio/95.
4. UFSC; Análise da Fratura da Haste do Cilindro Hidráulico de Acionamento da Comporta do Vertedouro;



COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO

**IV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO -
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.**

30 de Noviembre al 02 de Diciembre de 2000
CIGRE - PARAGUAY

5. UFSC; Análise Metalográfica Via Réplicas - Relatório de Análise n1 35/95; setembro/95.
6. UFSC; Ruptura da Haste do Servomotor - Análise do Memorial de Cálculo e da Falha por Fadiga; dezembro/94.
7. UFSC; Ruptura da Haste do Servomotor - Análise do Memorial de Cálculo e da Falha por Fadiga (relatório revisado); maio/95.
8. UFSC; Análise no Extremo da Haste do Servomotor - Estudo de Concentração de Tensão; dez/95.
9. BRITO, Jr., G.C.; Ensaio Mecânico no Servo-motor 02 da Comporta n1 06 do Vertedouro; N1 S-50-0278-R0; ITAIPU - Divisão de Laboratório; jun/95.
10. BRITO, Jr., G.C. e outros; Ensaio Mecânico no Servo-motor 02 da Comporta n1 06 do Vertedouro; N1 S-50-0308-R0; ITAIPU - Divisão de Laboratório; nov/95.
11. BRITO, Jr., G.C. ; Ensaio Mecânico no Servo-motor 02 da Comporta n1 06 do Vertedouro (complementação); N1 S-50-0330-R0; ITAIPU - Divisão de Laboratório; fev/95.

9. ANEXOS

9.1 DATOS GENERALES DEL VERTEDERO DE ITAIPU

VERTEDERO (Ver Figura 1-2):

Cantidad de canaletas: 3

Tipo: convencional, con lanzamiento de aguas en trampolín tipo concha

Canaleta derecha: 4 compuertas (470,00 m x 95,00 m)

Canaleta central: 4 compuertas (450,00 m x 95,00 m)

Canaleta izquierda: 6 compuertas (430,00 m x 145,00 m)

Caudal medio: 8500 m³ / s

Caudal máximo excepcional: 62230 m³ / s

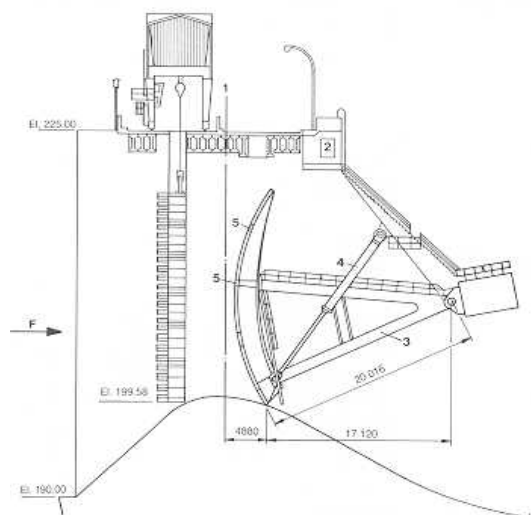


Fig. 1 – Compuerta del Vertedero – Vista Lateral

1- Cresta Central del Vertedero

2- Sala de Control

3- Brazos de la Compuerta

4- Mecanismo Oleodinámico

5- Patines del Freno

COMPUERTA (Ver Figura 3):

Tipo: segmento

Cantidad: 14

Altura: 21,34 m

Vano libre: 20 m

Radio externo del paramento: 20016 m

Abertura máxima en la vertical: 16,34 m

Peso total: 3185 N

Velocidad de abertura: 200 mm / min.

Velocidad de cierre: 200 mm / min

SERVOMOTOR (Ver Figura 4):

Tipo: simple efecto

Cantidad por compuerta: 2

Cantidad total: 28

Capacidad de levantamiento: 3,43 MN

Curso del vástago: 7105 mm

Diámetro del vástago: 250 mm

Diámetro interno del cilindro: 670 mm

Diámetro externo del cilindro: 743 mm

Distancia eje a eje cerrado: 10090 mm

Distancia eje a eje abierto: 17265 mm

Presión de operación: 11,31 MPa

Peso total sin aceite: 121 kN

Fabricante: BADONI ATB



Fig. 2 - Vista General del Vertedero



Fig. 3 – Compuerta

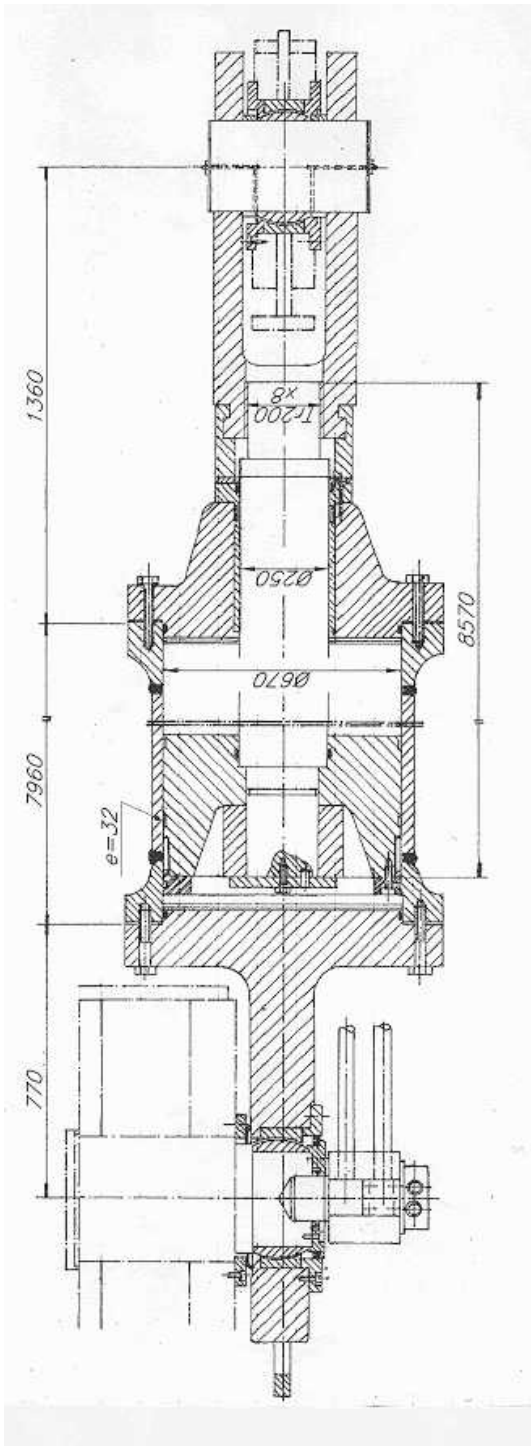


Fig. 4 - Servomotor –Conjunto