Análisis de Causas de las Fisuras en el Rodete de la Turbina de la U06 de la Central Hidroeléctrica ITAIPU

João M. Marra, Aldo M. Ramírez

Itaipu Binacional

Brasil / Paraguay

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es mostrar el análisis realizado en las muestras obtenidas oriundas de las fisuras en el álabe N°11 y el anillo de desgaste rotativo inferior del rodete de la U06 de la Central Hidroeléctrica de Itaipu, objetivando la determinación de las causas y el cual fue realizado en conjunto con la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) - Brasil. En este trabajo se pretende mostrar los principales pasos de este proceso, envolviendo el procedimiento de colecta de las muestras, definición de los cortes en las muestras y de los ensayos de laboratorio realizados y sus constataciones.

De forma a consubstanciar el análisis en cuestión fueron realizadas simulaciones numéricas en elementos finitos para verificar la participación en el estado de tensión mecánico del rodete de diversos esfuerzos y diferentes situaciones, tales como, contracción del anillo de desgaste, fuerza centrífuga, peso y presión hidráulica y efectos de la fisura y de la fractura en el estado de tensión general del rodete. Confrontación con los memoriales de cálculo originales del rodete y de los anillos de desgaste y estimativa del desempeño a la fatiga.

Así siendo, con base en las evidencias experimentales de las muestras, análisis de tensión e histórico de fabricación se hace una discusión de las posibilidades de daños de origen mecánica y metalúrgica, basada en referencias bibliográficas relativos al análisis de fractura, soldadura y tratamiento térmico para emitir un parecer sobre la causa probable de la fisura en el álabe 11 y de la fractura en el anillo de desgaste rotativo inferior de la turbina.

Para finalizar, en este trabajo se analiza el impacto del siniestro de la U06 en la confiabilidad operativa de las turbinas de ITAIPU con relación a la posibilidad de repetición de falla similar, así como, las medidas preventivas a ser adoptadas por el Mantenimiento.

PALABRAS CLAVES

turbina Francis, fisuras, soldadura, anillo de desgaste superior, mantenimiento.

1. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

El 23/09/2010, en la parada de mantenimiento cuadrienal de la U06 iniciada el 22/09/2010, durante la inspección de la turbina, fueron encontradas, respectivamente, dos fisuras en el rodete de la turbina, una en el álabe No 11 y otra en el anillo de desgaste rotativo inferior, en la región del vano entre los álabes No 10 y 11. En esta fecha, la unidad generadora se encontraba con 168.463 horas de operación, desde el inicio de su operación industrial el 31/07/1987, por tanto, después de 23 años de operación. La fisura en el álabe era pasante con longitud aproximada de 470mm en el lado de succión y aproximadamente 500mm en el lado de presión. La abertura máxima de la fisura no era mayor 1,0mm. Esta fisura se iniciaba en el borde de fuga, aproximadamente en la posición intermediaria de esta arista, avanzando en dirección al interior del álabe, conforme **Figuras 1 y 2**. La fisura en el anillo de desgaste rotativo inferior de la turbina también era pasante, en toda la sección transversal de este anillo, o sea, 380mm en la dirección axial y 35mm en la dirección radial. La abertura máxima de la fisura era menor que 1,0mm. En función del radio de concordancia entre el anillo y la cinta (corona), la longitud aparente de esta fisura en la dirección radial era de aproximadamente 50mm, finalizando en la interfaz con la corona. Las **Figuras 3 y 4** muestran, respectivamente, el local de la falla y vistas ampliadas de la misma.

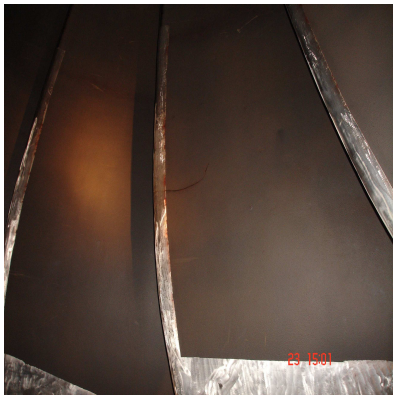

Fig. 1 - Fisura en álabe N°11 - Lado Succión

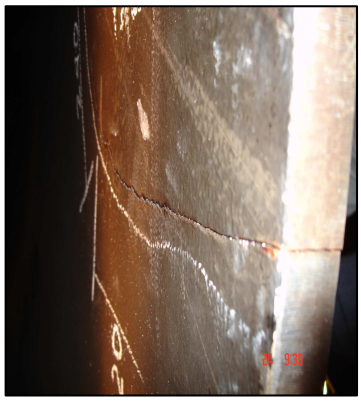

Fig. 2- Fisura en álabe N°11 - Lado Presión

Fig. 3 - Fisura anillo de desgaste rotativo inferior U06

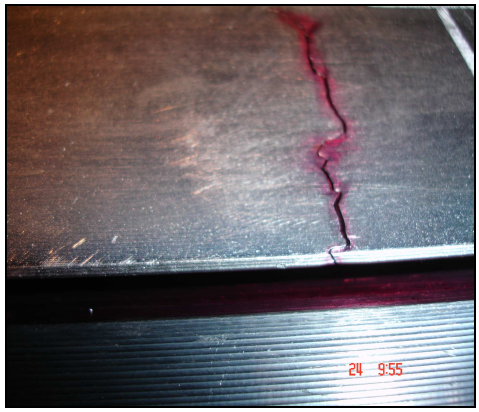

Fig. 4 - Detalle de la fisura del anillo de desgaste U06

2. ACCIONES INMEDIATAS

De forma a certificarse de la extensión, el local de las fisuras y tomar las primeras determinaciones, fueron realizadas las siguientes acciones:

a) Fisura en el álabe No 11: remoción de la pintura del álabe en las inmediaciones de la fisura para la realización de Ensayos No Destructivos (líquido penetrante y ultrasonido) para determinar la extensión de la fisura en ambos lados del álabe;

b) Fractura en el Anillo de Desgaste Rotativo Inferior :

- ataque con reactivo Nital al 3% en la región aparente de la fisura, revelando que la misma está localizada en una de las uniones soldadas de fabricación del anillo;
- inspección con fibroscopio a través del huelgo entre los anillos de desgaste estacionario y rotativo, revelando que la fisura se extiende a toda la altura del anillo;
- inspección por ultrasonido en la región de la fisura, revelando que la corona no fue afectada. La fisura termina en la interfaz anillo/corona.

c) Convocatoria al fabricante de la turbina para evaluación preliminar del problema.

3. ACCIONES POSTERIORES

a) Análisis de documentos relativos a la fabricación de la turbina U06 ("DataBooks"), con el objetivo de identificar eventuales anormalidades que pudiesen estar relacionadas al problema en cuestión;

b) Reunión con el fabricante del equipo (VOITH) para un análisis preliminar del problema,

c) Consulta al especialista internacional en turbinas hidráulicas, Ing. John Gummer;

d) Consulta al especialista en materiales de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Prof. Ing. Pedro Bernardini;

e) Análisis de las alternativas propuestas por el fabricante:

- reparo en el local sin desmontaje,
- reparo con desmontaje parcial de la Unidad Generadora y;
- reparo con desmontaje total de la Unidad Generadora.

e) Mediciones preliminares con presencia del supervisor del fabricante realizadas en la Unidad Generadora.

4. DELINEAMIENTOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Tanto el fabricante del equipo (VOITH) como el consultor de la Itaipu Binacional, John Gummer, afirmaron y se ratificaron en que la mejor alternativa de solución es el desmontaje total de la Unidad Generadora y la substitución del anillo de desgaste rotativo inferior del rodete de la turbina.

La ITAIPU luego de analizar las alternativas posibles y en base a las recomendaciones, optó por realizar la reparación de la Unidad Generadora realizando el desmontaje del rodete, la substitución del anillo de desgaste rotativo inferior y la reparación de la fisura del álabe N°11.

El diagnóstico de las causas de las fisuras, de esta forma, dependería del resultado del análisis de los documentos, simulaciones del campo de tensiones mecánicas del rodete y del análisis de fractura de las fisuras, el cual, por su vez, dependerá de la retirada de muestras de materiales del álabe y del anillo de desgaste fracturados, siendo que las muestras de este último, solo fueron retiradas al final del desmontaje de la unidad generadora.

5. ANÁLISIS DE LA FISURA EN EL ÁLABE N°11

A sugerencia del fabricante de la turbina y en concordancia con la UFSC e ITAIPU, fue decidió realizar la retirada de las muestras del álabe conforme indicado en la figura 5.

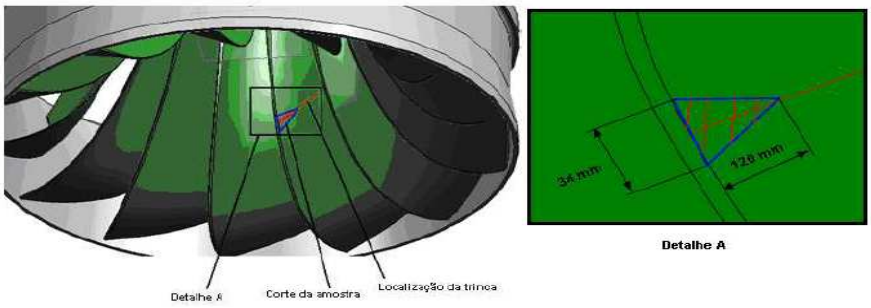

Fig. 5 - Detalle de la remoción de la muestra de la fisura del álabe N°11

5.1 ASPECTO MACROSCÓPICO DE LA MUESTRA

La figura 6 ilustra la topografía de la fisura en la parte inferior. La figura 7 ilustra los mismos aspectos en la parte superior (imagen especular de la parte inferior, conforme figura 6)

Fig. 6: Muestra PI (parte inferior, abajo de la fisura)

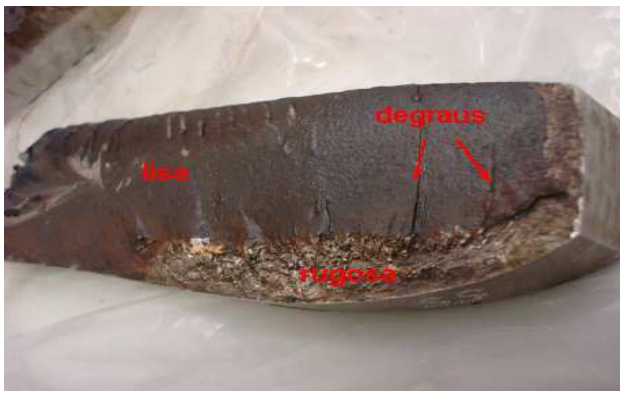

Fig. 7: Muestra PS (parte superior), arriba de la fisura

5.2 ANÁLISIS DEL ORIGEN DE LA FISURA EN EL ÁLABE N°11

5.2.1 Presencia de superficie escalonada en la región de acero al carbono

Sugiere que la fractura se propagó en la dirección del espesor del álabe, pudiendo ser en el sentido del lado succión para el lado presión o viceversa.

Por tanto, la fisura debería haber iniciado dentro de dos posibilidades:

I. Nucleación en la superficie externa del álabe

- **Nucleación en el lado presión (acero al carbono)**

En este caso, la presencia de los escalones (elipses rojas en la figura 7) sería el resultado de una situación de nucleación múltiple de fisuras.

La nucleación múltiple tiende a ocurrir en la presencia de concentradores de tensión agudos (radios de curvatura pequeños, como por ejemplo un rayón.

Este NO es el caso, puesto que no se constató ningún concentrador en la cara externa del lado de acero carbono, mismo bajo análisis metalográfica, lo que nos lleva a descalificar tal hipótesis.

- **Nucleación en lado succión (revestimiento de acero inoxidable)**

No se constató ningún defecto en esta región (mismo bajo análisis metalográfica), que pudiese justificar la nucleación de la fisura, descalificando esta hipótesis.

II. Nucleación en el interior del álabe.

Si hubo nucleacion en la parte interna del álabe, la fisura se habría propagado de dentro para fuera, en dirección del espesor, en sentidos opuestos (uno para el lado succión y otro para el lado presión)

Esta hipótesis de nucleación en el interior del álabe es consistente con tres evidencias naturales:

- Inexistencia de defectos (concentradores de tensión) en ambas superficies externas (succión y presión);
- Presencia de superficie escalonada indicando que la propagación fue en la dirección del espesor del álabe;
- Presencia de superficie escalonada interna, es decir sin estrías que surgen a la superficie. (figura 8)

5.2.2 Presencia de topografías con texturas distintas

Las figuras 7 y 8 indican la presencia de una región con textura lisa y otra con textura rugosa de la superficie de la fisura.

En general, una textura lisa indica que la propagación de la fisura fue por el mecanismo de fatiga y una textura rugosa indica que la propagación de la fisura del tipo estático (fractura macroscópicamente dúctil o fractura macroscópicamente frágil).

Considerando que la nucleación de la fisura podría haber ocurrido en el interior del álabe, la propagación del frente de la fisura en el sentido del lado presión habría resultado por fatiga, generando el aspecto liso. Este mecanismo no fue comprobado por microscopía electrónica debido a la oxidación y contaminación de la superficie. De la misma forma, en el caso en que la propagación en el sentido del lado presión fuese por mecanismo estático, se esperaría una topografía rugosa, especialmente tratándose de acero carbono fundido, donde los granos son mayores que aquellos resultantes de productos trabajados mecánicamnete.

Por su vez, la propagación de la fisura en el sentido del lado succión habría ocurrido por mecanismo estático (instantáneo, resultando en fractura dúctil o frágil), que sería consistente con la textura rugosa constatada en tal región. Contribuye para esta hipótesis el hecho de tratarse de revestimiento resultante de deposición por soldadura, cuya solidificación genera granos groseros tal como en el caso de materiales fundidos.

En síntesis, las dos texturas constatadas en la superficie de la fractura sugieren que la propagación de la fisura (nucleada en el interior del álabe) se dio en los dos sentidos opuestos y por mecanismos distintos.

5.3 ANÁLISIS METALOGRÁFICA Y MICRODUREZA DEL ÁLABE

Buscando indicios de que el local de la nucleación haya sido dentro del álabe, se realizó el corte ilustrado en el figura 8.

La figura 9 ilustra la superficie para el análisis metalográfico y de microdureza.

Note que el revestimiento es constituido por dos camadas, aparentemente distintas en composición química. Así mismo, cada una de las camadas es constituida de varios cordones de soldadura.

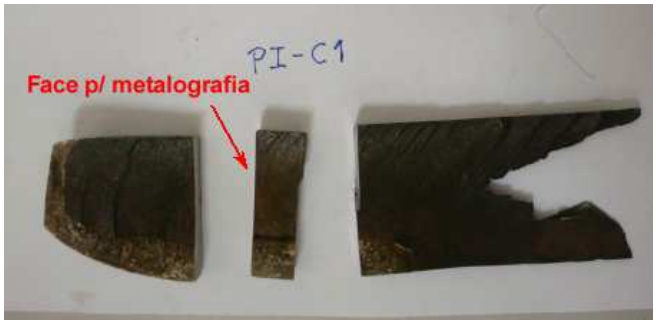

Fig. 8: Corte en la muestra PI-C1

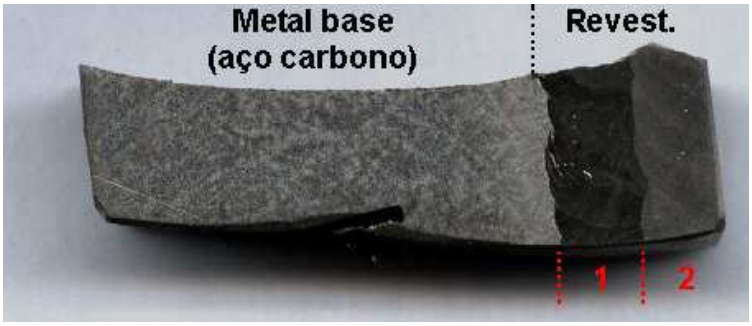

Fig. 9 Corte PI -C1

5.3.1 Microdureza

Los valores de microdureza en el metal base y en el revestimiento (ambas camadas) fueron consistentes con ambos materiales.

La diferencia de microdurezas medias en las camadas de material inoxidable no es siginificativa y no sugiere mayores detalles de investigación.

Los valores medios de microdureza encontrados están muy abajo de 350 HV, por lo que es muy improbable la nucleación de fisuras inducidas por hidrógeno en la zona afectada por el calor.

5.3.2 Microestructura

La microestructura del material del álabe es del tipo ferrítico perlítico, conforme esperado para este material (ASTM A643 Gr.A), basicamente un acero al carbono (C max 0.25%).

Fueron realizados ataques con reagentes adecuados (nital -acero al carbono / vilela-acero inoxidable), detectándose en el revestimiento la presencia de dos camadas de distintas tonalidades. Cada camada es constituida de varios pases de soldadura.

Conforme registros que obran en la División de Ingeniería de Mantenimiento fueron utilizados 4 tipos de electrodos en el reparo de cavitación y capeamiento inoxidable de los álabes del rodete de la turbina realizado en febrero de 1992, los cuales son: E309-15 / E309-16 / E309L-15 / E309Mo-15. El uso de diferentes tipos de electrodos explicaría la tonalidad diferente de las camadas.

5.4 ANÁLISIS MICROFRACTOGRÁFICO

A través del análisis por el microscopio electrónico de varredura (MEV) pudo constatarse la presencia generalizada de depósitos, tanto en el revestimiento como en el metal base en el plano de fractura, imposibilitando la detección de microtopografías típicas de fractura.

5.5 TENSIONES ACTUANTES Y POSIBILIDAD DE FATIGA

Según la norma ASTM A78 Gr.A (acero al carbono equivalente especificado para el álabe), la tensión mínima de límite de resistencia es de 485 MPa y la tensión mínima de límite de fluencia es de 275 MPa.

Por su vez, el revestimiento (E309), posee una tensión mínima de límite de resistencia de 550 MPa.

Los valores de microdureza encontrados en los materiales, del álabe y en el revestimiento, se muestran compatibles con los valores nominales de resistencia a la tracción.

Resulta, portanto, que no hay indicios de falta de resistencia estática en el revestimiento ni en el álabe en relación a valores mínimos de norma especificados para ambos materiales.

Por su vez, no se dispone del valor esperado para la resistencia a la fatiga.

Es posible estimar que la tensión límite de resistencia a la fatiga (patamar horizontal de la curva de Wohler) como siendo 0.4 del límite de resistencia a la tracción.

Resultaría que el acero al carbono del álabe tendría una tensión límite de resistencia a la fatiga de 0.4 x 485 Mpa, por tanto por arriba de 194 MPa. Se debe tener en cuenta que la tensión límite de fatiga se refiere a una amplitud de tensión, por tanto, para un ciclo entre 0MPa y 194 MPa.

Los valores teóricos de tensión obtenidos indican que en ninguna situación de operación se alcanzan valores estáticos de tensión de 194 MPa, mismo bajo la condición de rotación de disparo.

Por tanto, las resistencias encontradas en los materiales incidan que, para las cargas típicamente actuantes en el álabe, habría un régimen de trabajo de vida infinita bajo fatiga, donde nunca habría una nucleación de alguna fisura.

5.6 CONCLUSIÓN SOBRE LA CAUSA DE FRACTURA DEL ÁLABE

Los análisis evidenciaron que hay presencia de microfisuras, desgarre de interfaz y poros situados en el interior del álabe, próximos a la interfaz revestimiento / acero carbono y próximos al plano de la fisura original.

La nucleación de la fisura principal habría ocurrido en el interior del álabe, hipótesis consistente con el hecho de que no existe razón para que la fisura haya nucleado en las superficies externas, sea en el lado presión o succión, pues no había concentrador o defectos en tales locales.

Las microfisuras no serían el resultado del proceso de fatiga, pero causarían una propagación por fatiga a lo largo del tiempo de servicio.

Las microfisuras y poros serían resultantes del proceso de deposición y no serian detectadas por ensayos no destructivos.

Las microfisuras tenderían a crecer a lo largo del tiempo de servicio, generando diversas posibilidades de evolución.

Delante de las evidencias, la secuencia de eventos podría ser de la siguiente forma:

a) La deposición del revestimiento generó microfisuras en el interior del álabe

b) Tales microfisuras, cuando el álabe estaba en operación, evolucionaron por fatiga en dirección al lado presión (acero al carbono)

c) A partir de cierto tamaño, la microfisura, evolucionó en dirección al lado succión (revestimiento), generando la fisura detectada visualmente por la inspección durante el mantenimiento.

6. ANÁLISIS DE LA FRACTURA DEL ANILLO INFERIOR

6.1 ASPECTO MACROSCÓPICO DE LAS MUESTRAS

La figura 10 presenta la muestras extraída del anillo de desgaste rotativo inferior, ilustrando una de las fases de la fisura.

Fig. 10 - Fisura Anillo de Desgaste - lado derecho

En la vista frontal de la superficie fracturada, se constató una topografía irregular, lo que sugiriere que la misma haya sido del tipo fractura estática. Las regiones del borde de la fractura, destacados por los rectángulos rojos ilustrados en la figura 11, muestran labios de cizallamiento (shear lips), caracterizados por una pequeña inclinación de 45 grados.

Fig. 11- Anillo derecho - Presencia Shear lips

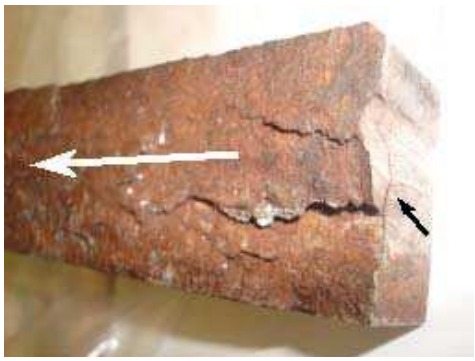

Fig. 12 - Extremidad inferior del anillo izquierdo

La figura 12 ilustra la extremidad inferior del anillo izquierdo, donde se constata superficie escalonada y una fisura inferior al plano de la fractura principal (indicados por la flecha negra). Estos aspectos sugieren que la región de inicio de la fisura se sitúa en esta extremidad inferior.

6.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO Y MICRODUREZA

6.2.1 Microestructura

En la región del metal base, se constató la presencia de microestructura martensítica con inclusiones alargadas, características del proceso de fabricación, conforme esperado para el anillo.

La región de la interfaz entre el anillo y la soldadura no presentó anormalidades o defectos.

En la región del cordón de soldadura del anillo se constató presencia de fisuras intergranulares en región próxima a la superficie de la fractura, situada en el centro del cordón.

6.2.2 Medidas de microdureza

Los valores de microdureza obtenidos indican que los valores obtenidos en el metal de soldadura son mayores que los del anillo.

6.3 ANÁLISIS MICROFRACTOGRÁFICO

El análisis en el microscopio electrónico de barrido (MEB) del plano metalográfico transversal a la fractura indicó las mismas fisuras intergranulares constatadas en el análisis metalográfico.

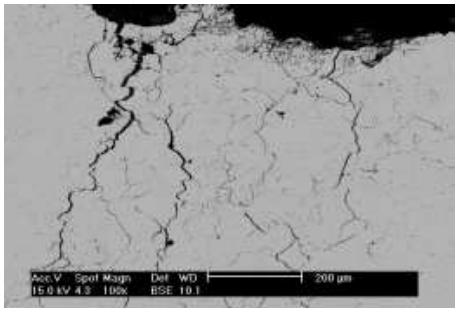

Fig. 13a - Fisuras intergranulares soldadura anillo

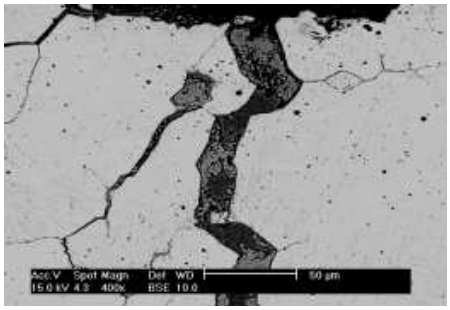

Fig. 13b - Detalle aumentado de fisura intergranular

Las figura 13a y 13b, ilustran fisuras intergranulares en la región de soldadura, como así también, la presencia de depósitos y/o productos de corrosión en el interior de las microfisuras.

6.5 CONCLUSIÓN SOBRE LA CAUSA DE LA FRACTURA DEL ANILLO

De lo expuesto, las evidencias sugieren que:

La fractura del anillo es del tipo macroscópicamente frágil (de naturaleza intergranular y con alveolos). El origen de la fractura sería en la extremidad inferior del anillo, causado por el coalescimiento de múltiples microfisuras originalmente presentes en el metal del cordón de soldadura.

Estas microfisuras serían oriundas de la deficiencia en el procedimiento de soldadura (generando sensitización del cordón) pudiendo ser agravadas por el montaje por interferencia (fisuras de relajación) o por la soldadura a tope.

La tensión para fracturar el cordón fue baja, muy inferior al límite de resistencia, pues se trata de una fractura macroscópicamente frágil que ya contenía microfisuras en el interior del metal de soldadura.

No fue posible formular una opinión fundamentada en las evidencias con relación al momento en que ocurrió la fractura, si en el momento de la soldadura de sello o si mediante algún aumento de solicitación durante el servicio.

No se evidenció cualquier relación de nexo entre la fractura del anillo y la fisura en el álabe, puesto que el anillo no tiene función estructural y cada uno de los componentes manifestó daño por distintos mecanismos.

BIBLIOGRAFIA

[1] P. Bernardini, *Análise das possíveis causas das trincas da roda da turbina da U06 da Usina Hidrelétrica da ITAIPU*. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2011.

[2] J.M Marra, M.A. Torales, G. Caballero, A. Ramírez, Fisuras en el rodete de la turbina de la Unidad Generadora U06. Hernandarias: Central Hidroeléctrica de Itaipu, 2010.

[3] J. Gummer, *Itaipu Binacional Service Purchase Order CT/5009/05 Unit 6 Runner Cracking Report 12/10/10- October 12, 2010*. Victoria, Australia, 2010.