

ta en los que no son de índole personal no compensaba el interés y la amortización de otra red, dada la extensión superficial de Valladolid. Esto no obstante, se ha establecido una conducción independiente

para aguas simplemente decantadas, de unos 14 kilómetros de recorrido, que sirve la zona en que mayor consumo hay de ella para riego de parques y arbolado.

Celso ESCOBEDO
ingeniero Industrial

Revista de revistas

MEMORIA SOBRE LA CORROSIÓN Y FATIGA MECÁNICA EN LAS TURBINAS "PELTON", por *Alejandro Perrig*, ingeniero.

Los esfuerzos a los cuales están sometidas las paletas de una turbina de vena libre se producen por las fuerzas centrífugas y por la acción del chorro. Las fuerzas centrífugas son proporcionales al cuadrado de la velo-

llado por la presión de éste, así como la tensión de flexión producida, crece, de un valor nulo (en el momento en que el chorro entre en la paleta), a un valor máximo (en el momento en que el chorro actúa plenamente sobre la paleta), para volver a bajar con la misma rapidez al valor nulo (en el momento que la paleta sale del chorro). Este fenómeno se repite durante el servicio con una frecuencia función directa de la velocidad y del número de chorros que actúan sobre la rueda. Estos esfuerzos periódicos, que se superponen a las tensiones centrífugas, originan flexiones elásticas y vibraciones correspondientes en las paletas. Se trata, pues, de un trabajo de percusión sobre la zona de las tensiones centrífugas, que se repite constante y muy rápidamente; así que, durante el servicio, las paletas nunca pueden descansar.

Juntamente con la corrosión que se observa al mis-

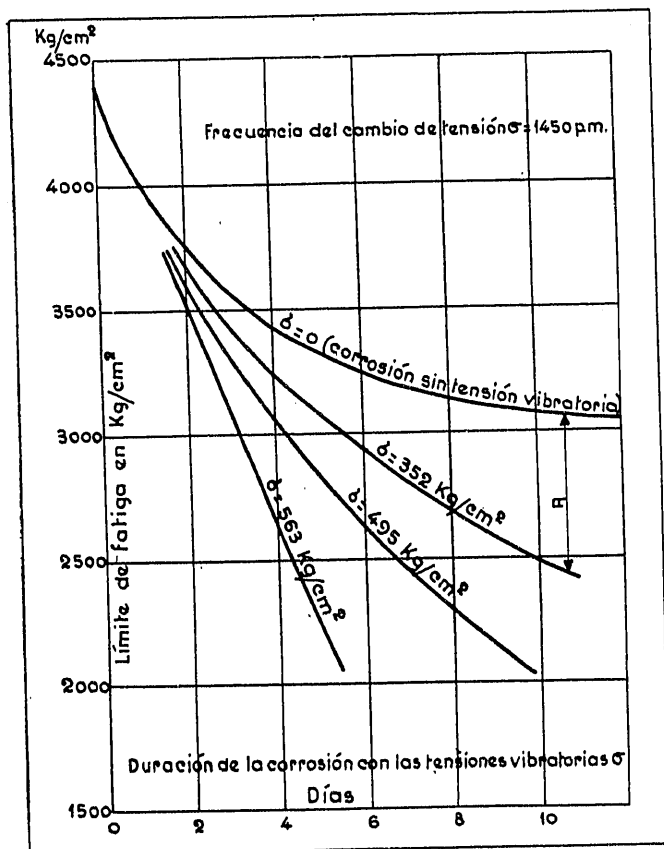


Fig. 1.

cidad periférica. Producen en el material de la paleta, esencialmente, tensiones de tracción radiales que, debido a la uniformidad de la velocidad durante el servicio normal de la turbina, se pueden considerar como constantes. Estas tensiones, por otra parte, actúan como cargas permanentes, no dando lugar a ninguna dificultad en lo que concierne a la construcción de la turbina, debido a su carácter bien definido y a su constancia. Aun en el caso excepcional en que se embale la turbina, puede garantizarse fácilmente un factor de seguridad suficientemente grande, debido a la construcción adecuada de las paletas y a su unión con la rueda.

Otras características esenciales presenta la acción del chorro, indicada más arriba como segunda causa de los esfuerzos sobre las paletas. En cada paso de la paleta bajo la línea de acción del chorro, el esfuerzo desarro-

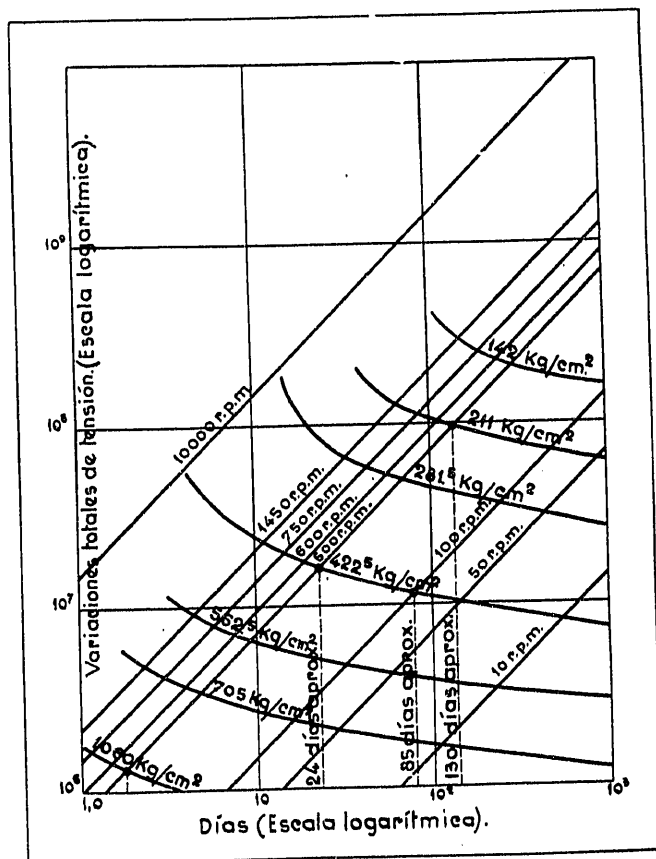


Fig. 2.

mo tiempo, y de la cual hablaré más adelante, estos esfuerzos periódicos son causa de una prematura fatiga y, por lo tanto, de peligros de deterioro del material (véase fig. 5 b), en el caso en que su importancia y su frecuencia sobrepasen ciertos valores límites.

Los experimentos, muy minuciosos y extensos, realizados por Haigh ("Experiments of the Fatigue of Brasses"), y, sobre todo, los llevados a cabo por D. J. Mc-

Adam ("Stress and Corrosion", "The influence of Stress Range and Cycle Frequency en Corrosion",

De experimentos análogos con otras frecuencias de variación de la carga, Mc. Adam estableció una fórmula que define dicha reducción a , y cuya expresión es

$$a = C \cdot \delta^n,$$

en donde C representa un factor que depende de la corrobilidad del material, de las propiedades corrosivas del medio ambiente y de la frecuencia de percusión del chorro (factor de corrosión y de frecuencia), δ el esfuerzo vibratorio (amplitud específica de la presión del chorro), y n un exponente cuyo valor oscila entre 2,6 y 5,7, según experimentos realizados por Mc. Adam para metales, y que depende del material y de las condiciones en que actúa la corrosión (aproximadamente 3 para aceros corrientes, duraluminio y metal Monel, con la corrosión por agua fresca).

Es aún más completo con relación a la fórmula arriba expresada, el diagrama según figura 2, también trazado por Mc. Adam. En este diagrama se indican todos los resultados de los experimentos para un valor constante de $a = 15$ por 100, bajo la influencia simultánea del esfuerzo vibratorio y de la co-

rosión, para el mismo material (acero al níquel) y las condiciones de corrosión ya indicadas (según Mc. Adam, "Stress and Corrosion"). En este diagrama se puede

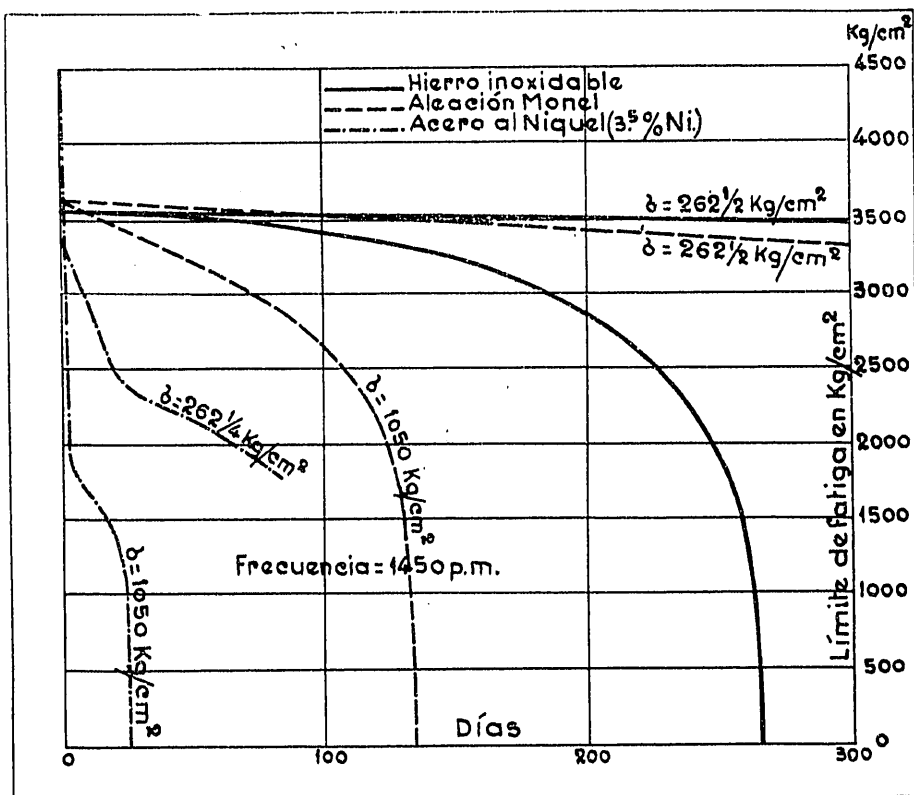


Fig. 3.

"Fatigue and Corrosion", "Fatigue of Metals", "Influence of Metals under Cyclic Stress", etc.), dan perfecta idea de las relaciones entre el esfuerzo periódico (que, en lo sucesivo, designaremos por "esfuerzo vibratorio"), el efecto simultáneo de corrosión y la fatiga del material. Estos experimentos, que se extienden a un gran número de metales férricos y no férricos, demuestran claramente que el límite de resistencia a la fatiga de cualquier material de construcción baja muchísimo, por el efecto simultáneo del esfuerzo vibratorio y de la corrosión; que cualquier esfuerzo vibratorio activa la corrosión simultánea, y que, viceversa, la influencia de una corrosión (por pequeña que sea) es causa de una rápida reducción del límite de fatiga si coincide con los esfuerzos vibratorios.

El resultado de los experimentos efectuados por Mc. Adam se puede apreciar en el diagrama (fig. 1), del que se deducen estas observaciones importantísimas. En este diagrama (según Mc. Adam, "Stress and Corrosion") se ha indicado la reducción del límite de fatiga en función del tiempo para el acero al níquel (3,7 por 100 de níquel). Las varillas de ensayo se sometieron en estos experimentos a una variación completa de la carga (caso de carga III), bañándolas al mismo tiempo, permanentemente, de agua fresca en el aire libre. La frecuencia de variación de la carga fué de 1450 por minuto. La curva superior marcada con $\delta = 0$ muestra la reducción del límite de fatiga bajo la influencia de la corrosión por agua fresca; las curvas restantes indican esta reducción bajo la influencia simultánea de la corrosión y del esfuerzo vibratorio, para una presión específica de amplitud $\delta = 352, 493$ y 563 kg/cm², respectivamente. La diferencia de ordenadas de la curva $\delta = 0$ y cualquiera de las otras curvas da el valor exacto de la reducción a del límite de fatiga por la influencia simultánea de la corrosión y del esfuerzo vibratorio con 1450 períodos de variación de carga por minuto, para el acero al níquel examinado.

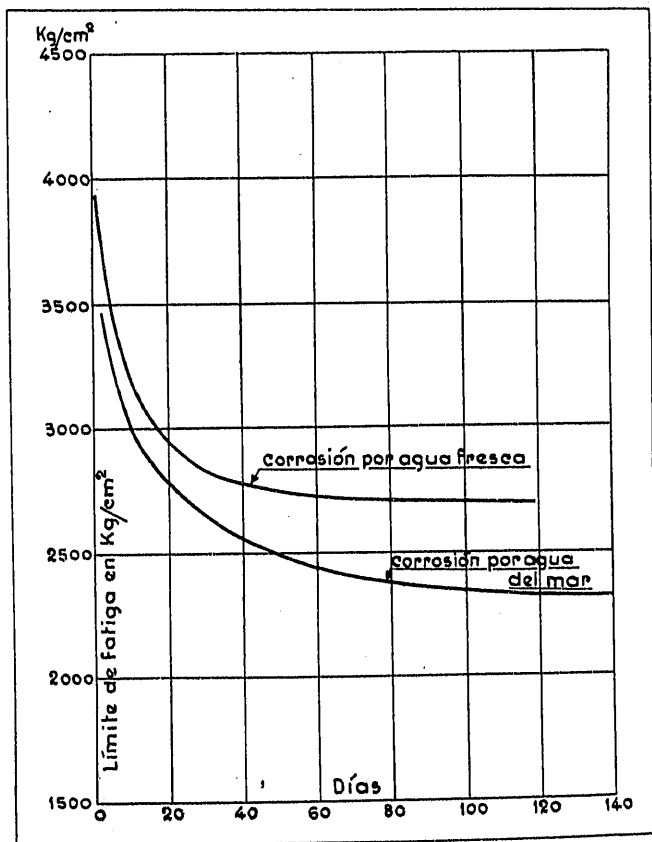


Fig. 4.

apreciar perfectamente la gran influencia de la frecuencia y la importancia aún mayor del valor de δ que en la fórmula que permite obtener a figura como factor exponencial. Si, por ejemplo, el material está expuesto, con una frecuencia de 500 períodos por minuto, a una presión o esfuerzo vibratorio de 211 kg/cm²,

Con varillas de ensayo en las que se hayan practicado hendiduras o que sean afiladas resultan, con relación a las varillas con superficie pulimentada, reducciones hasta de un 50 por 100, y aun mayores, de la resistencia a la vibración. Esta reducción depende del material, de la forma de las hendiduras, así como del torneado y pulimentado de éstas.

Según las mismas investigaciones, la resistencia a la vibración, y con ella la resistencia a la vibración corrosiva, se reduce mucho por sobrecargas pasajeras, mientras que, a la inversa, si se trabaja durante un largo período con una carga inferior a la normal, es decir, atendiendo al servicio temporalmente con una fracción de la carga normal (no considerando en este caso la influencia eventual de la reducción del rendimiento sobre el desgaste de las paletas), dicha resistencia aumenta sensiblemente. En las turbinas principalmente se observan sobrecargas específicas si la puesta en marcha no se efectúa de una manera conveniente; es decir, si la turbina recibe la acción plena del chorro antes de que haya adquirido la velocidad normal.

Naturalmente, el agua químicamente impura, según la impureza, reduce muchísimo la resistencia a la vibración corrosiva. El grado de esta reducción se puede apreciar perfectamente por los experimentos realizados por Mc. Adam y Ludwick. Las curvas de la figura 4, trazadas por Mc. Adam, permiten apreciar este fenómeno para acero al carbón de un 0,46 por 100,

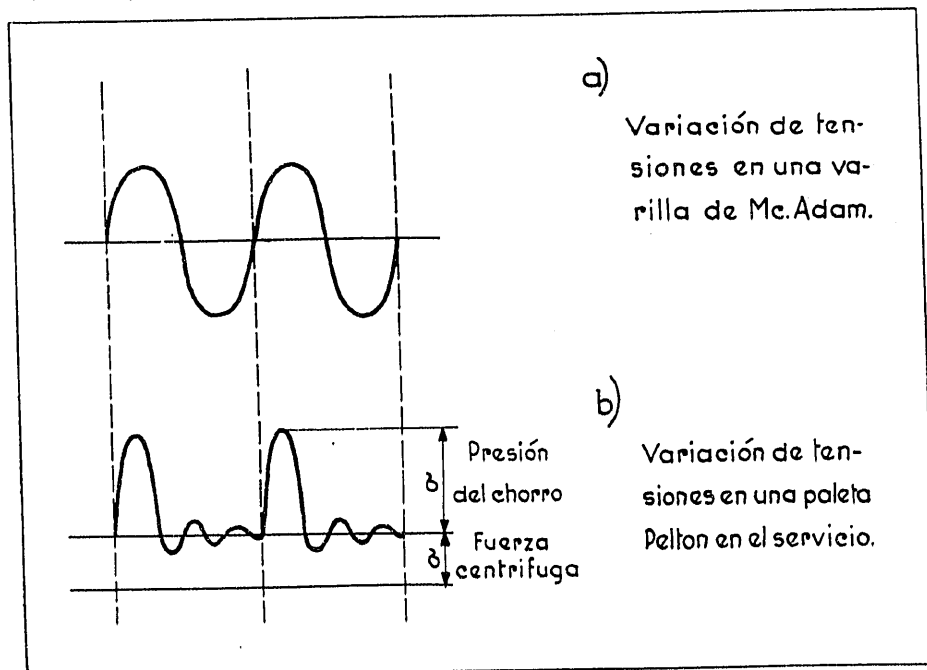


Fig. 5.

se observa, en el caso de corrosión simultánea, una reducción del límite de fatiga de 15 por 100 a los 130 días, aproximadamente, de servicio continuo. Si la presión aumenta hasta el doble, es decir, a 422 kg/cm², la misma reducción del límite de fatiga se produce a los 24 días; con 1 060 kg/cm² se produce dicha reducción a los dos días, aproximadamente. Por otra parte, si se reduce la frecuencia a 100 por minuto, resulta que con una presión o esfuerzo vibratorio de 422 kg/cm² dicha reducción se nota a los 85 días, aproximadamente, mientras que, suponiendo la misma presión o esfuerzo, se observa la misma reducción a los 24 días, en el caso en que la frecuencia suba a 500 percusiones por minuto.

La figura 3 muestra los diagramas de variación del límite de fatiga obtenidos en los experimentos realizados por Mc. Adam para tres metales (níquel, hierro inoxidable y aleación Monel) y para cada uno de los experimentos con dos esfuerzos o presiones vibratorios distintos, siendo las condiciones de la corrosión, en este caso, las mismas que las indicadas más arriba. Este diagrama comparativo muestra la enorme importancia que tiene la elección del material, conociendo las condiciones de carga y de corrosión.

Merece especial atención la observación, según los experimentos de Mc. Adam, de que el límite de fatiga bajo las acciones consideradas es (dentro de los diámetros de las varillas de ensayo de 1/2", 2" y 3"), independiente del diámetro de la varilla, o sea de la extensión de su superficie.

Es necesario hacer notar que, según los experimentos de Mc. Adam y de Ludwick ("Bruch-gefahr und Materialprüfung", "Ermüdung"), Memmler und Laute ("Dauerversuche an der Hochfrequenz, Zug-Bruck-Maschine") y otros, la resistencia a la vibración y con ella la resistencia a la vibración corrosiva, especialmente con materiales duros, depende muchísimo del estado de la superficie. La menor alteración de la superficie reduce mucho la resistencia continua, así como la resistencia a la corrosión.

mostrando la reducción del límite de fatiga con corrosión por agua fresca y por agua del mar.

Para estudiar más ampliamente la influencia tan grande de la calidad del material, del tratamiento del mismo en frío, de la protección de las superficies, etc., a la resis-

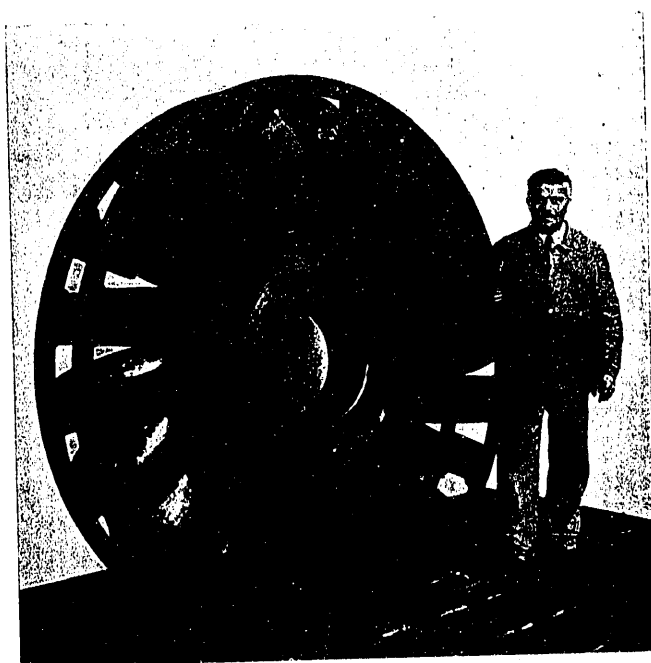


Fig. 6. Rueda Pelton, patente Bell, de 10 000 CV, 330 m de salto neto y 500 r. p. m.

tencia vibratoria de la corrosión, recomendamos al lector las amplias obras editadas por los profesores antes mencionados.

Lo que nos interesa principalmente es determinar hasta qué punto se pueden aplicar los resultados de los

el caso de carga II para las paletas "Pelton" (siendo, además, las relaciones de corrosión y de frecuencia iguales), sin variación alguna en el esfuerzo vibratorio del material. De esta forma se podrían aplicar los diagramas según figuras 1, 2, 3 y 4 al caso de carga II que resulta

con la paleta "Pelton", si, en lugar de las tensiones indicadas en estos diagramas, se considerarían esfuerzos mayores en un 20 por 100, aproximadamente. Sin embargo, como quiera que con la paleta "Pelton" no puede experimentarse con la finura de la superficie obtenible en las varillas de ensayo empleadas en los experimentos por Mc. Adam, será indudablemente más conveniente, teniendo en cuenta la sensibilidad del material a la menor alteración de la superficie (véase lo que sobre esto se dice anteriormente), no considerar dicho aumento de la tensión de un 20 por 100 en el cálculo de la paleta "Pelton". (Creemos que la relación entre los casos de carga II y III, determinada por el profesor Graf ("Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente") para el acero de 1,6:1,0, sería demasiado elevada en nuestro caso, por lo que basamos nuestras consideraciones según la proporción menos favorable de Bach.)

Las observaciones anteriores

experimentos efectuados sobre la rueda "Pelton". Los experimentos mencionados arriba, de Mc. Adam, se han efectuado a base del caso de carga III (véase fig. 5 a), mientras que la tensión producida directamente por la presión del chorro corresponde al caso II. Esta tensión varía entre un valor nulo y otro máximo. Pero es de suponer que bajo la influencia de las vibraciones de la paleta que acompañan a la percusión tiene lugar un cierto cambio de dirección de las tensiones; así que resulta probablemente para el sentido de la tensión el carácter indicado en la figura 5 b. A pesar de esto, será recomendable, a causa de la diferencia entre ambos casos de carga, admitir los resultados de los experimentos efectuados por Mc. Adam solamente con respecto a su calidad y no en cuanto a su número.

Si consideramos la relación encontrada por Bach entre la tensión admisible para el caso de carga II y la que puede admitirse para el caso III, de 1,2:1,0, aproximadamente, obtendríamos probablemente una medida que nos permitiría aplicar aproximadamente los resultados obtenidos por Mc. Adam en sus experimentos al cálculo de las paletas, etcétera. Hasta qué punto esta suposición corresponde a la realidad se puede apreciar únicamente por medio de experimentos comparativos. En caso afirmativo, pueden tomarse, para tensiones en el material, valores en un 20 por 100 mayores que las tensiones deducidas de los experimentos de Mc. Adam, supuesto

permiten al constructor, así como también al experto técnico, estudiar las características conocidas, que se pueden observar durante un cierto tiempo de servicio y con un control cuidadoso en las ruedas de turbinas, especialmente en las de las turbinas "Pelton".

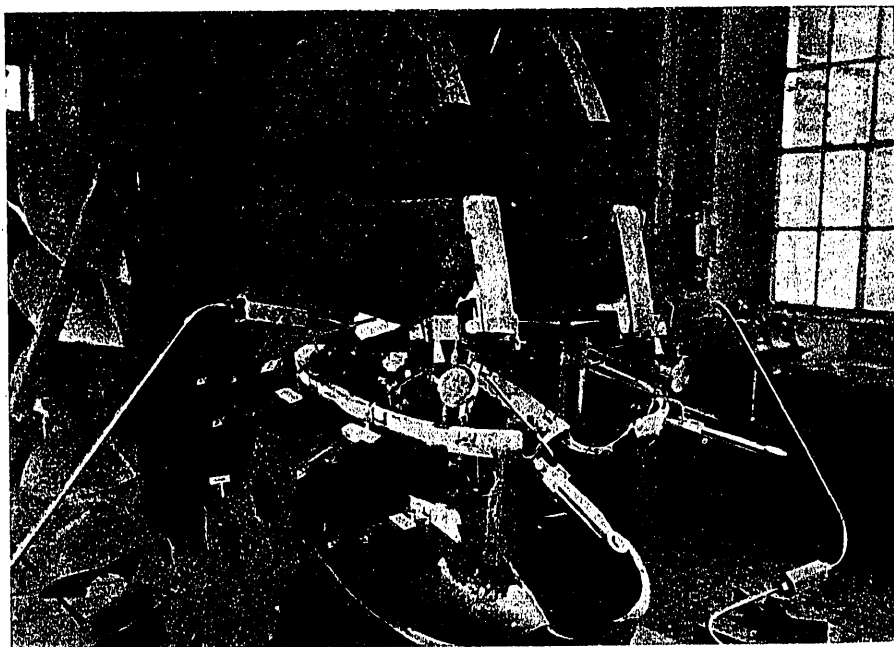


Fig. 8. Rueda Pelton sin anillos, con instalación de ensayos

Ellas demuestran concretamente, con respecto a las turbinas "Pelton", hasta qué grado las revoluciones y el número de toberas por rueda (frecuencia de variación de la carga), el material y la amplitud específica de la tensión influyen en la solidez y seguridad de construcción de las

Los ensayos se han efectuado con dos prensas hidráulicas Ansler, primeramente sin los anillos de apoyo (véanse figuras 7 y 8) y después con los anillos (véase figura 9); se extendieron a mediciones de la extensión en la arista, en el borde de la paleta y en los nervios de refuerzo, etc., y esto para las dos posiciones I y II, indicadas en la figura 10. Las mediciones se hicieron con tensómetros Huggenberger y relojes Stoppani.

Limitándose a las dos posiciones I y II de los pistones, en las cuales las presiones han actuado siempre en el punto medio de cada cuchara, sin corresponder, por lo tanto, a la realidad, cuyos resultados, sin embargo, bastan para determinar el funcionamiento de los anillos de apoyo según la patente Bell, pudiendo establecerse el siguiente resumen, según el profesor Dr. Rös:

"Por la fijación en los anillos se consigue:

1. Que las tensiones de tracción en la arista se reduzcan considerablemente, es decir, a un sexto ($1/6$), aproximadamente.

2. Que en el borde de la paleta se reducen también las tensiones a un $1/6$ y en el nervio de refuerzo a un $1/4$.

3. Las tensiones en el anillo mismo son muy moderadas.

4. La variación de la distancia entre las paletas baja a un décimo ($1/10$), aproximadamente. Se garantiza una distribución parcial sobre varias paletas."

En la figura 10 se encuentran los resultados detallados de los ensayos del profesor Dr. Rös.

De las observaciones anteriores sobre las relaciones que existen entre las tensiones vibratorias y la corrosión simultánea resultar inmediatamente las elevadas disminuciones de tensiones conseguidas por la nueva construcción. A continuación exponemos un ejemplo numérico comparativo para una turbina con paletas fabricadas con acero níquel, admitiendo una disminución de tensión de $1/4$ para la construcción con anillos:

CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA

Salto neto.....	500 m.
Potencia.....	25 000 HP.
Revoluciones.....	500 p. m.

Construcción	Número de toberas por rueda	Frecuencia del cambio de carga p. m.	Amplitud de la tensión específica vibratoria Kg/cm ²	Número de variaciones totales de la carga para $\Delta = 15\%$ (figura 2), aprox. Millones	Horas de servicio a 1/1 carga para $\Delta = 15\%$ (figura 2), aprox.
de la					
rueda					
Paletas con fijación unilateral, construcción normal.....	2	1 000	600	6,0	100
Paletas con fijación bilateral (patente Bell).	2	1 000	150	200,0	3 300

Del cuadro de valores precedente se deduce hasta qué grado disminuye la construcción Bell con paletas de empotramiento bilateral, el desgaste del material por la acción simultánea de la corrosión como consecuencia de las vibraciones y cómo aumenta la vida de las ruedas. Como toda superficie corroída, debido a su mayor aspereza, favorece considerablemente el desgaste, ofrece la construcción según patente Bell, por su propiedad de

disminuir la corrosión, una seguridad mayor contra los efectos de dicho desgaste.

Para completar estas observaciones debemos agregar que al proyectar, así como en el cálculo, en la determinación de las dimensiones y en la construcción de las cucharas de la paleta y en sus elementos de fijación, como pernos, cuñas, etc., tienen aplicación las consideraciones que han sido hechas anteriormente para las paletas mismas. Las mismas consideraciones pueden aplicarse en las ruedas de los distintos tipos de reacción (ruedas "Francis", de hélice, y "Kaplan").

CONCLUSIONES FINALES

Para obtener la máxima duración de las ruedas "Pelton" se deducen los siguientes principios, con respecto a su construcción y servicio, admitiendo desde luego unas condiciones hidráulicas de funcionamiento adecuadas (forma de las paletas, desarrollo del chorro, etc.):

MATERIAL

La elección del material depende esencialmente de la amplitud específica de la carga vibratoria y de la frecuencia de ésta (número de revoluciones y número de toberas por rueda). Cuanto mayores sean dicha amplitud y dicha frecuencia, tanto más resistente ha de ser el material utilizado, desde el punto de vista de la acción corrosiva. Además, un factor muy importante, que ha de tenerse en cuenta para la elección del material, es la calidad del agua.

TENSIONES ADMISIBLES

Las tensiones que se admiten en el cálculo de las distintas piezas, especialmente las tensiones de vibración, han de ser lo más reducidas posible. El mejor medio conocido hasta la fecha para la reducción de estas tensiones consiste en la sujeción bilateral de las ruedas.

MECANIZACIÓN

La rectificación debe ser hecha en forma que la dirección de las estrías sea perpendicular a la superficie normal de fractura. Como último toque de esta fase de la construcción de las paletas, debe seguir a la rectificación la pulimentación, de forma que desaparezca todo rastro de las estrías. Debe evitarse todo trabajo con el cincel, prescindiéndose en absoluto de dicha herramienta para las puntas y aristas.

SERVICIO

Todo servicio con un número de revoluciones inferior al normal trae como consecuencia la producción de cargas perjudiciales para el material, debiendo evitarse, por lo tanto, la reducción de velocidad a valores mayores que los que se admiten normalmente a distintas cargas. Deben evitarse a toda costa las puestas en marcha bruscas. Un servicio prolongado a carga parcial contribuye favorablemente a la duración de las ruedas "Pelton". En instalaciones de varios grupos debe preferirse, siempre que sea posible, el servicio simultáneo en varias turbinas con cargas parciales, en lugar de un número menor de unidades funcionando a plena carga.

Durante las interrupciones largas del servicio, las paletas de las ruedas deben ser cuidadosamente secadas y engrasadas con un buen aceite, con objeto de evitar la corrosión sin tensión, originada por el aire y por el agua.