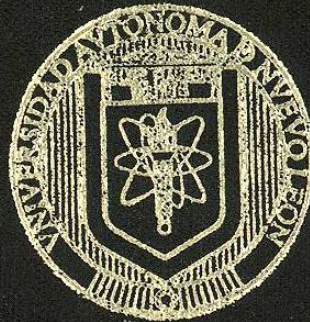


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
DIVISION DE POST-GRADO



ANALISIS Y PRUEBAS MECANICAS PARA LA
OBTENCION DE LA CALIDAD REQUERIDA
EN ALABES TURBINA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON LA ESPECIALIDAD EN MATERIALES

QUE PRESENTA
JORGE SALVADOR CISNEROS Y MARTINEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA JUNIO DE 1995

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS
100 EAST 57th STREET
NEW YORK, N.Y. 10022
1995

ISBN 0-226-08353-3
HARDCOVER \$35.00
PAPERBACK \$18.00
0-226-08353-3

PRINTED IN THE UNITED STATES OF AMERICA



1020112512

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
DIVISION DE POST-GRADO



ANALISIS Y PRUEBAS MECANICAS PARA LA
OBTENCION DE LA CALIDAD REQUERIDA
EN ALABES TURBINA

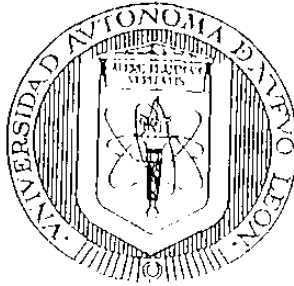
T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON LA ESPECIALIDAD EN MATERIALES

QUE PRESENTA
JORGE SALVADOR CISNEROS Y MARTINEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA JUNIO DE 1995

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE POST-GRADO



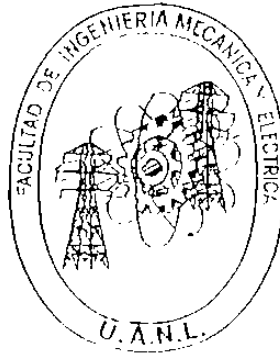
ANALISIS Y PRUEBAS MECANICAS PARA LA OBTENCION DE LA
CALIDAD REQUERIDA EN ALABES TURBINA.
TESIS
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON LA ESPECIALIDAD DE MATERIALES.

QUE PRESENTA

JORGE SALVADOR CISNEROS Y MARTINEZ.

SAN NICOLAS DE LOS GARZA JUNIO DE 1995.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON.
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE POST-GRADO



ANALISIS Y PRUEBAS MECANICAS PARA LA OBTENCION DE LA
CALIDAD REQUERIDA EN ALABES TURBINA.
TESIS
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MECANICA CON LA ESPECIALIDAD DE MATERIALES

QUE PRESENTA

JORGE SALVADOR CISNEROS Y MARTINEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA JUNIO DE 1995.


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del Comité de tesis recomendamos que la presente tesis realizada por Jorge Salvador Cisneros Y Martínez, sea aceptada como opción para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



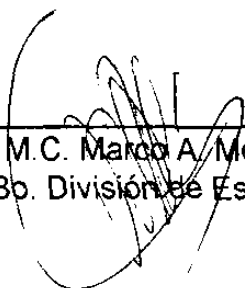
M.C. Luis Fernando González Gutiérrez.
Asesor



M.C. David A. Oliva Álvarez.
Coasesor

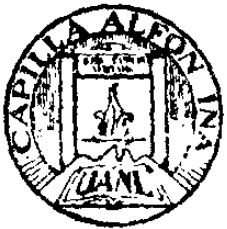


M.C. Roberto Mireles Palomares.
Coasesor



M.C. Marco A. Méndez Cavazos.
Vo.Bo. División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. a 21 de junio de 1995.



FONDO TESIS

A MI ESPOSA PADRES Y HERMANOS

A MIS MAESTROS Y AMIGOS

A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO, FIME Y LA UANL.

PROLOGO

Bajo la convicción de que la diversidad y pluralidad son elementos fundamentales para el enriquecimiento de diversas formas de acción, en la presente tesis se desea contribuir con sugerencias, consideraciones y lineamientos para la aceptación de álabes para turbinas.

Ahora bien resulta que los álabes son unas de las partes críticas de la turbina, que continuamente sufren los mayores deterioros, entre otras, como erosión y disminución en sus partes, y al verse degradados, no permiten su operación correcta y eficiente del álabe, sin embargo, mediante pruebas y análisis a los materiales de que está formado, se disminuye la frontera entre los álabes que cumplen su función, y los álabes que nó, además se obtiene una estimación de cuál sería el comportamiento esperado durante su vida útil.

INDICE

		PAGINA
SINTESIS		7
CAPITULOS		
I.	INTRODUCCION.	8
	1. Objetivo.	10
	2. Metodología.	12
	3. Descripción de Métodos Estadísticos.	17
	4. Revisión Bibliográfica.	18
II.	PROPUESTA RESPALDO	19
III.	EVALUACION Y RIESGO.	22
IV.	DISEÑO DEL ALABE TURBINA.	29
V.	ENTORNO DEL ALABE TURBINA.	34
VI.	PROGRAMA DE CALIDAD DEL ALABE TURBINA.	38
VII.	IMPACTO DEL PROGRAMA DE CALIDAD.	43
VIII.	APLICACION DE SU POTENCIAL EN MATERIA DE SUBSTITUCIONES.	48
IX.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	50
	BIBLIOGRAFIA.	55
	APENDICE	56
	1. Guía, Gráficas y Tablas .	
	2. Fotografías de Alabes.	
	3. Glosario de Términos.	

SINTESIS

Esta tesis está hecha no solamente con la idea de satisfacer la necesidad de lograr compras de álabes de calidad que se supone debe estar presente en ellos; sino también servir como referencia y apoyo para generar una mayor visión que contribuya a afrontar los retos futuros en la inspección de piezas, aplicando conceptos de calidad como:

Información y Análisis.

Planificación y Estrategias de Calidad.

Aseguramiento de Calidad.

Y en las que también para dicho fin se utilizan conocimientos de mecánica de materiales y se verifican, valores conocidos de tensión, compresión, flexión, torsión esfuerzos últimos, creep, fatiga, utilizando en algunos casos los Exámenes No Destructivos (END), sirviéndose de conocimientos anticipados v.gr.: temperatura, flujos de enfriamiento, aerodinámica, vibración, asociados con ciclos de arranque-carga y de la operación y comportamiento en el servicio contratado, anticipándose a problemas para actuar antes de que se vuelvan no controlables, creando conciencia de la conveniencia de realizar pruebas en su oportunidad, aunque inicialmente haya gastos que efectuar, para comprobar después de las pruebas que el producto es el adecuado. Estos gastos resultan mínimos comparados con los gastos a los que habría que hacer frente y el contratiempo que un problema ocasiona.

CAPITULO I.

INTRODUCCION

El objetivo es establecer consideraciones de pruebas a criterio del usuario, basadas en constancias de pruebas en materiales presentadas realizadas y tomadas por el proveedor original, tomándose como patrones, utilizando los parámetros convenientes y obteniendo valores comparativos, para verificar que lo que se ofrece es lo solicitado.

Como justificación a lo anterior, recordamos que como las partes son críticas se requiere la certeza de nula desviación de lo ofrecido contra lo especificado.

Dentro del límite de estudio, decimos que es un estudio cerrado, es decir su vigencia es a la fecha, pues cada vez se descubren nuevos materiales, aleaciones, resistentes a los esfuerzos y las altas temperaturas, que se requieren para las nuevas concepciones y por ende nuevos equipos y parámetros que verificar.

En lo relacionado al planteamiento decimos que en la necesidad de establecer procedimientos auxiliares de grado confiable, utilizados durante la adquisición del álabe turbina se presentan estos procedimientos como una opción para verificar el álabe turbina, por lo tanto, definimos estas consideraciones, lineamientos y seguimientos para la obtención del producto de calidad al precio adecuado y con la duración de servicio esperado.

La metodología a emplear es mediante el uso y la aplicación de Exámenes No Destructivos (END), análisis de esfuerzos de tensión, compresión, flexión, torsión, creep, fatiga y por supuesto también los análisis destructivos, metalografías de estructuras, cortes al álabe en estudio, para determinar profundidades de dureza y análisis químicos de la rebaba extraída del material de las piezas que se van a inspeccionar en ese preciso momento.

Dentro de la revisión bibliográfica, se basa en normas ASTM, ASME, AISI, catálogos, "Revistas Mechanical Engineering", memorias técnicas y conferencias.

I.

1. OBJETIVO.

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de métodos para obtener la calidad requerida en álabes turbina de acuerdo a lineamientos y necesidades del usuario que consisten en verificar mediante constancias y/o certificados debidamente avalados por autoridad reconocida o a través de protocolos de pruebas presentadas por el proveedor, cubriendo todos los requerimientos contractuales y complementados con "Hard Copies" (copias originales), de los resultados de pruebas de toda la manufactura de álabes ofrecidos

¿Qué parámetros se han de considerar?, temperaturas, presiones, formas y tamaños del álabe turbina, que no se salgan de especificación, dentro de este aspecto está considerado la selección adecuada del material apropiado avalado, para obtener desgaste, nulo o mínimo sin fracturas en el metal, sin picaduras, no partes faltantes, sin rozamiento al girar, sin sujeción inadecuada, etc.

Resumiendo lo anteriormente dicho, que puede ser el acercarse a metas: como ejemplo, 3 o 4 piezas defectuosas al millar, (hablando de producciones masivas).

Por lo que para lo anterior nos respaldamos con los criterios de aceptación o rechazo, e implícitamente estamos aplicando consideraciones de calidad, porque para conocer si el álabe de turbina cumple, se requiere conocimiento claro y completo de lo que el álabe es, y qué función desempeña, se requiere contar con el personal capacitado, equipo adecuado, tiempo

razonable para la realización del trabajo, así como el herramental apropiado para el trabajo que permita la adecuada realización de este, la aplicación y documentación del sistema, que establecen las normas y especificaciones aplicables a los álabes de la turbina en particular.

La gran variedad en álabes, formas, tamaños y dimensiones con las que se provee a las turbinas, compresores u otros equipos móviles, nos dan idea de la cantidad de posibles defectos que pueden existir y de su evaluación en un momento dado.

I.

2. METODOLOGIA.

Los métodos para obtener la calidad requerida en los álabes turbina son clasificados como:

- 1.- De Condición.
- 2.- De Operación.
- 3.- De Pruebas.

1.- De Condición. Se inicia con verificación de la documentación, pedido, número de álabes, localizaciones, dimensiones, tipos, dibujos, valores de pruebas realizadas etc., sí hay cambios de orden en el pedido original, como por ejemplo: cambios en el dimensionamiento, cambios al protocolo de comunicación, así como adiciones a los datos originales.

Se solicitan evidencias correspondientes de cartas aclaratorias, si dá lugar, minutas realizadas, acuerdos, u otros documentos objetivos con relación a las características específicas del álabe turbina, para tomarlas en cuenta durante su oportunidad.

Se establece con el proveedor que la estrategia de pruebas a realizar en la evaluación, será la "Estrategia de Caja Negra", lo que esta orientado a probar los álabes turbina completos persiguiendo el objetivo de verificar el

cumplimiento de todos los requerimientos en base a detectar inconsistencias de comportamiento, errores de estructuras, de datos, en cuanto a condiciones de dimensiones, densidad de material, formas, tipos, sanidad del material y función a desempeñar.

Se acuerda con el proveedor que las estrategias de caja cristalina (todo queda a la vista) y de caja gris (inspección al azar) , son de la competencia absoluta del él, y las deberá realizar antes de que se soliciten las pruebas de aceptación por el usuario ó después de ser rechazado el producto para que vuelva a presentar los álabes turbina corregidos.

2.- De Operación. Se inicia con la suposición de buena fé, de que los álabes van a ser utilizados conforme se ha establecido, que se cambiarán poco antes de que lleguen a su límite de vida, que no se les impondrá cargas adicionales a lo especificado, en general que se espera utilizarlos en condiciones de operación razonablemente normales y dentro de lo preestablecido, para el tipo de turbina diseñado.

3.- De Pruebas. La pruebas generalmente se inician con Exámenes No Destructivos (END), no excluyendo por supuesto a las pruebas destructivas como tensión, compresión, flexión, torsión, fatiga, creep, metalografías, perfil de dureza (de núcleo hacia afuera), de impacto y análisis químico (con muestra de rebaba), en caso de requerirse.

Dentro de la metodología para los END, se puede utilizar lo siguiente:

1. GT. Inspección General.
2. VT. Inspección Visual.
3. PT. Inspección con Líquidos Penetrantes.
4. MT. Inspección con Partículas Magnéticas.
5. UT. Inspección con Ultrasonido.
6. RT. Inspección Radiográfica.
7. AE. Inspección Acústica.
8. IR. Resistencia a la Indentación (dureza).

1. Inspección General, GT.- Esta inspección se realiza de manera preliminar para ver el estado que guarda la turbina con sus álabes, sin que sea necesario desarmar ninguna de las partes de la unidad, esta inspección se realiza además con el fin de determinar el tipo de exámenes no destructivos que conviene realizar para cada parte y si se estima necesario llegado el caso revisar parte por parte hasta desensamblar.

2. Inspección Visual, VT.- El proceso de inspección visual consiste en detectar todo tipo de indicaciones superficiales mediante el método directo, o bien con el uso de instrumentos a control remoto, (boroscopio). Los defectos detectados pueden ser registrados en el dibujo, fotografía o video y evaluar conforme las especificaciones del usuario.

3. Inspección con Líquidos Penetrantes, PT.- Este método consiste en acondicionar la superficie no porosa que se intenta examinar, para después aplicar tinte penetrante que entrará en cualquier abertura motivada por alguna discontinuidad (grieta), para luego remover el exceso de penetrante y después aplicar la solución reveladora que nos represente la indicación de la grieta de una manera visible, esta técnica se aplica de acuerdo a las especificaciones de ASTM y se evalúa según las especificaciones del usuario.

4. Inspección con Partículas Magnéticas, MT.- Este método se aplica a las partes metálicas ferromagnéticas con el fin de detectar posibles defectos o indicaciones de tipo superficial o sub-superficial, mediante la magnetización de la parte y aplicando después al medio partículas en forma seca o bien, húmeda. La concentración de partículas en alguna indicación sera la evidencia de alguna discontinuidad, la cuál es interpretada y evaluada en términos de la especificación correspondiente.

5. Inspección con Ultrasonido, UT.- Las características de este método son, que tiene la posibilidad de detectar defectos volúmetricos, es decir internos, mediante la generación-transmisión-recepción de ondas sonoras de alta frecuencia, que al incidir en una interfase, como por ejemplo: en una discontinuidad que esté reflejada en términos de pulso-eco, misma que se logra captar en un tubo de rayos catódicos. La interpretación es lograda por el técnico especializado y evaluada conforme a las especificaciones acordadas (proveedor-usuario).

6.- Inspección Radiográfica, RT.- De manera similar a cuando nos sometemos a un exámen radiológico del torax, la radiografía en los materiales se logra mediante el uso de rayos X, o bien, con el uso de material radioactivo, los cuales generan ondas electromagnéticas de alta penetración en los cuerpos, interacciona con ellos y genera algunos fenómenos físicos que ayudan a representar imágenes internas en una película sensibilizada por dichos fenómenos. Posteriormente la imagen latente es visible mediante el proceso químico llamado revelado. Al igual que en otros métodos, las indicaciones que aparecen son cuidadosamente interpretados para su evaluación.

7.-Inspección Acústica AE.- El método de prueba normalizado ASTM F914 (t), menciona que este método consiste en aplicar una carga determinada a uno de estos dispositivos (álabes), siendo monitoreada a través de sensores sensibles a ondas de esfuerzo en tránsito causados por el crecimiento de algún defecto, ejemplo: grietas o bien por rompimiento de fibras de plástico reforzado en la fibra de vidrio o la combinación de estos. La carga a que se sometw equivale a dos veces la de sus capacidad nominal.

La presencia de defectos es evaluada a mayor detalle con los métodos END, convencionales, para luego someterse a reparación en su caso y ser nuevamente examinados .

Con este método el álabe se evalúa de forma integral y rápida, aún cuando los otros exámenes serán necesarios para cuantificar el daño en forma más detallada.

8.- Resistencia a la Indentación (dureza), IR.- Es un método sencillo, práctico y rápido, para determinar la resistencia de material a la penetración, existen varios dispositivos en el mercado tanto electrónicos como mecánicos.

I.

3. DESCRIPCION DE LOS METODOS ESTADISTICOS

Consciente de las ventajas de utilizar procedimientos de muestreo estadístico que se dan en las producciones masivas que se inspeccionan por el personal encargado de ello y en el análisis de los resultados obtenidos en períodos previamente establecidos, es conveniente apegarse a los lineamientos establecidos en la norma mexicana NMXZ12, con base unificada para evaluar la calidad de los productos, extendiendo esta aplicación hacia los productos de importación con la ventaja que presenta en los países miembros de ISO se hayan adherido a esta norma base.

En forma breve mencionamos lo que hay que conocer para aplicar las 3 partes que constituyen la norma mexicana NMXZ12, ya que un buen plan de muestreo debe contemplar la información contenida en ellas.

NMXZ12/1-1987: Muestreo para inspecciones por atributos.

Parte1, información general y aplicaciones.

NMXZ12/2-1987, Muestreo para inspecciones por atributos.

Parte 2, métodos de muestreo por tablas y gráficas.

NMXZ12/2.-1987. Muestreo para inspecciones por atributos

Parte 3, regla de cálculo para la determinación y planes de muestreo, los métodos de muestreo serán aplicables si los requiere la producción de álabes.

I.

4. REVISION BIBLIOGRAFICA.

Se han realizado multitud de inspecciones en álabes de turbina, pero a la fecha no se ha encontrado una metodología para dar un aseguramiento de calidad en estas piezas. Se ha estado basando en información de revistas (ver pag.9), que tratan el tema de inspecciones, por lo que se cree, que la necesidad para obtener un buen producto en estas piezas, muy pronto pudieran aparecer métodos y seguimientos *confiables*, y aunque los fabricantes son muy celosos en cuanto a sus pruebas que realizan, al verse presionados por el usuario poco a poco tendrán que decir como los hacen, que técnicas siguen, y también como finalmente hacen la estimación para la duración de vida.

II.

PROPUESTA RESPALDO.

Los productores de energía están tomando con reservas a los ofertantes de servicios en sustitución y reparación de fallas de álabes en turbinas, tales como:

Grietas.

Erosiones.

Fracturas.

Otras causas.

Ya que lo que procede es volver a colocar los álabes en la rueda completa con los reemplazos que se tienen o como medida radical cambiar toda la rueda.

Este paso es muy costoso y no excluye la posibilidad de que la falla en los álabes ocurra de nuevo, si el reemplazo utilizado vuelve a fallar otra vez. Esta situación fuerza a ser más cuidadoso por parte del comprador en cuanto al producto ofertado (álabes), además de que en la solicitud de álabes a proveedores, que se originan en los departamentos de compras ha sido aprovechada por algunos Fabricantes de Equipos Originales (FEO), relacionados con proveedores de turbinas que aparecen con ofertas muy lucrativas en costos, pero también lo es, lo que el comprador considere y evalúe con justicia, es decir; no muy bajo ni demasiado alto del costo, término medio.

A continuación se establecen dos principales consideraciones que permiten tener la evaluación lo más cercano a lo especificado por el fabricante: (1) Revisión de la materia prima utilizada, (2) Procurar que las aleaciones seleccionadas en la manufactura de los álabes sean adquiridos únicamente con proveedores apropiados y aprobados, (se anexa tabla de algunas de las aleaciones representativas en Apéndice, Guía, Gráficas y Tablas).

Lo usual es un acuerdo (proveedor-usuario), es decir una orden de programa de seguimiento, que incluya lo que se denomina "Requerimientos de Aprobación Ingenieril", en esta etapa se requiere:

1. - Certificación del personal (personas que realizan las pruebas debidamente calificadas).
2. - Certificación del equipo (vigentes los sellos de la Secretaría General de Normas SGN).
3. - Historial de operación de la Unidad Completa, incluye : horas de operación totales de la unidad, arranques y paros, fallas con carga debidos a causas no mecánicas.
4. - Reposición de álabes, si estos son originales o si ya hubo cambios.
5. - Reparaciones, si las hubo ¿como fueron?, soldadura ¿que proceso?
6. - Verificación de forma, contorno, espesores, antes y después de la aplicación de soldaduras, etc.
7. - Inspección visual, péfil del álabe, con galga preconstruída con las dimensiones exactas del álabe.
8. - Relevos de esfuerzos, después de haberlos sometido a las variaciones de temperatura en operación normal.

- tensión, compresión flexión, torsión, todas por supuesto apegadas a las normas ASTM, ANSI o sobre la que se fije la especificación.
- Análisis metalúrgico detallado de los álabes por lotes de 3 a 4 piezas confirmando que las propiedades metalúrgicas son las especificadas.
 - Clasificación y evaluación del álabe de los que se consideran con daño irreparable y de los que si se aceptan para reparación.
 - Recubrimiento, si el álabe tiene capa protectora de recubrimiento o no, si la tiene, ¿de que tipo es?, Cromado, Niquelado o aplicación de un tratamiento térmico específico protector, etc.

La aplicación con el objeto de respaldar la evaluación de los ocho (8), métodos clasificados anteriormente (Metodología, Pag.14), siguiendo las normas respectivas ASTM, y los acuerdos con el usuario (el método de radiografía se deja a consideración).

Todo lo anterior respaldado por la caracterización del material del álabe, mediante el espectroscópio (análisis químico de los componentes vía seca, de respuesta rápida o por vía húmeda, tardando un poco más). Agregando a esto el estudio de la microestructura por microscopio obteniendo metalografías ya sea en blanco y negro o de color.

Todos estos resultados se registran y clasifican de acuerdo a posición y tipo de álabe, con especificaciones y cambios quedando plasmado en hojas de reportes para consultas futuras.

III.

EVALUACION Y RIESGO.

Evaluación del álabe que se desea utilizar y riesgo del usuario que lo utiliza, (por pieza (s) fuera de especificación). Por un buen tiempo los fabricantes de álabes de turbinas han desarrollado, implementado y verificado el diseño del álabe de turbina y sus principales tecnologías, sin embargo muchos otros proveedores, se han ido por la vía fácil a copias de álabes y en varios casos estos proveedores no han utilizado el material original del álabe, sus técnicas de proceso, ni mucho menos su recubrimiento original.

Como no siempre se ha aplicado el proceso original del fabricante, siguiendo las consideraciones de diseño con las propiedades originales, los riesgos inferidos de no utilizar equipo de fábrica adecuado, existen, porque las reproducciones, que es (substituir un álabe por otro pero sin cumplir plenamente con la especificación de fábrica), en muchos casos no tienen la tecnología para la manufactura del álabe idéntico; por lo anterior se establecen las siguientes consideraciones:

Evaluación del personal debidamente calificado.

Evaluación de los equipos no destructivos (END).

Evaluación de las pruebas mecánicas: tensión dureza, creep, fatiga.

Evaluación del tratamiento térmico para obtener tamaño de grano, etc.

Confirmación del reporte de control químico reportado por muestras de (piezas), certificada, para todo el material embarcado. La composición química estará dentro de los requerimientos de especificaciones marcados. También se requiere confirmación del método de duplicación del proceso de fabricación, es decir; una vez establecido el proceso, éste es mantenido como proceso intocable. (Esto significa que los parámetros de fabricación ya no se mueven). Esta tecnología (la a continuación mencionada), por lo general incluye lo siguiente:

- I.- Consideraciones de diseño y sus pruebas.
- II.- Consideraciones mecánicas.
- III. Consideraciones de aerodinámica original.
- IV.- Consideraciones de recubrimientos.
- V.- Consideraciones de control de calidad.
- VI.- Consideraciones de cambio de combustible, (realizado por el usuario).
- VII.- Ultimas mejoras al producto resultante, (por cambios de diseño).

BREVE DESCRIPCION DE LAS TECNICAS (ARRIBA CITADAS).

I.- En forma por demás breve, recordamos que la turbina es una máquina capaz de convertir la energía del vapor de agua en energía mecánica que se aplica sobre el eje en la cuál esta montada; por lo que la turbina de vapor es importante en la actualidad, constituyendo uno de los dispositivos fundamentales en la producción de energía.

Observamos que la caldera es la fuente de energía calorífica que inyecta vapor con alta presión a la turbina, dentro de la cuál, estan colocados los álabes, por lo que puede encontrarse un impedimento si hay una menor resistencia del material de que esta hecho el álabe ya que este se deformaría, también puede suceder que las pérdidas pueden acentuarse por la separación

del fluido (vapor), sobre los contornos del álabe o por choques entre ellos, produciéndose turbulencias más vibraciones perjudiciales; evidentemente en esto interviene el diseño de las formas de los álabes y sus sistemas de fijación en la flecha, que son muy variados.

Los álabes se clasifican como de impulso y de reacción; la forma de estos sistemas de fijación cambian.

Los álabes de alta presión son cortos.

Los álabes de baja presión son largos.

En el álabe se distinguen tres partes :

Raíz, que es la parte inferior del álabe dónde se fija a la flecha.

Cuerpo, que es la parte efectiva dónde realiza la transferencia de energía.

Cabeza, que es el extremo en cantiliber, recto (normal al radio de la rueda), ó con cierta inclinación, para reducir el área de ataque del fluido ó bien tener un cabezal de muñones para cierre de todos los álabes en una misma rueda.

En lo relacionado a las pruebas podemos decir, que las altas temperaturas de trabajo (alrededor y mayores de 550°C) aumentan los problemas de destrucción de los álabes y no solo el calor afecta lo anterior sino que también se favorece el depósito de partículas (termofóresis), y de sales de metales alcalinos. Para disminuir esto se desarrollan técnicas de protección usando materiales que resistan estos efectos, empleando substancias resistentes, investigando los problemas que son de tipo metalúrgico como: oxidación, depósito de partículas, destrucción de forma y que permitan utilizar materiales más livianos y resistentes, reduciendo de esta forma el peso por unidad de fuerza.

II.- De las consideraciones mecánicas podemos decir que en lo relacionado con esto las cargas por flexión debidas al flujo de vapor incidiendo

sobre el álabe, que el par de carga y la presión a más alta temperatura ejercido al cuerpo del álabe determinan la flexión por flujo, aunado a esto hay que considerar la fuerza centrífuga y el tiempo de exposición que nos condiciona y afecta el comportamiento, si las condiciones de especificación se salen de rango, se produce el fenómeno de creep, fatiga térmica (en altos y bajos ciclos). Otro de los condicionantes que se presentan es el concepto de vibración la que se presenta a diferentes velocidades y lo que se requiere es evitar su resonancia.

III.- De las consideraciones de aerodinámica original, tenemos que el comportamiento aerodinámico del álabe queda establecido por varios criterios a saber:

Acabado superficial.

Relación de cuerda/espesor.

Curvatura.

Torsión.

Tipos salientes de raíz.

Cálculos de arrastre por delgadez de filos.

A continuación se da una breve descripción de los términos.

Acabados superficiales. - Estos deben ser lo suficiente pulidos para mejorar en lo posible el paso del fluido y efectuar la máxima posible conversión energética.

Relación cuerda espesor. - Esto es la relación algebraica entre la cuerda de la curvatura diseñada y el espesor considerado en la parte media del cuerpo del álabe, que de acuerdo a diseño da la resistencia al álabe.

Curvatura.- En todas la turbinas donde se tiene una acción energética muy fuerte de vapor vivo en alta presión y temperatura, la parte externa del

álabe tiene cierta inclinación que se denomina curvatura, reduciendo la arista de ataque del fluido.

Torsión.- Obviamente el empuje de los gases no es distribuido en forma uniforme sobre el cuerpo del álabe, siendo éste (el empuje), más intenso hacia la periferia, por lo que en el álabe se le diseña con un giro, que va en función del empuje calculado.

Tipos de salientes de raíz.- Esto significa que tiene sistemas de fijación diferentes en su base sujetadora, que pueden ir embutidos en ranuras circunferenciales y en la parte de baja presión, los álabes se ligan en los extremos libres para dar rigidez al conjunto; en el argot (vocabulario), del montador turbinero, las denomina coronas circunferenciales que están amarradas.

Cálculos de arrastre por delgadez de fluidos.- En esta consideración tiene que ver en forma importante el perfil del álabe, pues del mismo depende el grado de reacción que tenga en el escalonamiento en cuestión.

Para entender las relaciones del entorno a considerar, brevemente se recuerda los diseños del proceso en el comportamiento aerodinámico del álabe.

Trabajo por Paso.- Se determina la caída de temperatura promedio por Rueda que conjuntamente con el perfil de velocidad del fluido se establece, ajustando la temperatura de flama del quemador con relación a la especificación del material del álabe; es decir al emerger el calor este se controla para no quedar fuera de las condiciones limitantes en el diseño de la turbina, temperaturas de entrada por etapas condicionado al comportamiento aerodinámico del álabe como se concibió originalmente.

Cualquier desviación de comportamiento aerodinámico de álabes podrá resultar en sobrecalentamientos, v.gr.: un ligero cambio en el ángulo de descarga al álabe, aumenta la temperatura del flujo, reduciendo la vida de diseño .

IV.- De las consideraciones de recubrimientos podemos decir que la parte medular esta en el conocimiento de la distribución de la temperatura sobre la superficie del álabe, es decir; si consideramos que la distribución local de la velocidad es utilizada para determinar la diseminación de los coeficientes de transferencia de calor se puede construir en forma detallada el mapa de las temperaturas del metal a través del álabe y considerar los esfuerzos en que esta basada la vida del álabe. Una vez con esta información es mucho más fácil determinar que tipo de recubrimiento será el más adecuado y conveniente.

V. De las consideraciones de Control de Calidad, podemos decir que son acciones orientadas a la acción de suministrar álabes turbina, los cuales esten de conformidad con las necesidades o requerimientos de los usuarios, mediante mejores procesos , más rápidos, más seguros, más económicos y más simples que la competencia, con la participación de todos los involucrados bajo la meta del bien común.

Es decir es una estrategia orientada al logro del incremento en lo bien hecho, a través de lograr organizada y sistemáticamente la satisfacción de los usuarios que le permite conservar e incluso su participación en el mercado.

VI.- De las consideraciones de cambio de combustible, es obvio que se aceptan, diversidades en tipos de flúidos posibles, cuando hablamos de turbina de vapor convencional, el agua vaporizada es el flúido, pero cuando hablamos de turbinas industriales para producción de procesos en la industria, así como generación de energía (15,30,65 Mw) y para uso militar como transportes terrestres pesados, aviones, helicópteros, tanques, barcos, los combustibles

son muy diversos pues estas turbinas se alimentan con gas natural, diesel, ó ambos, combustóleo, gasolinas especiales (turbocina), que obviamente cada uno de estos combustibles afecta de manera diferente a los álabes como parte crítica de la turbina, los oxida, sufren corrosión más o menos intensa disminuyendo su vida útil.

VII.- Ultimas mejoras al producto resultante (cambios de diseño). Es normal esperar cambios en cuanto a diseño, continuamente se estan desarrollando nuevos materiales, más ligeros, más resistentes, más manejables, aunque a veces podemos decirlo no más económicos, pero sin embargo la tendencia es a emplearlos por las mejoras que ofrecen, cambiando formas, dimensiones, geometrías por lo que los cambios se dan y constantemente estan presentes.

IV.

DISEÑO DEL ALABE
TURBINA.

Para entender la posición, el porqué de la forma y de los esfuerzos a que se ven sometidos los álabes, es conveniente analizar la posición que guarda el álabe dentro de la turbina, explicando primero brevemente los principales fundamentos de esta.

Las turbinas son máquinas de flujo permanente, en las que entra vapor por las toberas y se expande hasta una presión más pequeña, al suceder esto el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Parte de la energía cinética del chorro es cedida a los álabes de la turbina, de la misma forma que un chorro de agua cede su energía a los cangilones de una rueda hidráulica.

Las turbinas que utilizan el impulso del chorro de vapor para mover los álabes se denominan turbinas de acción, en ellas las ruedas con sus álabes están fijadas y van montadas sobre el bastidor, otra variedad es la de construir la turbina a manera de que los espacios comprendidos entre los álabes tengan la configuración de la turbina, en este caso la reacción ejercida sobre los álabes hace girar toda la rueda.

Este principio es el que caracteriza una turbina, tanto a las turbinas de acción como las de reacción es aplicable la 3ª Ley de Newton, la cuál dice que a toda acción corresponde una reacción de igual magnitud, pero de sentido contrario.

En una turbina el vapor se dirige permanentemente de la toberas a los álabes uniformemente repartidos en la periferia de la rueda. La transformación de energía se lleva a cabo mediante fuerzas ejercidas sobre los álabes de la rueda, a causa de los cambios de cantidad de movimiento del vapor al pasar entre los álabes la entalpia (h), (considera saltos de presión (P), en escalonamientos cuando estas máquinas son en varios pasos).

$$h = P_2 - P_1 / P_3 - P_1 \dots\dots\dots(1)$$

dónde P_1 , P_2 , P_3 , son las diferentes presiones en tres escalonamientos (ruedas con hileras de álabes).

A medida que el vapor circula por la tobera la entalpia (h), se convierte en la energía cinética de la turbina por lo que la variación de entalpia de vapor, aparece en forma de energía cedida al álabe, que esta sujeto al eje de la turbina, por consiguiente al variar la velocidad que adquiere el chorro de vapor, el comportamiento, las dimensiones y forma del álabe también cambian, por supuesto la forma y dimensiones de la turbina también estan en juego, pero el caso es que las partes en que la conversión energética se dá, es através de los álabes que son los que sufren deterioro por la acción directa del vapor y por el esfuerzo de empuje que proporciona al eje de la turbina que a fin de cuentas es la que produce el movimiento.

En una turbina de acción ideal el chorro de vapor que sale por una tobera debería llevarse al reposo en los álabes y de esta suerte, cedería toda su energía cinética a los mismos. En las turbinas de acción reales esto no sucede por razones de tipo constructivo. Por este motivo siempre se produce una pérdida de energía en la turbina a causa de la velocidad residual del vapor al abandonar la rueda.

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior (pg. 24), los dos tipos principales de turbina son de impulso y de reacción.

En la turbina de tipo de impulso el vapor se expande en las toberas de la cámara de vapor y se dirige hacia las ruedas con álabes.

En la turbina de reacción, el vapor se expande en los álabes estacionarios y móviles, y este continua pasando por entre ellos hasta que la presión de vapor disminuye

Los álabes de impulso están diseñados para que el vapor que pasa por ellos, no tenga una caída importante de presión; Fig. 1, en cambio en los álabes de reacción se incluye por definición, una caída de presión, como se observa en la figura de la página siguiente.

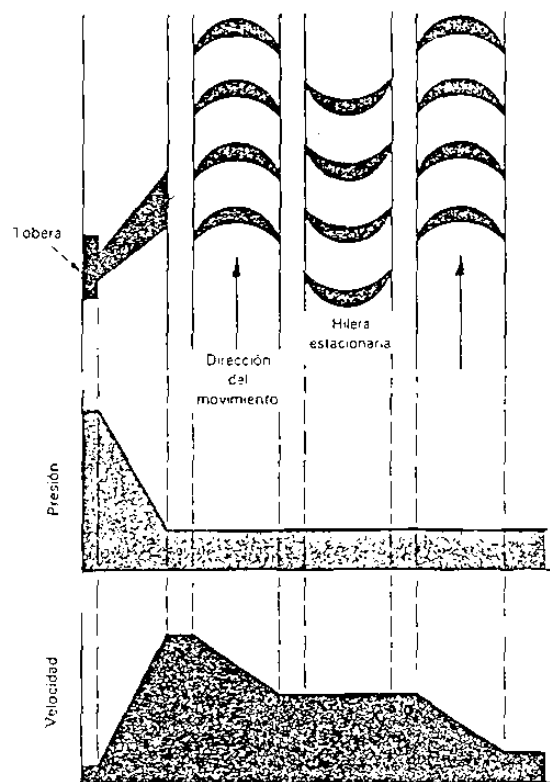


Fig. 1. Alabes en turbina de impulso

En una turbina de impulso el vapor se expande y choca contra una hilera de álabes móviles, con la velocidad y perfil indicados; con el fin de mejorar la eficiencia se desarrolla la etapa compuesta (turbina Curtis).

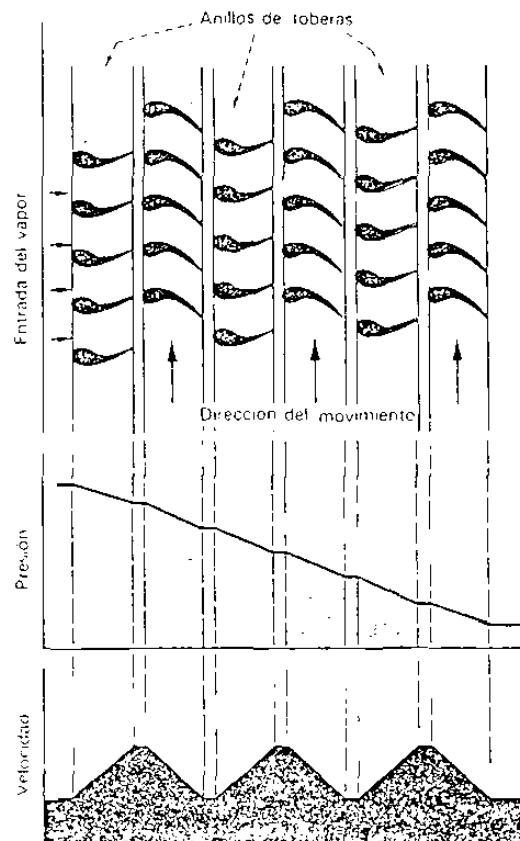
En esta, el vapor pasa por una expansión en los álabes fijos y a continuación pasa por una hilera de álabes móviles, para posteriormente pasar por otra hilera de álabes fijos y se repite.

La velocidad se reduce a través del paso en cada hilera de álabes móviles y mediante los álabes fijos se logra el cambio de dirección hacia la siguiente hilera de álabes móviles; mediante esta alternancia es posible lograr mejorar la eficiencia.

En todas las turbinas grandes la eficiencia se logra mediante etapas múltiples y en las cuales hay más de una expansión de vapor.

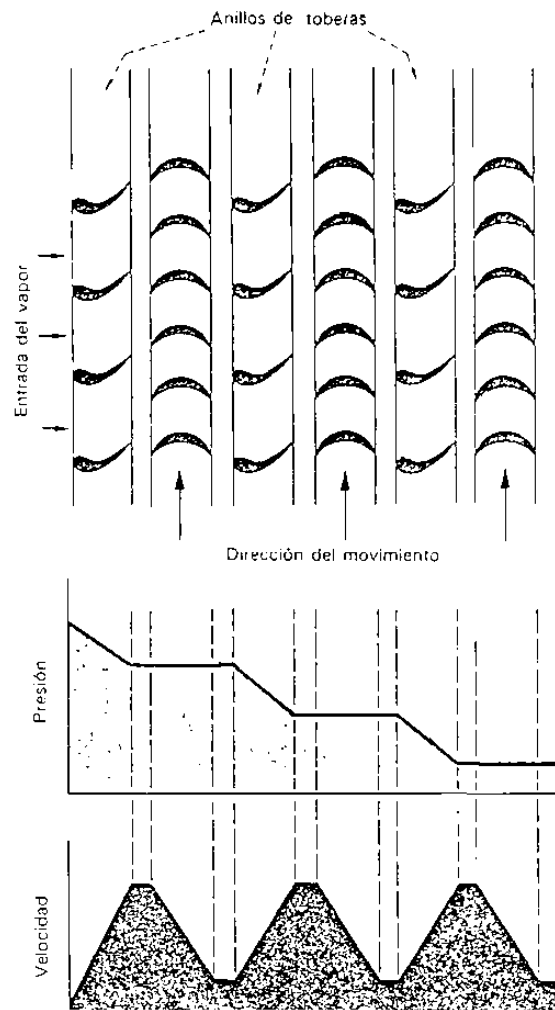
En las turbinas de reacción se utiliza el otro tipo de álabes, Fig. 2., aquí el vapor se expande en forma alternada en las hilera de álabes fijos y rotatorios, con una caída de presión en cada hilera.

Fig. 2. Alabes en
turbina de reacción



Cuando se especifica una turbina con etapas múltiples, se suele dejar la elección de la combinación más apropiada del tipo de álabes a escoger al experto diseñador en turbinas, Fig. 3.

Fig. 3. Alabes de acción y reacción en turbina de etapas múltiples.



V.

ENTORNO
DEL ALABE TURBINA.

Podemos decir sin temor a equivocarnos que la tendencia en lo relacionado a su entorno está en sus aplicaciones: existen dos aplicaciones muy típicas que son: en aviación y en servicio industrial. Las características de operación de uno y otro caso son diferentes, lo que exige máquinas en cierta manera distintas.

VI.I AVIACION:

Operación dentro de amplios límites de temperatura y de presiones ambientales.

- * Quemar solamente queroseno de alto grado a fin de tener seguridad en la regulación de valores caloríficos satisfactorios.
- * *Es esencial el empleo de materiales de construcción ligera, resistentes al calor y oxidación, (aleaciones de Titanio).*
- * Se puede sacrificar la vida de la máquina, por razones de buena respuesta en todo momento; especialmente en el despegue del avión.

VI.II INDUSTRIAL.

- *Comparativamente se requiere una gama más pequeña de temperaturas y presiones ambientales.
- * Se pueden quemar combustibles muy variados, líquidos o gaseosos, desde petróleo crudo hasta gas natural (Inclusive combustibles sólidos).

- * Es esencial el empleo de materiales resistentes a la corrosión.
- * Se debe prolongar la vida de la máquina con cargas de operación adecuadas reduciendo o evitando las sobrecargas.

Pero en esencia podemos decir que las demandas son las mismas de siempre:

- * Aumento de potencia por unidad (hacer más competitivo este motor con otros tipos).
- * Elevar la temperatura de los gases de entrada a la turbina, buscando materiales que resistan el trabajo con altas temperaturas ó empleando sistemas de refrigeración en los álabes
- * Incrementar el rendimiento térmico de la unidad con un mejor aprovechamiento del calor.

VI.III AUMENTO DE LA POTENCIA UNITARIA.

La potencia de una turbomáquina es directamente proporcional al cubo de la velocidad de giro y a la quinta potencia de la dimensión característica; esto es:

$$P = N^3 * D^5 \dots\dots\dots(2)$$

Se puede aumentar la potencia incrementado la velocidad de giro ó las dimensiones de la máquina, aunque influyen más esta última que la velocidad de giro.

Elevar la velocidad, propicia más vibraciones, aumentar de tamaño, aunque es de hecho más efectivo, no siempre puede realizarse por limitaciones de espacio, particularmente en máquinas destinadas a la aviación ó vehículos terrestres. En las unidades industriales esta es la solución más indicada.

Y aunque se está consiguiendo aumentar la potencia de las turbinas, el tamaño y peso se incrementa poco, gracias al progreso en el diseño de los álabes y de

los ductos de paso, que permiten mejor la transferencia de energía entre fluido y máquina elevando el rendimiento térmico.

Por otra parte los adelantos en la Metalurgia están permitiendo empleo de elementos más livianos y resistentes, reduciendo el peso por unidad de potencia.

En el transcurso de lo expuesto se ha hecho notar la importancia de la temperatura de los gases que entran a la turbina y su influencia en el rendimiento térmico de máquina.

Si se analiza la combustión podemos observar que la temperatura de estos alcanza valores de 1700°C a 1900°C, temperaturas estas demasiado altas para los álabes de las turbinas, haciéndose necesario trabajar con aire en exceso para abatir la temperatura a valores del orden de 750°C a 950°C, (solo con álabes refrigerados se puede llegar hasta 1170°C).

Se requieren aleaciones especiales para los álabes y carcazas que puedan soportar no solo la temperatura sin destruirse, sino los efectos nocivos que esta acarrea, como son el aumento de sedimentos de la oxidación y de la corrosión; la alta temperatura también favorece la formación de óxidos de nitrógeno, (combustibles líquidos), que son expulsados por los gases de escape.

En la manufactura de álabes se deben emplear materiales que soporten las altas temperaturas como también los esfuerzos mecánicos a que se hallan sometidos.

Se está investigando para lograr temperaturas de entrada a la turbina hasta de 1650°C, empleando álabes refrigerados y una película porosa muy resistente al calor y protectora de depósitos de partículas y sales de metales alcalinos.

El empleo de materiales refractarios a base de Wolframio, Tántalo, Niobio y Molibdeno, son aconsejables, cuando se requiere operar a muy altas

temperaturas (1700°C), siempre que no se exija gran resistencia mecánica ni a la oxidación, pues presentan fragilidad.

VII.IV REDUCCION DE DEPOSITOS, DE LA OXIDACION Y DE LA CORROSION.

Las altas temperaturas de trabajo *aumentan los problemas de corrosión y destrucción de los álabes, de las paredes, de las carcazas y de los ductos por donde pasan los gases calientes; la única solución parece estar en usar los materiales adecuados.*

VI.

PROGRAMA DE CALIDAD DEL ALABE TURBINA

El programa de calidad es un sistema orientado a producir y suministrar álabes turbina, los cuales esten de conformidad con las necesidades y requerimientos de los usuarios, mediante procesos mejores, más rápidos, más seguros y más simples que la competencia, con la participación de todos los involucrados, la meta el bien común.

Así que es una estrategia orientada al logro del incremento en lo bien hecho, a través de lograr organizada y sistemáticamente la satisfacción de los usuarios que le permite conservar e incluso la participación en el mercado.

Para ello el programa de calidad de álabes turbina, establece la necesidad de alcanzar la calidad del álabe; entendiendo por esta, productos (en este caso álabes), y servicios suministrados con la más alta calidad de desempeño, al más bajo costo, con la mejor entrega y la mayor seguridad para los usuarios y el personal que lo produce, sin afectar el entorno ambiental, dónde esto sucede, todo ello logrado con la más alta calidad ética y moral de los involucrados.

Luego entonces podemos definir a la calidad como : **calidad es la pérdida que el producto causa a la sociedad desde el momento que es enviado.** (Definición debida a Taguchi, 1986). Por supuesto que el producto es

de calidad, si la pérdida que provoca a la sociedad es mínima. La ventaja de esta definición es que permite medir la calidad en unidades de dinero.

Esta definición pone de manera implícita la total satisfacción del usuario, como condición indispensable para que el álabo sea de calidad, también se desprende que calidad es un concepto multidimensional, que al menos tiene que ver con los siguientes aspectos:

desempeño, confiabilidad, durabilidad, servicio, aspecto estético, propiedades deseables, calidad perceptible, cumplir con los estándares, precio, disponibilidad.

Dado el carácter multidimensional de la calidad, esta puede mejorarse por muchos frentes. La mejora de cualquiera de estos aspectos, implica una mejora a la calidad.

Sin embargo no debemos olvidar que el concepto de calidad, que no está en el producto, las cosas o procesos y que es el hacer bien las cosas, está en el ser humano en su actitud positiva, cuando se pone en ejercicio la calidad automáticamente se empiezan a ver los cambios de esa actitud, cuando a la suma de actitudes positivas se le agrega el ingrediente de calidad los obstáculos se convierten en oportunidades y éste es el enfoque que nos ayudará a lograr lo que tanto hemos soñado: tener una meta bien definida, saber a dónde se vá, que hacer y como hacerlo porque la filosofía de la calidad tiene esa gran ventaja y es que reconoce que todos los insumos de un producto cualquiera que este sea uno de ellos es el más valioso y este es el hombre y regresa a el hombre. Lo que el programa de calidad del álabo turbina enfatiza, es asegurar que los requisitos de los dibujos y especificaciones de ingeniería sean los adecuados para lograr sus objetivos, que se reduzcan los costos y el tiempo improductivo, que queden fácilmente localizados los puntos débiles de su entorno y cuales serían las medidas

aplicables para mejorarlo, resaltar las bondades de su función, rediseñar más fácil procesos, funciones y áreas críticas alcanzar la meta señalada.

Lo que a continuación se dá es el programa de control de calidad que se estima dividido en las etapas siguientes:

- I. Revisión de la materia prima utilizada.
- II. Revisión del maquinado del álabe.
- III. Inspección de la producción del álabe.

Las aleaciones utilizadas en la manufactura de los álabes de las turbinas deben ser adquiridas únicamente con los proveedores autorizados y aprobados en el tiempo.

La aprobación de los proveedores requiere que presente confirmación de los reportes. (Aprobación, análisis, certificados, confirmaciones y demostraciones ya mencionados en el tema de Metodología).

II. Inicialmente se realiza (dos veces al año) una auditoría (que son formas de evaluar el grado de efectividad de un sistema que contempla a cada área del proceso), con objeto de encontrar áreas de oportunidad de mejora y para tener un repaso general de la capacidad del proveedor-fabricante y del programa de calidad aplicado para la producción de los álabes.

Se inician una serie de revisiones denominadas "Requerimientos de aprobación de Ingeniería", (2ª etapa de revisión, la 1ra. etapa fué lo relacionado con los END).

Análisis metalúrgico detallado de los álabes que consiste en lo siguiente:

- Reconfirmación química del producto terminado.
- Evaluación de indentación (dureza).
- Confirmación de la factibilidad del tratamiento térmico.

-Confirmación de todas las propiedades: estructura, tamaño de grano, % de austenita retenida (p.ej.: en el caso de los aceros), etc.

Verificación de las propiedades mecánicas:

- Tensión, Compresión , Flexión, Esfuerzo último, Cedencia, Creep, Fatiga etc.
Dilatación y contracciones.

Consideración de poder reproducir el álabe como el de fábrica.

- Reproducibilidad de la propiedades de los álabes mínimo 12 Pz. por lote
- Certificación de que ya no se va a mover ningún parámetro del álabe.
(Congelación).

Evaluación de los equipos de Exámenes No Destructivos (END) y procedimientos aplicados de común acuerdo proveedor y usuario.

Certificación del personal que efectúa las pruebas.

El plan de control es revisado en detalle para asegurar la calidad consistente en las subsecuentes corridas de fabricación. Las cédulas de calibración, los procedimientos dimensionales de la (s), galga (s), son verificados, los procedimientos de pruebas no destructivas son verificados (líquidos penetrantes, corrientes de eddy, radiografía y ultrasonido, etc.).

III. La pruebas metalúrgicas se vuelven a revisar, asegurando que todos los álabes se encuentren dentro de los requerimientos del diseño, incluyendo además de lo dicho lo siguiente:

- Control del lote químico en todos los materiales que intervienen.
- Inspección de dureza 100%.
- Inspección sónica 100 %.
- Identificación y enumeración de cada una de los álabes.
- Pruebas metalográficas.

En cuanto a la inspección dimensional, asegurarse de que todas las partes del dibujo reúnen los requisitos para el desempeño mecánico especificado, considerando el uso de galgas de contorno y forma del álabe, comparador óptico para considerar la luz que se deba haber entre el álabe y forma de la turbina.

Todo lo anterior debe realizarse en fábrica previo embarque y conservar los resultados de las pruebas en un lugar seguro (con el fin de que solamente personal autorizado tenga acceso).

Lo anterior generalmente involucra la visita del proveedor a la planta de manufactura, durante la cuál revisará en forma conjunta con el ingeniero de aseguramiento de calidad, el resultado de las inspecciones en muestras de álabes, para asegurar que los requerimientos de los dibujos son seguidos tal y como se solicitaron.

Adicionalmente el ingeniero de aseguramiento de calidad del fabricante auditará al proveedor periódicamente en los procesos de cambio de control de calidad en la fabricación.

VII.

IMPACTO DEL PROGRAMA DE CALIDAD.

Aquí el diseño del álabe de turbina es revisado del modo que los impactos (*impacto = valoración*), menos obvios sean los expuestos en el programa de calidad, precisamente en los diseños mecánicos y aerodinámicos del álabe.

También es reforzada la importancia de muchos requerimientos del programa de calidad en el contexto del diseño y proceso. Nuevamente los requerimientos del impacto del programa de calidad, es mayor de lo que aparentemente nos podemos imaginar.

En la fabricación del álabe de la turbina intervienen muchas variables de procesos, así como composiciones del material que deben estar rígidamente controladas, para obtener la estabilidad metalúrgica en el álabe.

Por ejemplo, el probar el álabe operando a temperaturas requeridas para asegurar que en el corto tiempo de prueba resulta verdadero e indicativo del comportamiento largo y verdadero esperado, por eso en algunas de las aleaciones modernas de álabes, se obtienen determinados esfuerzos con valores aceptables, como el haber obtenido una estructura con precipitación de pequeñas partículas de 2ª fase, γ' dentro de los granos, sin embargo el tamaño de estas partículas es inicial, ya que los efectos son con esfuerzos reducidos.

La implementación de parámetros de control para el tamaño de grano inicial y el hecho de que después crecen con el aumento de la temperatura y

con los esfuerzos a que son sometidos, permite que muchas veces exista un inadecuado control de las variables del proceso, que causa que las partículas aumenten de tamaño más que como inicialmente se concibió, resultando álabes que son afectados en corto tiempo por los esfuerzos de creep, pero con pérdidas de soporte en esfuerzos durante la operación en una razón más rápida que la estimada.

Otro ejemplo al que no habría excusa para no considerarlo, es el comportamiento determinado por las frecuencias naturales del álabe en sus varios modos de vibración.

El principio fundamental en el manejo de la vibración del álabe, es evitar la resonancia. Esto es por el diseño en la frecuencia natural que se obtiene al menos en los primeros cuatro nodos (punto de intersección de dos o más ondulaciones), los cuales deben estar suficientemente lejanos de la frecuencias de excitación e identificados por el diseñador sobre un rango de operación normal.

La determinación primaria de la frecuencia natural del álabe es su geometría siendo esto otra razón para el chequeo dimensional de calidad.

En adición a las varias propiedades de los materiales como: módulo de elasticidad y densidad, así como también el efecto de la frecuencia natural, es de tal manera básico, que el diseño y cálculo, deberán estar basados en el material específico del álabe.

Una vez que las frecuencias naturales del álabe en sus varios modos de vibración esté determinada y considerado para estas frecuencias Versus curvas de velocidad , es necesario referirse al diagrama de Camp-Bell (se anexa en , Guía, Gráficas y Tablas), con lo que se asegura que la resonancia no ocurrirá.

Así como también el efecto de la velocidad en la rigidez del álabe para estas frecuencias, como lo son las curvas de velocidad para asegurarse que la resonancia tampoco ocurrirá.

Asegurando el esfuerzo adecuado de vibración, mediante cálculo de esfuerzos por evitar la resonancia en los álabes de turbina que deben estar diseñados dentro de un incremento normal de vibración por excitación.

El límite de endurancia del material está determinado en la construcción de una curva, en el llamado Diagrama de Goodman de Esfuerzos de Vibración, (Cap. XII, Guía, Tablas y Gráficas) a una temperatura requerida, para generar falla por fatiga en un ciclo alto. p. ej: cada determinado número, v gr: $10 E6$ Vs. Esfuerzos fijos, estos esfuerzos de vibración son conocidos por numerosas pruebas de laboratorio en el material bajo consideración.

El límite de endurancia está condicionado por la entrada a la curva, por el cálculo de esfuerzos fijos debidos a efectos por acción térmica y centrífuga más la respuesta de la temperatura del metal.

Por lo tanto el esfuerzo por fatiga en un material apropiado, solamente es conocido por la temperatura específica y los patrones de esfuerzo del álabe que pueden llevarlo a una duración de vida insegura.

En este punto conviene también mencionar que un comportamiento de paros y arranques puede llegar a estar limitando la vida del álabe, por lo que se llama límite de vida de fatiga por bajo ciclo en sus componentes.

Por lo que conviene el conocer como se obtiene la resistencia del material del álabe a la fatiga térmica.

El número de ciclos para iniciar una falla por fatiga térmica es mucho más bajo que un ciclo alto de fatiga; típicamente abajo de 10,000 ciclos.

Consecuentemente las cargas altas son suficientes como para considerar un resultado usual de alguna cedencia, es decir, aquí el esfuerzo es mayor que los esfuerzos de bajo ciclo de fatiga, que es el parámetro de interés.

Las pruebas más comunes utilizadas para evaluar el material del álabe en esta clase de cargas, son las isotermas y el esfuerzo controlado en el ciclo de fatiga sujeto a tiempos definidos.

Docenas de tales pruebas deben ser corridas literalmente con temperaturas, rangos de esfuerzos variables y sujeción de tiempos para establecer el criterio de vida térmica para el material a consideración.

Calculando los esfuerzos de fatiga térmica: los cálculos de los esfuerzos térmicos son extremadamente complejos, gran parte son debidos a gradientes transitorios normales asociados con los arranques y salidas. En este caso la temperatura máxima de superficie es a menudo una consideración primaria mayor que el promedio de temperatura del metal en los que están basados los cálculos de ruptura por creep.

Consecuentemente solo se ofrecen buenos resultados, con modelos disponibles, tratados por la técnica de Elementos Finitos, (2 y 3 dimensiones), para ambos: cálculos de los esfuerzos de conducción de calor; esto es modelándolos se pueden considerar muchos efectos locales que afecten.

Radio y filo crítico, espesor mínimo de pared, son estos valores conocidos que nos ayuda a establecer los límites de aceptabilidad al cuál el programa de calidad se adhiere.

Por lo anterior es necesario acentuar la necesidad de que los fabricantes establezcan parámetros basados en requerimientos de calidad; es decir se traduce en un problema de valores para entender cuales son las variables importantes señalándolas y que de esta forma el álabe cumpla satisfactoriamente su función.

No debe existir por lo tanto razones que sean discutidas, para hacer válido un diseño de álabe turbina y este debe usarse solamente para la aplicación específica con el material programado y con un equipo especificado para la determinada fabricación.

VIII.

APLICACION DE SU POTENCIAL
EN MATERIA DE SUBSTITUCION.

La aplicación es la del programa propuesto, partiendo como premisa de la posible situación de substituir materiales sin el respaldo de diseño, en un equipo determinado, quedan fuera de este tema, pero siguen siendo imprevisibles (suceden).

Damos aquí, a continuación retos a vencer, en cuanto a su substitución, al pensar en el diseño del álabe, para obtener un comportamiento óptimo, en tanto se evita la fatiga del metal como limitador de vida.

Problemas de esfuerzo de ruptura por creep, que potencialmente disminuyen la vida útil de los álabes.

Los álabes típicos en la turbina estan diseñados para una operación como mínimo de (40,000 / 50,000) hs., estos cálculos son llevados a cabo utilizando familias de curvas de vida por creep (Fig. 4.), para este material en particular.

Como un ejemplo se cita el esfuerzo-ruptura a varias temperaturas, para super-aleaciones base níquel, constatándose con indicaciones de variación de ductibilidad de elongación después de la ruptura, basándose en pruebas de (10,000 / 30,000) hs., con varios esfuerzos (cargas), para materiales, con esfuerzos, temperaturas y presiones. como: UDIMET 700, RENE 77, HASTELLOY-X, NIMONIC 118, INCONEL 738LC, etc.)

En la práctica las muestras estan diseñadas para fallar en aproximadamente (160 / 200) hs. Ahora bien, incrementando los esfuerzos de lo que la experiencia espera del servicio del álabe.

La vida de ruptura por creep de un álabe esta determinada por el acoplamiento del suministro del flujo, de la carga por flexión, más la fuerza centrífuga (basándose en la geometría del álabe y la densidad del material), para determinar los esfuerzos de distribución a través de tipos de material, con el fin de encontrar el punto crítico para determinar la vida por creep. Lo que sucede es que los esfuerzos crecen y las temperaturas se incrementan

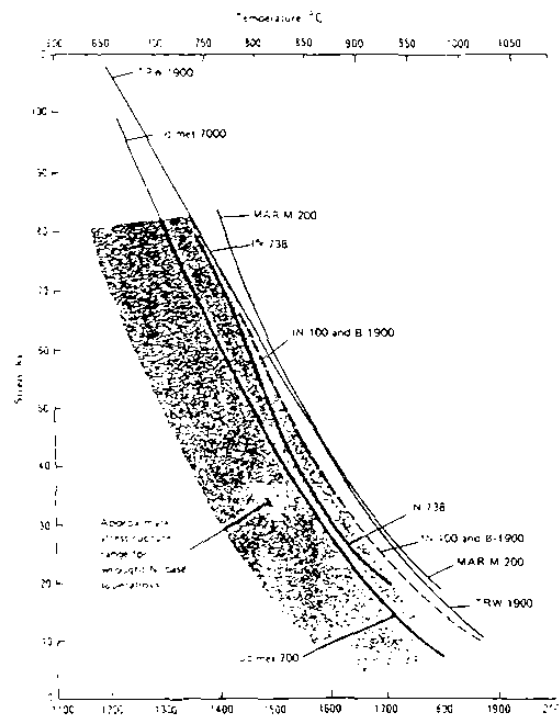


Fig.4. Familia de curvas mostrada como ejemplo.

Cada punto es considerado, por ser punto crítico para la vida de creep. Por lo que la determinación de la temperatura específica y el esfuerzo crítico, es dónde se realiza la evaluación del material; p. ej.: sí el efecto de temperatura maneja una ruptura dada por creep que varía la vida de material a material, no puede hacerse generalización como la de, **El mejor material de álabe para las turbinas es...**, el material adecuado para una aplicación, puede no ser el adecuado para otra, debido a que la relación de esfuerzo-temperatura, para los diferentes puntos críticos es diferente.

IX.

CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES.

En conclusión decimos que como parte de las pruebas mecánicas la utilización de los Exámenes No Destructivos, (END) son muy convenientes en el monitoreo de las partes críticas tanto al momento de recibir las piezas nuevas como al estar en operación después de ciertos períodos, las piezas sufren cambios superficiales y estructurales, mayores o menores dependiendo de ¿cómo?, ¿cuándo?, ¿dónde? y en que condiciones están siendo utilizadas y ¿por cuanto tiempo?.

Son como las radiografías de pacientes en la que el médico después de estudiarlas puede dar un dictamen de valoración, continuar o hacer modificaciones, dependiendo del caso en particular, especialmente en estas partes que son las críticas.

Estas pruebas de END, tienen también la ventaja de preveer los daños mayores; muchas veces sucede que por una grieta se puede inclusive disminuir su operación por el riesgo que se cree ocasionaría, siendo que mediante un análisis se puede llegar a la conclusión de que, es posible continuar o reparar, y en casos extremos detener su utilización.

Y así como se habla de grietas se pueden mencionar otros cambios: como corrosión, soldaduras desprendidas o mal aplicadas, choques térmicos por mala operación del equipo, sobrecargas necesarias o innecesarias etc.

Así como también de los equipos de piezas de repuesto nuevas o inclusive unidades nuevas completas, verificando que lo que se solicitó esté dentro de lo especificado y en función de la calidad esperada.

Como recomendación podemos decir: que es un hecho el importante papel que juega el conocimiento anticipado que se tenga de las temperaturas, de presiones, de sus recubrimientos y de la cantidad de flujo de enfriamiento que circunde el álabe, de ello dependerá su comportamiento, sin olvidar situaciones aerodinámicas y de como afecta en su comportamiento el conocimiento de la frecuencia natural del álabe, además de las propiedades en materiales secundarios que influyen, tales como la conductividad, coeficientes de expansión en la determinación de esfuerzos térmicos. Por lo que la validez de los análisis de fatiga térmica, son aplicables al material del álabe en particular y a su interacción en las características de operación específicas, como es el comportamiento operacional, que son los arranques, los paros y la carga contratada del servicio que presta y la duración de la pieza esperada.

Es recomendable además la utilización de técnicas como: las de contorno en 3 dimensiones recomendada por diseñadores en sistemas con alta eficiencia, con cargas pesadas de trabajo y en esta aplicación del proceso es indispensable un amplio y comprensivo uso del método de 2 y 3 dimensiones para análisis del flujo del gas en cuestión en los diferentes estados de la turbina y sus elementos.

También pudiera ser que se modificara el eyector del diafragma en la entrada de vapor de la turbina para tener un ángulo de divergencia mayor en la zona de la periferia del álabe, permitiendo reducir temperatura radial y cruzada

que reduzcan la temperatura en el álabe en zonas dónde se formen choques de flujos alrededor del diafragma eyector y con la resultante de disminuir también pérdidas de energía.

Y pudiera ser también que se compare en las diferente etapas de la turbina con el eyector del diafragma inicial y el actual y después de la observación, modificar el flujo hacia abajo en una etapa que ayude a reducir pérdidas por salida e incrementar la eficiencia.

También ayudaría un análisis de flujo de vapor que presiona al álabe y que muestre maneras de elevar la eficiencia dinámica del la acción del fluido en el álabe y posiblemente reducir el choque la intensidad de entrada y salida por choque de onda a lo largo de la dimensión del álabe.

Así también podemos decir que los álabes que trabajan bajo condiciones extremas tienen como consecuencia una vida finita acelerada que podemos atenuar siguiendo guías de vida de servicio, esto por supuesto incluye cuantificar daños mecánicos (si los hay), degradación de las superficies, deterioro microestructural y daño por creep.

Los daños mecánicos son detectados usualmente por técnicas de pruebas no destructivas (END), mientras que la estimación real del daño es detectada mejor mediante un examen destructivo,. Los manuales de mantenimiento de los fabricantes de turbinas proveen de instrucciones detalladas, particularmente en lo referente a técnicas de inspección y límites de servicio. Con propósitos de obtener una correcta valoración, anexamos Guía de observación y cuidado en álabes de turbina, (Apéndice, Guía, Gráficas y Tablas).

A medida que la vida de diseño del álabe esté por terminarse, el usuario está interesado en conocer la vida residual de los álabes.

Y si además el álabe trabaja (con muy alta probabilidad), bajo condiciones de termofluencia, sucede, que las componentes fallen mucho antes de lo estipulado por el fabricante, produciéndose paros forzados en la turbina, con las pérdidas económicas que ello implica. En caso de que la falla del material del álabe llegara a ser por termofluencia, lo que sucede cuando el material se está deformando plásticamente en forma lenta pero continua, por razón de estar expuesto en altas temperaturas y altos esfuerzos, entonces el material de que está hecho el álabe pierde las propiedades mecánicas, porque microestructuralmente se inició la degradación.

Dentro de estos cambios reales se encuentra, p. ej.: en el caso de los aceros el crecimiento de carburos, consecuentemente tenemos variación en la dureza del acero de aleación de que esta hecho el álabe, formación de fases frágiles, posible esferoidización y aparición de microcavidades.

Por lo que se puede decir que fundamentalmente existen cuatro (4), aproximaciones para el cálculo de la vida residual.

1. Consideración de la historia de operación térmica del componente, éste conocido como "Método de la Fracción de Vida".

2. Estudios de la estructura Físico-Metalúrgica, para determinar el grado de degradación microestructural.

3. Inspección física la cuál incluye ensayos no destructivos y cambios dimensionales para determinar el porcentaje (%), en deformación del material.

4. Pruebas mecánicas de termofluencia de muestras representativas del material a evaluar.

Todas estas técnicas, por supuesto tiene sus ventajas y desventajas, P. ej.: el conocer la historia térmica de un material dá pauta a predecir su comportamiento y además pudiera considerarse como técnica de Métodos No

Destructivos, sin embargo es muy difícil, si no que imposible conocer esto con exactitud.

Con el conocimiento del grado de avance del daño microestructural, se puede por decirlo así, tener un conocimiento de 1ª aproximación de la vida remanente del material, pero para saberlo con exactitud se tendría que realizar pruebas ininterrumpidas de termofluencia para el álabe en particular y determinar su evolución microestructural durante el ensayo de termofluencia,

Ahora bien si se utiliza esta técnica, se tiene la ventaja de inspeccionar un número casi ilimitado de lugares in-situ, realizándose por medio de réplicas, pero con interpretación subjetiva.

Pudiéramos decir que la prueba de ruptura es de las más exactas, pero en este caso, es una prueba destructiva, además que consumen tiempo y está limitada en cuanto al número de lugares a muestrear.

BIBLIOGRAFIA.

1. Elihu F. Bradley (Consulting Editor).
Superalloys A Technical Guide.
ASM INTERNATIONAL Metal Park, OH 44073.
Copyright, 1988. 1st. Edition.
2. Donald S. Clark, Wilbur R. Varney.
PHYSICAL METALLURGY for Engineers.
D. Van Nostrand Company.
Copyright 1952, Second Edition.
3. Manuel Polo Encinas.
TURBOMAQUINAS DE FLUIDO COMPRESIBLE
Editorial LIMUSA, S.A.
1984, Primera Edición.
4. Williams H. Severns, Howard E. Degler, John C. Miles. ,
STEAM, AIR and GAS POWER
John Wiley & Sons.
Copyright, 1954, Fifth Edition.
5. Chester t. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hagel.
SUPERALLOYS II, High-Temperature Materials
for Aerospace and Industrial Power.
John Wiley & Sons.
Copyright, 1987. Second Edition.
6. NORMAS ASTM E109-63, E59-78, E500-85.
Met. p/inspección de partículas magnéticas.
Mét. Std. para muestreo determinación y composición química.
Terminología Std. Rel. c. / pruebas de ultrasonido.

APENDICE.

1. GUIA, GRAFICAS Y TABLAS .

Guía.

Observación y Cuidado en Alabes Turbina.

A. INTERVALOS DE EVALUACION.

A.1.- La evaluación de daños mecánicos por métodos no destructivos (END), depresiones (dents), poros (nicks), desgaste (erosión) y fractura (cracking) deberán ser localizadas dentro de intervalos recomendados por el fabricante, o en ausencia, la estimación de la vida del álabe es multiplicar esta por 0.2 .

A.2.- La evaluación destructiva será de acuerdo a la estimación de vida inicial multiplicada por 0.5 ó 0.8. Las evaluaciones subsecuentes deberán ser realizadas de acuerdo a la estimación de la multiplicación de vida de diseño del álabe por 0.2 ó 0.5 (dependiendo de los resultados de la evaluación anterior).

B. EVALUACION NO DESTRUCTIVA.

B.1.- Daño Mecánico.

B.1.1.- Seguir los procedimientos de inspección del fabricante, si es posible.

B.1.2.- Las superficies del álabe deberán estar limpias por métodos apropiados mecánicos ó químicos, asegurándose de no tener agujeros de enfriamiento conectados entre sí (cooling holes not plugged).

B.1.3.- Inspección de álabes visual y dimensionalmente, buscando:

- desgaste en los sellos (seal wear).
- rugosidades, ondulaciones (tip rug).
- daños por objetos extraños.
- fracturas (cracking)

- erosión superficial ó pérdida del recubrimiento (surface erosion or coating loss).

B.1.4.- Inspección en la totalidad de la superficie del álabe con líquido penetrante fluorescente, siguiendo los procedimientos según especificación MIL - I -6866(ASG), usando métodos tipo I, B ó C.

B.1.5.- Alabes con fracturas, poros, ó escoriaciones, no son ya para el servicio, pero pueden ser utilizados a condición de estar dentro de las tolerancias de uso del fabricante; si estas tolerancias no han sido avaladas, los límites se pueden obtener mediante cálculos basados en esfuerzos y distribución de temperaturas en el álabe.

B.1.6.- En ondulaciones y rugosidades el álabe puede aún seguir en servicio si no son afectadas sus corrientes de enfriamiento, sin embargo, si afectan adversamente el comportamiento de la turbina, hay que hacer cambios. Las estimaciones del comportamiento permitido están asociadas con el desgaste de álabes que por supuesto debe estar basado en mediciones de desgaste en el mismo.

B.1.7.- Los álabes con daño que se extienden más de sus límites, deformado o con excesivo desgaste podrán ser reparados mediante soldadura previendo que ésta no se exceda de los límites dimensionales.

C. EVALUACION DESTRUCTIVA.

C.1.- Selección de la muestra de álabe:

C.1.1.- Los álabes removidos de un conjunto de álabes serán seleccionados de tal forma que sean representativos del conjunto (p.ej.: mismo fabricante y mismas horas de servicio).

C1.2.- Los registros deberán ser hechos para reemplazar los álabes de tal forma que no vayan a ser re-utilizados después.

C.2.- Evaluación de Superficie:

C.2.1.- Secciones metalográficas a través de la superficie del álabe deberán ser examinadas tanto en la base como en la parte media y superior, las esquinas, los límites (dimensionales), y cualquier otra área que pudiera aparecer tener daño en la superficie serán examinadas, también superficies internas de las partes frías en adición a las partes externas.

C.2.2.- En los álabes sin protección deberán ser medidos en su ambiente, su total profundidad de ataque y esto incluye lo siguiente:

C.2.2.1.- Medición de profundidad de cualquier película de óxido.

C.2.2.2.- Medición de la profundidad de la oxidación interna.

C.2.2.3.- Determinación de la profundidad de la aleación consignada.

C.2.3.- Los álabes sin recubrimiento podrán ser considerados reusables si la profundidad total de ataque presentada no rebasa más de 0.002". Alabes con mediciones mayores d 0.002" podrán también ser puestos en servicio, si el daño puede ser removido dentro de las tolerancias de especificación del fabricante. Para mejorar su comportamiento el uso de recubrimientos podrá ser considerado en tales casos.

C.2.4.- En álabes con recubrimiento al permanecer su espesor límite, excluyendo cualquier difusión de película, podrán ser comparados con las mejores y peores secciones del álabe. El espesor original de recubrimiento podrá ser estimado basado en el espesor remanente con el área mejor y la profundidad de ataque será juzgada por el espesor remanente en las áreas peores.

C.2.5.- La vida de recubrimiento será considerada terminada, si ésta es menor de 1/3 del espesor del recubrimiento original que permanece en sus condiciones originales. Tales álabes podrán ser reutilizados mediante una reaplicación de recubrimiento protector. Si ocurriese que haya sido atacado el metal base del álabe, las áreas dañadas podrán ser reacondicionadas dentro

de los límites permisibles del fabricante, (previa anuencia del él). Los álabes con ataques profundos que sobrepasan los límites dados por el fabricante son irreparables.

C.2.6.- Permaneciendo la vida del recubrimiento con más de $1/3$ del espesor de recubrimiento original, la permanencia puede hacerse estimando ahora en $1/2$ del recubrimiento original p. ej.: coberturas con espesor de $1/3$ del original tiene $1/2$ más de su vida terminal.

C.3.- Evaluación microestructural:

C.3.1.- Secciones de la parte de la base de la media y de la parte superior de la tobera (airfoil), y de la sección de la raíz del álabe de uno u otro lugar lo cuál pueden aparecer visualmente que han sido sometidas en alta temperatura, deberán ser preparadas para un exámen metalográfico. Las obtenciones de las secciones deberán estar orientadas en una dirección paralela al eje de esfuerzos.

C.3.2.- Todas las muestras serán examinadas con microscopio óptico para detectar la presencia de invalidez por creep (creep voids).

C.3.3.- Cualquier álabe identificado con creep voids queda inservible. Estos pueden ser reparados mediante prensas isostáticas en caliente para su rejuvenecimiento.

C.3.4.- Todas las muestras con inestabilidad microestructural deberán ser examinadas por microscopía óptica. Los cambios de una microestructura de un material nuevo pueden ser identificados por comparación con las muestras de las toberas (airfoil) con aquellos desde la raíz. En particular la presencia de fases frágiles, con granos circundados por carburos alojados en una gama prima, (γ') deberán notarse si son visibles, .

C.3.5.- La microestructura de la fase gama prima (γ') deberá se examinada mediante la técnica del microscopio electrónico. Las muestras serán

preparadas en cuatro pasos (por lo general la parte media, ó la superior) y de la raíz en las áreas dónde muestran la más severa inestabilidad. El diámetro de las partículas será medido para determinar el incremento de crecimiento de la partícula que ha ocurrido. En aleaciones con microestructura de gama prima (γ') duplex, la ausencia de partículas de gama prima (γ') fina y secundaria será notada si están presentes en la aglomeración de partículas primarias.

C.3.6.- Generalmente el análisis microestructural no está a la mano como un solo método para identificar la disposición al servicio. Normalmente los resultados son utilizados para aclarar los resultados de las pruebas mecánicas; p.ej.: la degradación microestructural importante combinada con bajos valores de propiedades en presencia de creep y con ausencia de degradación, indica esfuerzos altos, más daño por baja temperatura.

D. PRUEBAS DE CREEP

D.1.- Varias técnicas indicatorias podrán ser utilizadas para la evaluación de el daño remanente por la vida de creep. La más socorrida depende de la disponibilidad de información apropiada (datos). En la actualidad dos técnicas son utilizadas ampliamente.

D.1.2.- Pruebas de Calificación - Los álabes son probados usando las mismas técnicas utilizadas anteriormente para calificar los lotes de material nuevo. Esta técnica es ampliamente usada si muy pocos datos de respaldo son necesarios, sin embargo está limitada por proveer de indicadores de "pasa / no pasa" de indicación de servicio más que de estimación de vida remanente.

D.1.3.- Regla de la fracción de vida - La vida remanente está determinada por la comparación de propiedades de esfuerzos de ruptura de materiales nuevos con aquellos obtenidos ya después de la exposición al servicio.

D.2.- Las muestras serán desprendidas de la tobera del álabe con vida con sección limitada de creep, como se determinaron los esfuerzos y temperaturas

del perfil álabe. La orientación de las muestras deberá ser paralela al eje de esfuerzos. Las muestras también deberán ser obtenidas de la raíz que más fría esté de tal forma que el material original pueda ser probado para propósitos comparacionales.

D.3.- Las muestras probadas serán las afectadas por creep o esfuerzos de ruptura, con las técnicas apropiadas de vida por creep. Las pruebas serán de acuerdo a la especificación ASTM E139-83. Con un mínimo de dos muestras que deberán ser probadas y obtenidas de la tobera (airfoil) y al menos una de la base.

D.4.- Las pruebas de esfuerzos y temperatura serán seleccionadas con base al tipo de análisis a ser ejecutado.

D.4.1.- Calificación de las pruebas - Serán utilizados los mismos parámetros que para calificar álabes nuevos.

D.4.2.- Regla de la fracción de vida - Será utilizado una estimación conservadora de alto esfuerzo en el servicio más que de servicio por temperatura.

D.5.- El servicio y la vida remanente son valoradas en forma diferente dependiendo de la metodología utilizada.

D.5.1.- Calificación de las pruebas - En las muestras que fallen al encontrar mínimo esfuerzo de vida ruptura en el nuevo material, son consideradas inservibles y deberán ser retiradas ó reacondicionadas mediante un prensado isostático en caliente y/o por tratamiento térmico. Alabes que sean regresados del servicio deberán ser re-examinados después de efectuar la valoración siguiente: $(0.2 - 0.3) X$ de vida de diseño del álabe.

D.5.2.- Regla de la fracción de vida - La vida remanente es calculada de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$t_s / T_s + t_t / T_t = 1 \dots\dots\dots(3)$$

donde:

t_s = tiempo en servicio

t_t = tiempo de ruptura (prueba acelerada)

T_s = tiempo de ruptura (condición de servicio)

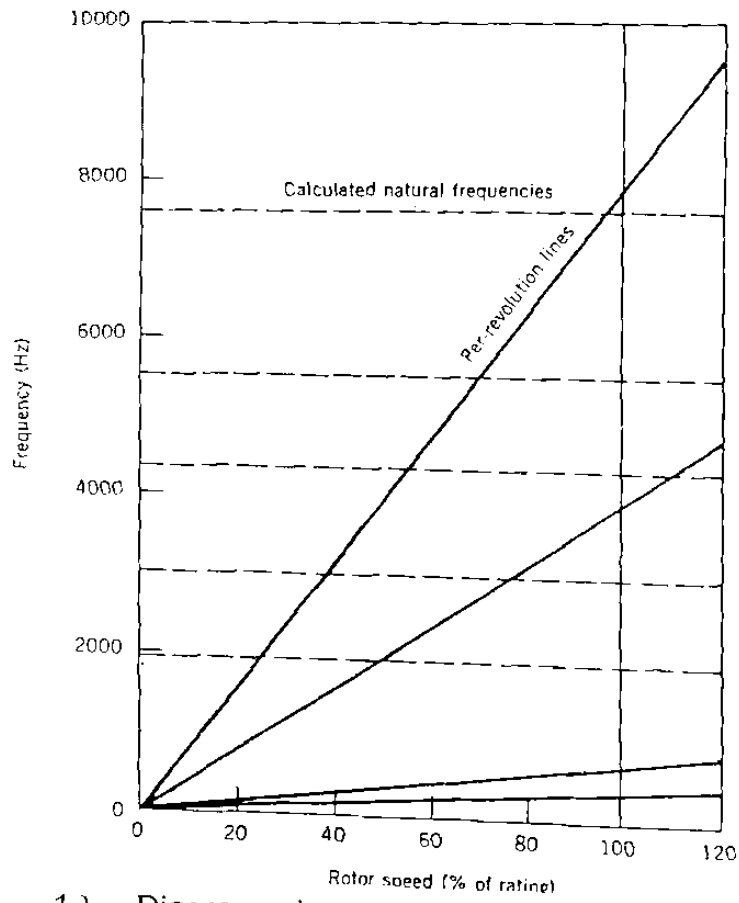
T_t = tiempo de ruptura del material virgen en condición de prueba acelerada.

Los álabes deberán ser retirados para ser reacondicionados con la Prensa Isostática en caliente (Hot Isostatic Pressing, HIP), y /o tratados térmicamente para una 2da. vida, si, $t_s/T_s > 0.6$. Los álabes que son regresados al servicio son re-examinados después de la mitad de su vida remanente estimada ó de la mitad de su vida de diseño y se escoge la que tenga el intervalo más corto.

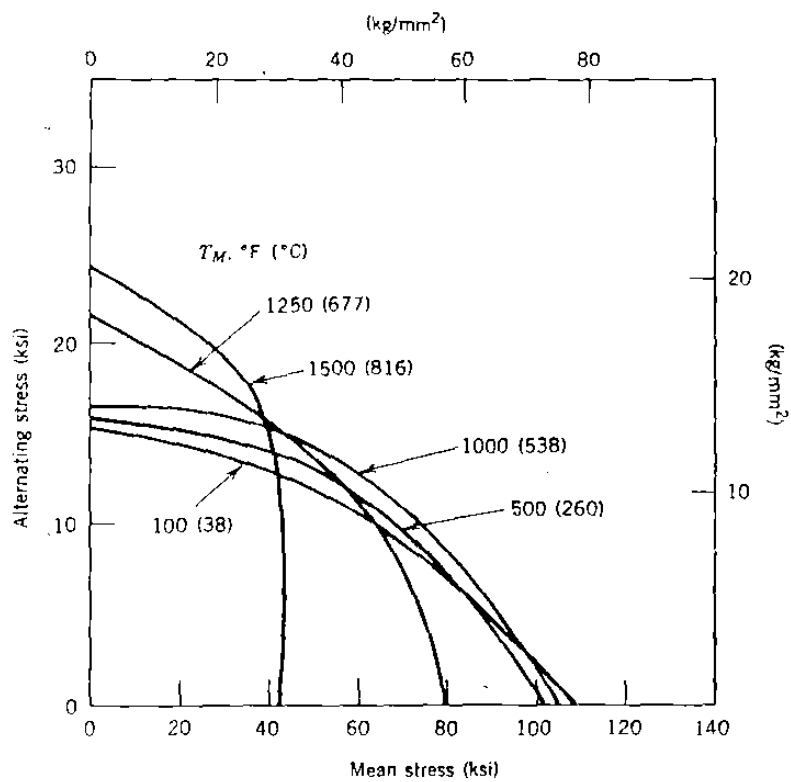
E. OTRAS PRUEBAS MECANICAS.

En algunos casos se corren otras pruebas mecánicas, p. ej.: álabes que tienen tendencia a serios problemas de fragilidad deberán ser realizadas pruebas de impacto y de tensión de acuerdo a especificación de normas.

GRAFICAS
Y TABLAS.



1.) Diagrama de Campell de un alabe de turbina.



- 2.) Diagrama típico de Goodman,
para un álabe de aleación base níquel con 10^9 ciclos.

=====

Tabla XII.

=====

Algunas aleaciones representativas empleadas en la manufactura de álabes.

Características:

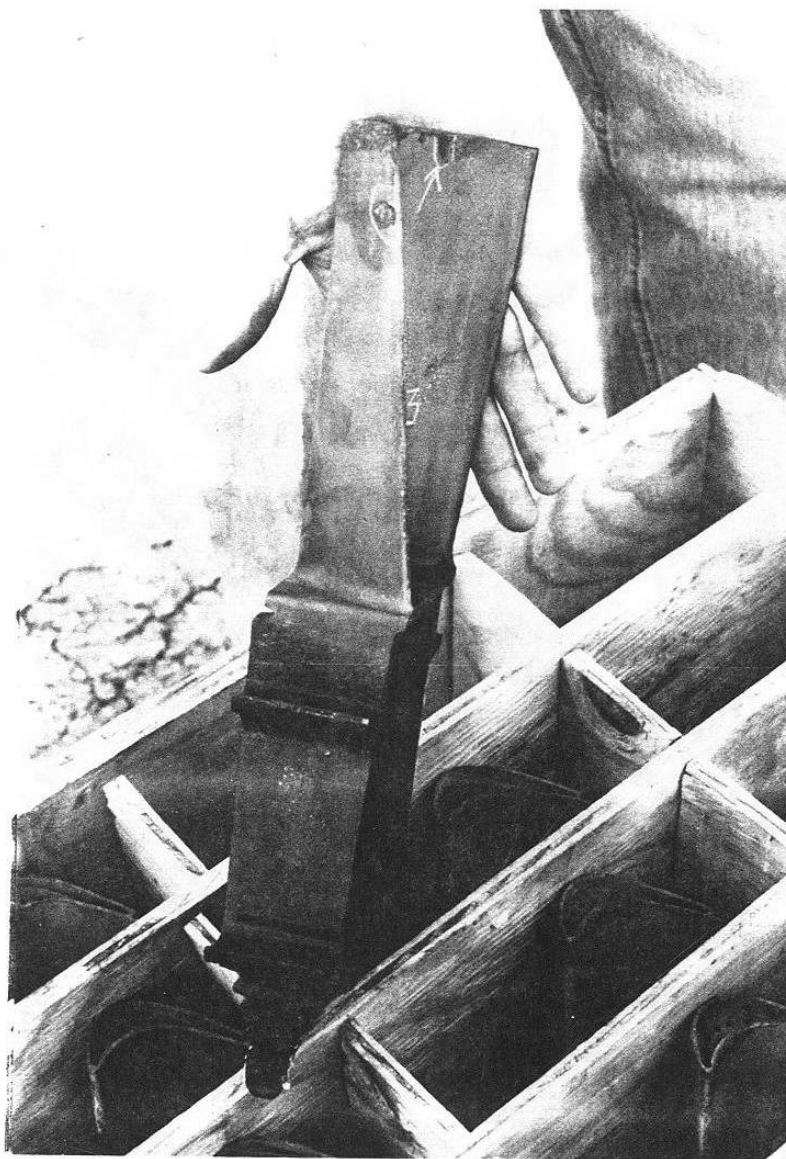
1. Nimonic 75 : resistencia mecánica, a la temperatura y a la oxidación
2. Nimonic 118 : resistencia mecánica, temperatura no < 900°C y oxidación.
3. Hastelloy B : resistencia mecánica aceptable, temperatura no>1100°C y oxidación.
4. Hastelloy X : resistencia mecánica buena, temperatura no>1100°C y oxidación.
5. Multimet : resistencia mecánica, oxidación, temperatura no>1100°C y económica.
6. Haynes 600 : resistencia a la abrasión, temperatura no>1100°C y oxidación.
7. Haynes 570 : resistencia a la abrasión, temperatura no >1090°C y oxidación
8. Inconel 939 : resistencia mecánica aceptable, temperatura alta y oxidación.
9. Inconel 738LC : resistencia mecánica mejor, temperatura no > IN939 y < oxidación.

	Ni	Cr	Mo	Co	C	Fe	W	Ti	Al	Ta	Mn	Si	Cu	Otros
1	30	20	-----	-----	0.1	resto	----	1.8	0.4	----	-----	----	----	----
2	resto	15	3.5	14.9	0.16	0.7	----	3.85	4.8	----	0.5	0.4	0.2	0.06
3	resto	-----	28	20	0.05	5	0.6	----	----	----	----	----	----	----
4	resto	22	9	20	0.1	19	2.5	----	----	1	----	----	----	----
5	20	21	3	-----	0.1	resto	----	----	----	----	----	----	----	0.15
6	resto	16	-----	20	0.08	8	3	----	----	1	----	----	----	----
7	20	22	3	12	0.1	resto	----	----	----	----	----	----	----	0.02
8	resto	22.5	5	19	0.2	1	----	1.2	4.5	----	----	----	----	----
9	resto	16	5	-----	0.2	1	----	1.2	4.5	----	----	----	----	----

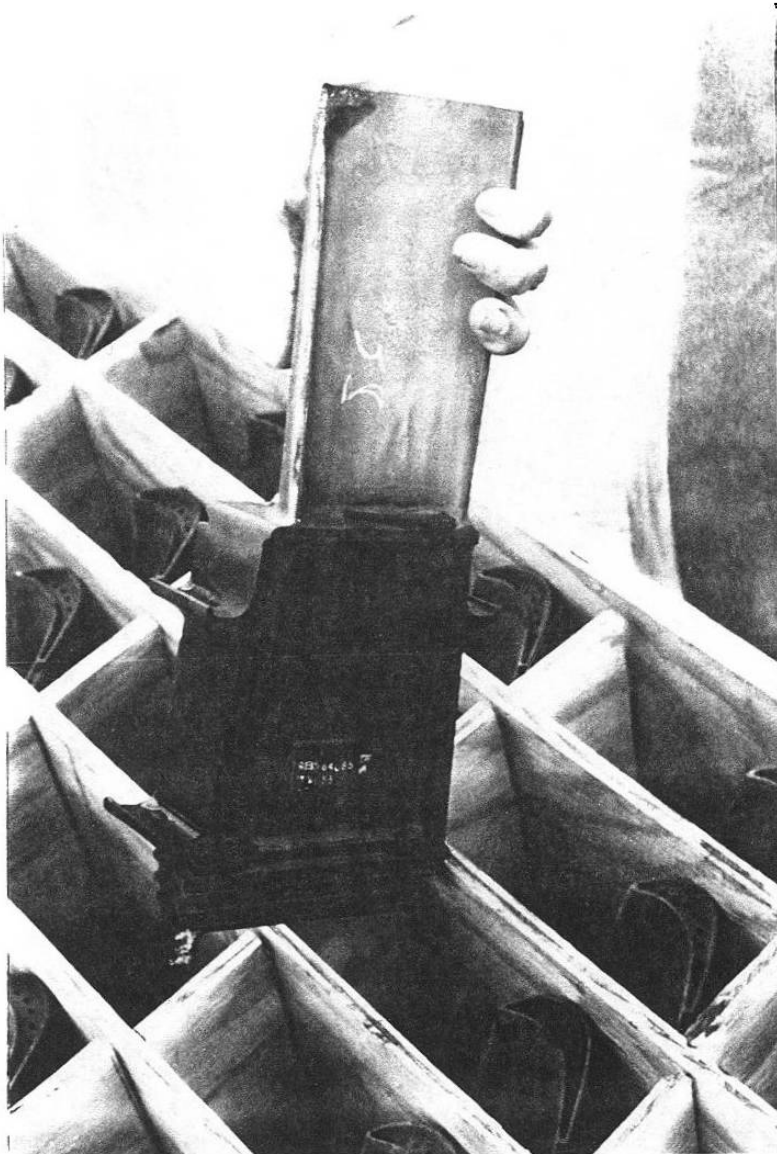
2. FOTOGRAFIAS DE ALABES



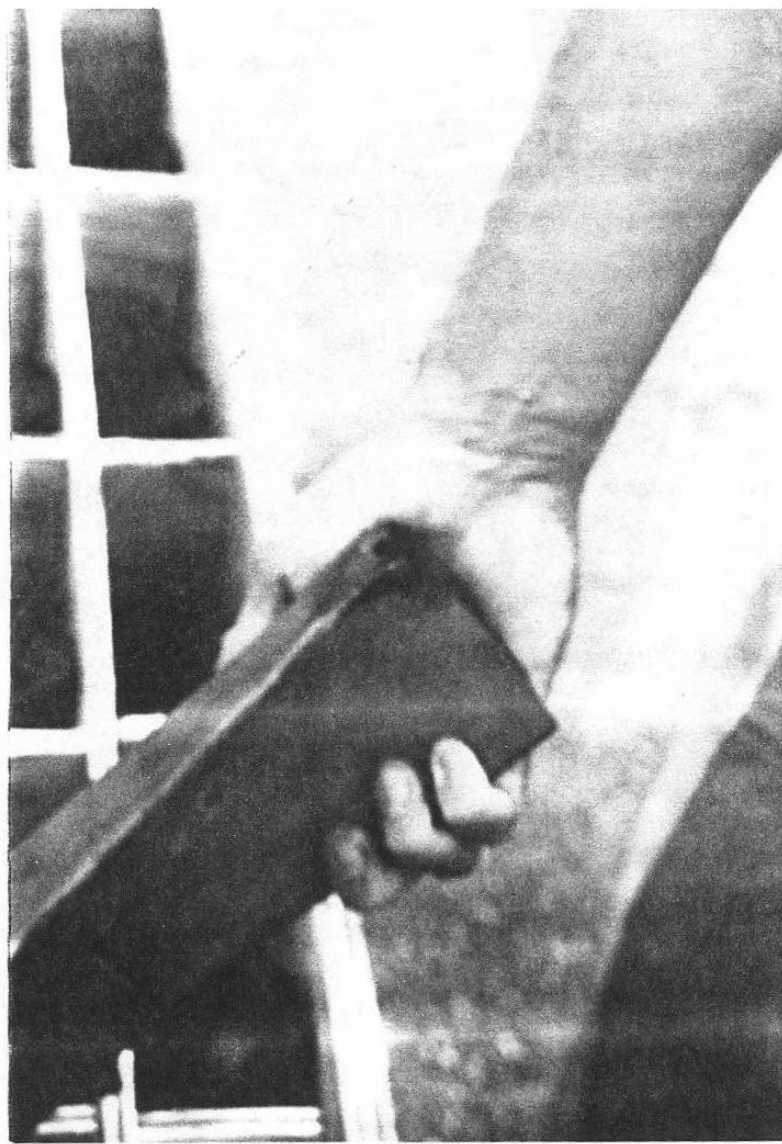
- 1.) Alabe de impulso 1er. paso turbina, detalle de sujeción (raíz), y pequeñas perforaciones de enfriamiento en el perfil.



- 2.) Alabe de impulso 1er. paso turbina, vista de perfil, notándose la torsión desde la parte inferior del cuerpo.



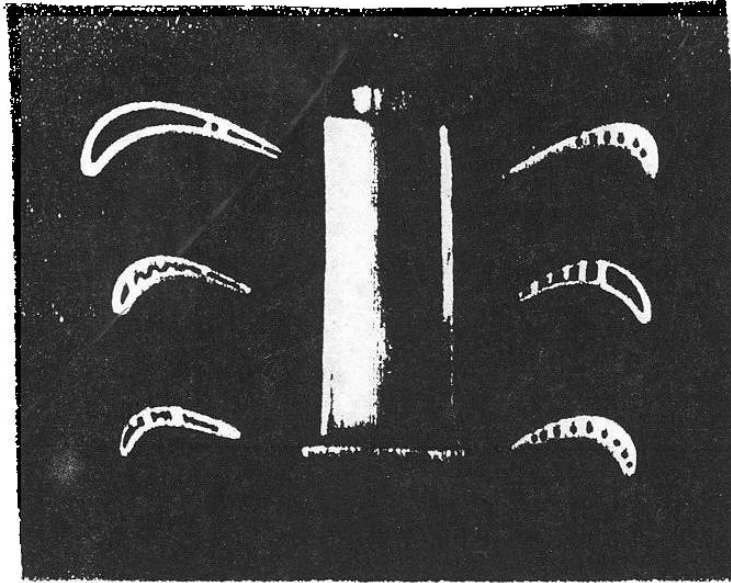
- 3.) Alabe de impulso 1er. paso turbina
con desprendimiento en esquina
superior, (posible golpe).



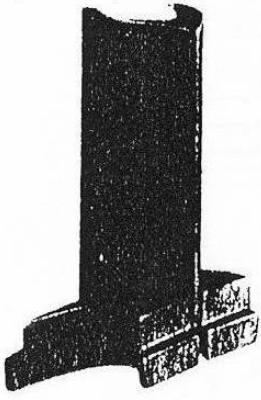
4.) Mismo álabe con otra vista del daño .



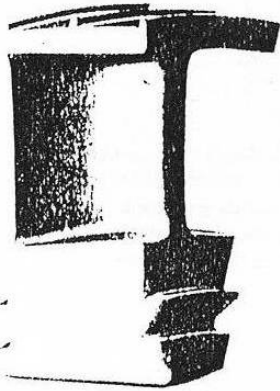
5.) Alabe largo del paso 20vo.
vistas de perfil y de frente



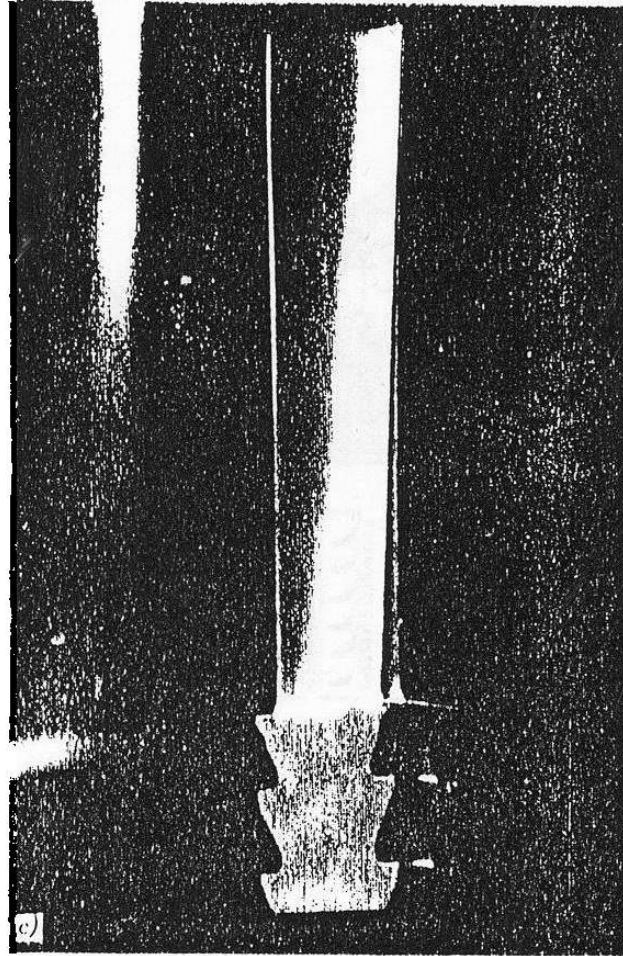
- 6.) Muestra del complejo proceso de fundición requerido para hacer efectivo el enfriamiento con diferentes formas y tamaños



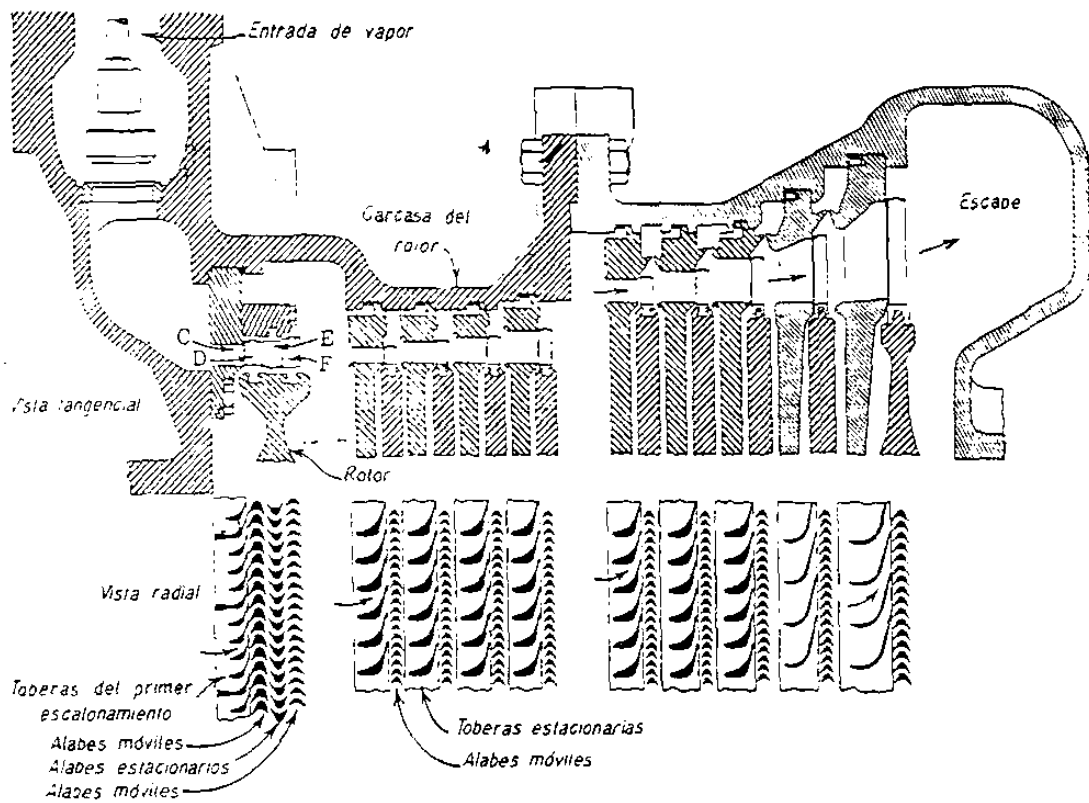
120 0 32 1



122 0 1 1



- 7.) Tres tipos de álabes de turbina con sistemas de fijación diferentes en la raíz.



8.) Diagrama de turbina con 10 ruedas con sus respectivos álabes.

GLOSARIO DE TERMINOS.

Abrasivo:

Proceso de frotar, esmerilar o gastar por fricción.

Airfoil:

Superficie de sustentación, plano aerodinámico del álabe.

AISI:

Siglas del Instituto Americano del Hierro y del Acero, (American Iron Steel Institute), sistema de clasificación para los aceros.

Alabe:

Es la parte metálica resistente, con forma como de paleta o cucharón, que transmite la fuerza de empuje del fluido compresible a través del eje sobre los cuales esta montado.

Alabes Refrigerados:

Son aquellos álabes perforados con la intención de disminuir su temperatura de trabajo; las perforaciones estan hechas en su sección recta y a lo largo de todo el álabe, con diferentes formas y tamaños para que pase por ahí el fluido enfriador.

Cedencia:

Es una propiedad del material utilizada como base para determinar el 1er. esfuerzo, generalmente menor que el máximo esfuerzo que se puede obtener, y en el que ocurre un incremento de deformación sin aumento de esfuerzo. Solo ciertos metales exhiben un punto de cedencia. Si hay un decremento del esfuerzo después de la cedencia, se puede establecer la diferencia entre los puntos superior e inferior de cedencia.

Cedencia (resistencia a la)

Esfuerzo en el que un material generalmente exhibe desviación específica de la proporcionalidad existente entre el esfuerzo y la deformación; en muchos metales se utiliza una compensación del 2 %.

Compresión:

Es el efecto resultante de aplastamiento entre una carga aplicada y el cambio de su forma inicial, que generalmente es creciendo hacia los lados.

Corrosión:

Deteriorización de un metal mediante reacción química o electroquímica con su ambiente.

-- Electroquímica; corrosión que ocurre cuando la corriente fluye entre áreas catódicas y anódicas en superficies metálicas

Creep:

Es la característica que dá al material un comportamiento de fluencia serpeante bajo la acción de una carga en el tiempo, aunque el esfuerzo que lo causó haya cedido, perdiendo sus propiedades mecánicas lenta pero inexorablemente.

Elementos Finitos:

Herramienta técnica de análisis, que mediante un mapeo en forma de nodal sobre los álabes, se puede determinar y visualizar los diferentes esfuerzos a que se ve sometido y hacer suposiciones de esfuerzos adicionales.

Endurancia:

Concepto que involucra la resistencia a la fatiga de un material.

Erosión:

Proceso de disminución de las especificaciones originales de una superficie por un medio friccionante constante.

Entalpia:

La energía calorífica, en kcal, necesaria para convertir 1 kg. de agua en vapor seco a la misma temperatura y presión.

Fatiga:

Es el concepto que involucra a un material cuando éste está sujeto a cargas que se aplican y se retiran repetidamente (cíclicas).

Fatiga Térmica:

Alabes sujetos a calentamientos y enfriamientos bruscos en forma cíclica.

Flexión:

Es la deformación que se produce al aplicar una carga, pero sin sobrepasar su límite elástico.

Galga:

Calibrador de formas y dimensionamiento utilizado para verificar la curvatura y forma

Oxidación:

Se presenta oxidación cuando una sustancia se combina con el oxígeno; la reducción sucede cuando se retira el oxígeno de la sustancia. En forma más general se dice que ocurre oxidación de un elemento cuando hay aumento en su estado de valencia, el elemento implicado por lo general es un metal.

Superaleación:

Aleación compuesta de elementos de diferentes y de altos contenidos en Cromo, Niquel, Cobalto, y pequeñas cantidades de elementos refractarios con objeto de poder soportar altos esfuerzos y altas temperaturas; podemos decir también que es una aleación desarrollada para el servicio a muy alta temperatura en la que se encuentran esfuerzos relativamente altos, y que frecuentemente se requiere resistencia a la oxidación .

Tensión:

Es el efecto deformante (alargamiento y disminución de su sección de área), sufrido en una pieza de material al aplicar cargas en extremos con incremento constante en un determinado tiempo.

Torsión:

Acción de torcimiento que resulta en deformación, y que es posible provocar un esfuerzo de corte.

Turbina:

Es una implementación motora capaz de convertir la energía termodinámica en trabajo útil sobre un eje.

