

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**SECCION DE POST - GRADO**



**INVESTIGACION DE LOS PROCESOS DE FRICCION Y DESGASTE DEL MATERIAL DE LOS SEGMENTOS DEL ESTATOR DE LA TURBINA DEL MOTOR PT-6 EN EL PERIODO DE OPERACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LOS SEGMENTOS POR EL METODO DE ASPERSION POR DETONACIÓN.**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN**

**INGENIERO AERONAUTICA**

**CON MENCIÓN EN: MOTORES DE TURBINAS A GAS**

**PRESENTADO POR**

**WALTER RABINES CUTTIN**

**LIMA-PERU**

**2000**

# INDICE

## INTRODUCCIÓN

### CAPITULO I

#### PANORAMA BIBLIOGRAFICO

1.1	Influencia del Juego Radial sobre los Parámetros de la Turbina Axial de un MTG.....	4
1.2	Principales Métodos de Sellamiento de los Juegos Radiales en el ducto de la Turbina Axial del MTG.....	8
1.3	Materiales utilizados para el sellamiento radial de la Turbina del MTG y Métodos para su Aplicación.....	9

### CAPITULO II

#### INVESTIGACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL DEL SECTOR ESTATÓRICO DE LA 1era ETAPA DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A DURANTE EXPLOTACIÓN

2.1	Construcción general del Motor PT6A.....	14
2.2	Construcción de la Turbina del Motor PT6A.....	18
2.3	Trabajo de la Turbina.....	21
2.4	Determinación del tipo principal de desgastamiento del Material del Segmento Sellante de la Turbina del Motor PT6A en el proceso de operación.....	23

## CAPITULO III

### DESARROLLO DEL PROCESO TECNOLOGICO DE REPARACION DE LOS SEGMENTOS DEL ESTATOR DE LA TURBINA DEL MOTOR PT-6A POR EL METODO DE ASPERSION POR DETONACION

3.1	Aplicación de Recubrimientos Metálicos por medio del Metalizado por Rociado.....	35
3.1.1	Preparación Preliminar de las partes para el metalizado por Rociado.....	36
3.1.2	Proceso de Metalizado por Rociado.....	38
3.1.3	Tratamiento Superficial posterior al Metalizado.....	41
3.2	Formación de los Recubrimientos Metalizados por Rociado y su adherencia.....	42
3.3	Principales Métodos de Metalizados por Rociado.....	44
3.3.1	Metalizado por Flama de Gas.....	44
3.3.2	Metalizado por Corriente Eléctrica.....	47
3.4	Fundamentación de la Elección del Material para la Recuperación de las superficies desgastadas de los Segmentos.....	49
3.5	Métodos de Precipitación del Metal Ni sobre las Partículas de Grafito.....	54
3.6	Descripción Técnica del Equipo de Detonación.....	56
3.7	Proceso Tecnológico de Recuperación de la Capa Sellante del Material del Segmento del Estator de la Turbina del Motor PT6A.....	74

## CAPITULO IV

### INVESTIGACION DE LAS PROPIEDADES FISICO - MECANICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS COMPUESTOS.

4.1	Formación de los Recubrimientos.....	92
4.2	Construcción y Estructura de los Recubrimientos.....	93
4.3	Resistencia de Adhesión.....	106
4.4	Características comparativas de la Resistencia al Desgaste de los Recubrimientos Sellantes Compuestos respecto al Material de los Segmentos de la Turbina PT6A.....	110
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>110</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>113</b>
	<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>115</b>

## INTRODUCCION

La Aeronáutica es hoy en día una de las actividades de mayor adelanto tecnológico en el mundo, debido principalmente a que constituye el medio más rápido de transporte de personas y material diverso. El ambiente donde se desarrolla normalmente no se limita solamente a la actividad Civil comercial sino también a la actividad Militar, creciendo de la mano con el vertiginoso avance de la tecnología aeronáutica, que en los últimos años ha conducido al desarrollo de aviones sofisticados de alta performance.

En tal sentido, surge la imperiosa necesidad de contar con unidades aéreas confiables y seguras, que permitan cumplir a cabalidad la tarea encargada, todo esto se conseguirá siempre y cuando se adopten acciones como: Rigurosos estándares de diseño, correcta elección de materiales de fabricación, cumplimiento estricto del plan de mantenimiento, adecuada operación del mantenedor y del usuario, aplicación oportuna de boletines de mejoras tecnológicas, adecuado registro de operación etc. Esto redundarán en: La extensión del tiempo vida útil de la máquina, Disponibilidad inmediata de unidades, Soporte logístico acertado, Actualización de tecnología, Seguridad de vuelo de la aeronave, Confiabilidad del piloto, Imagen Institucional, Rentabilidad económica etc.

La implementación de motores de turbina a gas en las aeronaves modernas, tiene gran auge en razón de sus conocidas ventajas constructivas y elevado relación potencia peso frente a otros tipos de motores. Además cabe mencionar que esta máquina térmica tiene aplicación a la Industria Naval, petrolera, Energética e Hidráulica.

El sistema que conforma el motor TAG tiene un complejo ordenamiento de componentes (eléctricos, mecánicos, hidráulicos, y neumáticos); siendo motivo del presente trabajo de investigación: El sello radial de la Turbina.

La turbina es el elemento donde se convierte la energía térmica de la cámara de combustión en energía cinética de movimiento, consiguiéndose autosustentación del motor, al mismo tiempo que se genera la potencia de impulsión de la aeronave.

Dada las condiciones a las que son sometidas las piezas fijas y móviles de esta parte del motor es comprensible entender que una de los principales situaciones que se tiene que lidiar es el constante desgaste que sufren los anillos de segmentos del estator de la turbina, responsables solidariamente con los punteros de álabe del rotor; de mantener un determinado margen de luz radial en esta etapa de expansión del gas impulsor y por lo tanto conservar la performance del diseño de la turbina.

En la actualidad, el programa de mantenimiento indica que cuando uno de estos elementos se encuentra fuera de tolerancia se deben de renovar las piezas por nuevos en todo el disco de la turbina.

Este procedimiento se traduce en período de altos costos de reposición de piezas de recambio, inutilización de la máquina por reparación, control de nuevos estándares de luces radiales; la estadística de fallas demuestra que el defecto de este causal se da con mayor incidencia entre las 1000 y 1500 horas de operación, situación que se detectó por anomalías, ruidos, alta temperatura, baja potencia etc.

Durante el período de operación del motor TAG se puede apreciar que dichos inconvenientes anteriormente mencionados son productos de situaciones incontrolables e irreversibles, esto se puede reducir con tratamiento especial de recuperación de material, utilizando técnicas modernas de soldadura, seleccionando el ó los materiales intervinientes en el proceso de rectificación de piezas, con instrumentación acorde a la tecnología de la época, equipamiento que garantiza la satisfacción en el mantenimiento, explotación, (período de operación), y recurso horario del motor de la aeronave; pero principalmente reducirá notablemente el tiempo de reposición, disponibilidad de aeronave y por sobre todo menores costos de reparación, sin necesidad de estar supeditado a confección de piezas a cargo del fabricante.

# CAPITULO

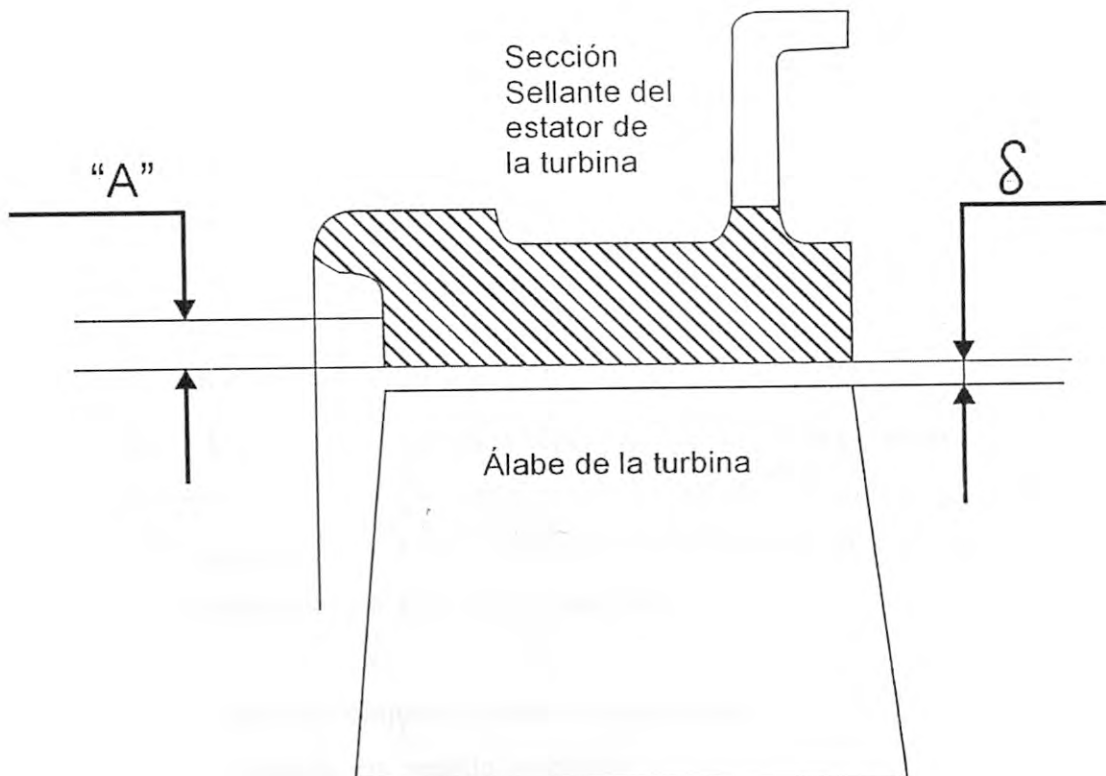
## I

## PANORAMA BIBLIOGRAFICO

### 1.1 INFLUENCIA DEL JUEGO RADIAL SOBRE LOS PARAMETROS DE LA TURBINA AXIAL DE UN MTG

El desgastamiento de los materiales sellantes de los estatores de la turbina provoca el aumento del juego radial entre el extremo de los álabes del rotor de la turbina y el material sellante.

Se sabe que los parámetros de la turbina axial (la potencia, el gasto de los gases, el rendimiento) en gran medida dependen de la magnitud del juego radial.



**Fig. 1** Esquema del juego radial entre los álabes del rotor de la turbina y los segmentos del estator de la turbina PT6A



Los juegos radiales entre los extremos de los álabes del rotor de la turbina y los sectores sellantes del estator constructivamente se hacen de diferente manera para cada tipo de turbina.

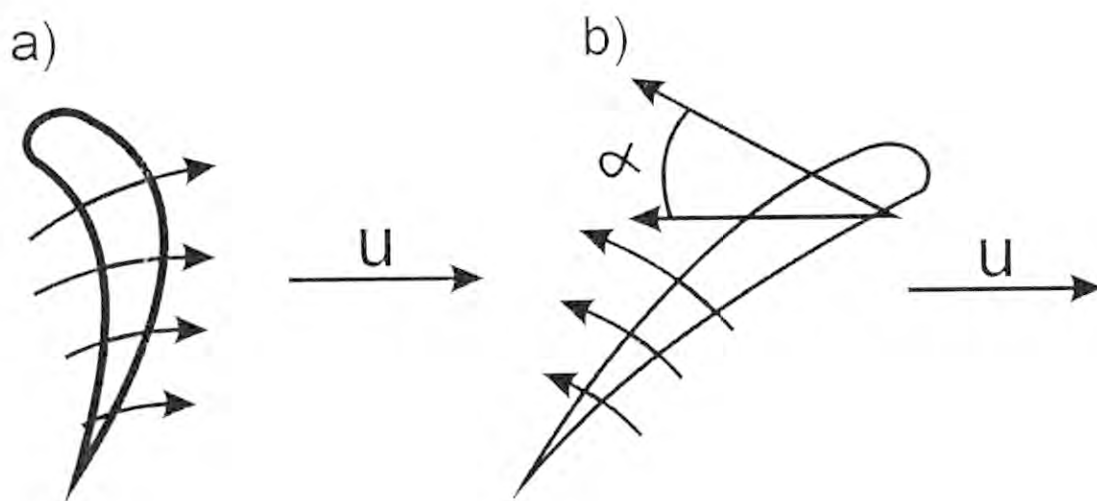
La determinación mediante cálculos de la magnitud del juego radial es muy complicado, por esta razón éste se establece en el proceso de puesta a punto del motor y su valor es del orden de 0,2 a 1,6 % de la altura del álabe.

La presencia del juego radial provoca la fuga (derrame) del gas de la región de la presión aumentada a la región de depresión. Durante este proceso, los fenómenos que se producen en la etapa del compresor van a ser diferentes de los fenómenos que se suceden en la etapa de la turbina.

En la etapa de turbina el componente tangencial  $\omega u$  de esta velocidad es igual a  $\omega \cos \alpha$  coincide con la velocidad tangencial de los extremos de los álabes en dirección (Fig. 2 a). La presencia de una pared fija y de la capa límite cerca al extremo del álabe ejerce una reacción de frenado, ósea disminuye la velocidad del derrame del gas de la región de la presión incrementada a la región de presión reducida.

Sin embargo, esto es correcto, bajo la condición de que conserve constante el juego radial dado. Cuando aumenta el juego radial en el proceso de operación se influye negativamente sobre los parámetros de la turbina, es decir disminuye el empuje, el rendimiento y el gasto de gas aumenta.

En la etapa del compresor axial el componente tangencial de la velocidad relativa, está dirigida en sentido contrario a la velocidad tangencial de los extremos de los álabes. Aquí la presencia de la pared fija y de la capa límite pegada a ésta, aumenta la velocidad relativa de las partículas en el juego. (fig.2b)



**Fig. 2 Fuga (derrame) de los flujos de gases y de aire por los extremos de los álabes de las etapas de la turbina y compresor**

Las investigaciones de la influencia del juego radial sobre los parámetros de la turbina axial han demostrado que la región del funcionamiento estable de la etapa de la turbina axial crece en dirección de los pequeños gastos de los gases cuando disminuye la magnitud del juego radial.

Los datos experimentales obtenidos por los científicos rusos con ciertos datos de cálculo, establecieron que la mayor influencia sobre los parámetros de la turbina axial ejerce la magnitud relativa del juego radial.  $\delta$

$$\delta = \frac{\delta}{L} * 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Donde:  $\delta$  – Es el juego radial en mm.

L– es la altura del álabe en mm.

Además los múltiples experimentos demuestran que el aumento del juego radial relativo en 1% provoca una caída de rendimiento de la turbina entre 2 y 3% y esto influye sobre el impulso específico del motor.

Para el MTG la influencia relativa del rendimiento de la turbina sobre el impulso específico del motor se puede analizar de la siguiente fórmula:

$$R_{gg} = \frac{\varphi_{p.c}}{g} \sqrt{2g \left\{ \frac{C_{pmr} \cdot T_3^*}{A} \left[ 1 - \frac{1}{\left( \pi_{kc}^* \lambda_{kc}^* \pi_k^* \right)^{k-1}} \right] - \frac{1}{\eta_k^* \cdot \eta_T^*} \cdot \frac{k}{(k-1)} \cdot R T_1^* \left( \pi_k^{*k} - 1 \right) \right\} - \frac{v}{g}} \dots \dots (2)$$

- Donde:
- $\varphi_{p.c}$  Es el coeficiente de la velocidad en la tobera reactiva
  - $\lambda_{kc}^*$  Es el factor de recuperación de la presión total en la cámara de combustión.
  - $\pi_{kc}^*$  Es la relación de compresión dinámica en el conducto de entrada del motor.
  - $\pi_k^*$  Es la relación de compresión del aire en el compresor
  - $T_3^*$  Es la temperatura del gas en la entrada de la turbina en parámetros estancados.
  - $T_1^*$  Es la temperatura del aire en la entrada de la turbina de parámetros estancados.
  - $\eta_k^*$  Es el rendimiento del compresor.
  - $\eta_T^*$  Es el rendimiento de la turbina.

De esta manera el impulso específico del MTG crece con el aumento del rendimiento de la turbina y viceversa, cae con la disminución del rendimiento de la turbina.

Para mantener constante el rendimiento de la turbina en el proceso de operación del MTG se necesita mantener **constante** el juego radial relativo  $\delta$ .

## **1.2 PRINCIPALES METODOS DE SELLAMIENTO DE LOS JUEGOS RADIALES EN EL DUCTO DE LA TURBINA AXIAL DEL MTG.**

Del análisis realizado de la influencia del desgastamiento del material sellante sobre los parámetros de la turbina axial y sobre la potencia específica del MTG, se deduce la necesidad de garantizar el mínimo juego radial posible durante el diseño, fabricación y operación de la turbina.

Disminuir el juego radial se puede realizar mediante tres métodos:

- Con el aumento de la exactitud de la fabricación de los conjuntos individual y del armado de todo el MTG.
- Con la colocación de plataformas sellantes en los extremos y en los vértices de las piezas giratorias.
- Con la colocación de los injertos metalo-cerámicos o con la aplicación de los materiales sellantes especiales.

El sello de los juegos radiales en el ducto de la turbina del MTG en diferentes países se resuelve de diferente manera.

En RUSIA el sellamiento radial de las turbinas se efectúa:

- Con la colocación de plataformas sellantes.
- Con la colocación de sellos radiales que en su construcción tienen rellenos especiales.

## - MATERIALES SOBRE LA BASE DE VIDRIO

Los materiales en base a vidrio se utilizan hasta unas temperaturas de 600 ° C.

El recubrimiento de grafito – talco esta compuesto de vidrio líquido – 45%, talco – 17%, grafito coloidal – 5 %, carbono – grafito – 25%, el espesor total de la capa aplicada es entre 1,5 y 2,3 mm.

El posterior desarrollo de los materiales sellantes aplicables a la turbina se encaminó en reemplazo de los rellenos por unos más resistentes a las altas temperaturas.

Así en Rusia se obtuvo el material (YM – 67 – 34) que están compuestos por:

- Vidrio líquido	61,30%
- Nitruro de Boro	20%
- Polvo de Aluminio	2,1%
- Talco	8,73%
- Sodio Silico Fluoroso	6,8%

Con la finalidad de aumentar la antifriccionabilidad a este material se le ha añadido grafito hasta 10%.

## - MATERIALES SOBRE LA BASE DE ALUMINIO

El empleo de los metales en calidad de esqueleto permite aumentar la resistencia portante y a la erosión de los materiales sellantes de las turbinas.

En este material, el níquel es el esqueleto portante y el nitruro de boro y el talco- es el relleno. El material se fabrica en forma de vasillas y se aplica a los anillos de trabajo con el método de aspersión por llama de gas o por método de plasma.

## - **MATERIALES SOBRE LA BASE DE POLVO**

El método de la metalurgia en polvo halló un empleo considerable para la fabricación de materiales que trabajan en diferentes conjuntos de las máquinas y de los mecanismos, incluyendo en los conjuntos sellantes de las turbinas.

El método de la metalurgia en polvo consiste en que los materiales en polvo anteriormente elegidos en combinación con lubricantes sólidos (grafito, nitruro de boro, bisulfuro de modibdeno y otros) se prensan en moldes especiales y luego pasan a hornos especiales.

Así para los sellamientos radiales de las turbinas fueron desarrollados injertos metalo - cerámicos en diferentes bases metálicas y con diferentes lubricantes sólidos. Los injertos metalo – cerámicos de forma rectangular, en los lados tienen cortes tipo “cola de milano”. Estos injertos se juntan en anillos de trabajo del estator de la turbina que tienen la forma correspondiente para el injerto.

Las investigaciones múltiples a nivel mundial han demostrado que los rellenos de los materiales sellantes de las turbinas del MTG fabricados con el método mecánico de la mezcla de los componentes iniciales de la carga y aplicados con el método de aspersión térmica están expuestos a la oxidación volumétrica, lo que condiciona una resistencia no satisfactoria al desgaste, a las altas temperaturas y a la erosión.

Además, la resistencia de adhesión de estos materiales sellantes con el material de la base no satisfacen completamente las condiciones de operación.

Como resultado del análisis realizado del panorama bibliográfico es conveniente el planteamiento de las siguientes tareas de investigación:

1. La investigación de los procesos de fricción y de desgastamiento del material de los segmentos del estator de la turbina del motor PT6A en el proceso de operación
2. En base a los resultados de la investigación de los sellos de serie de turbina se desarrolló el proceso tecnológico de recuperación de segmentos del estator de la turbina con el método de Aspersión por detonación:
  - Se seleccionó los materiales compuestos correspondientes.
  - Se desarrolla el proceso tecnológico de aspersión.
  - Se investiga la resistencia de adhesión de los recubrimientos aspersidos.
3. De la experiencia de la operación de semejantes materiales sellantes se realizó un análisis comparativo sobre la resistencia al desgaste de los materiales de serie y de los propuestos.
4. Las conclusiones y las recomendaciones respecto a la inclusión de los materiales compuestos propuestos, aplicados con el método de detonación por aspersión.

USO Y CUIDADO DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A  
DURANTE EXPLOTACIÓN

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MOTOR PT6A

# CAPITULO

## II



**INVESTIGACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL DEL SECTOR**  
**ESTATÓRICO DE LA 1era ETAPA DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A**  
**DURANTE EXPLOTACIÓN**

## **2.1 CONSTRUCCION GENERAL DEL MOTOR PT6A**

El PT6A es un motor de turbina libre, de pequeño tamaño y peso cuyas secciones se pueden apreciar en la figura 3. La relación de compresión del compresor es de 7.3 a 1 según el modelo del motor. La potencia generada es 780 SHP. El motor utiliza dos secciones de turbina independientes: una es la turbina que mueve el compresor (**C/T**) y la otra la turbina de potencia (**P/T**) que a través de la caja reductora mueve la hélice. Esta última es de dos etapas. El motor es autosuficiente ya que el sistema de lubricación movido desde la caja de accesorios provee presión de aceite para el torquímetro y potencia para el control del ángulo de la hélice.

El aire entra por la parte trasera del motor a través de una cámara anular (inlet case) y desde ahí entra en el compresor. Este consta de tres etapas axiales y de una etapa centrífuga todo ensamblado y formando una unidad integral en el rango de máximo continuo.

Los álabes de la parte compresora en su movimiento rotativo le transmiten al aire energía en forma de velocidad. Detrás de cada rueda de álabes se encuentra una etapa de álabes fijos cuya función es la de transformar esa energía cinética en energía de presión. Cada álabe está diseñado para que en el régimen de potencia se produzca una acumulación de energía sostenida desde la primera etapa a la tercera. La presencia de daños en los álabes por FOD es muy perjudicial para una buena compresión.

La última etapa de compresión es de tipo centrífuga (impeller) la cual aumenta la velocidad del aire considerablemente. El aire a alta velocidad entra en tubos difusores donde gira 90 grados y se remansa, transformando la velocidad en alta presión. Esta es la presión existente alrededor de la cámara de combustión y llamada **P3**. La división  $P3 / P_{amb}$  es la que nos da la relación de compresión.

La cámara de combustión es de construcción anular, con agujeros de distintos tamaños y configuraciones para: combustión primaria, dilación de temperatura y refrigeración de las paredes de la cámara. El diseño de la cámara consigue mantener a través de ella la presión de los gases al tiempo que aumenta la energía en forma de temperatura. Los gases en la cámara de combustión cambian de dirección 180 grados mientras se mezcla con combustible y se produce la ignición. La localización de la cámara por encima de la turbina elimina la necesidad de un eje largo entre el compresor y la turbina del compresor, reduciendo así la longitud del motor y su peso.

El combustible se introduce a través de 14 inyectores localizados circunferencialmente.

La combustión es continua y durante el arranque esta se inicia con dos bujías.

Los gases resultantes de la combustión vuelven a girar 180 grados a través del conducto formado por el conducto de salida grande y el conducto de salida pequeño ,entrando en una etapa estatora de álabes guía (C/T vane ring) que dirigen y expanden los gases con un ángulo correcto hacia los álabes de la turbina del compresor, haciendo girar a este último, reabasteciendo de aire a la cámara de combustión.

La energía remanente de los gases, presión y temperatura, se termina por extraer en la turbina libre de potencia, la cual a través de una caja reductora de dos etapas planetarias convierte la alta velocidad de la turbina en fuerza torsional para mover la hélice. Parte integral de la primera etapa reductora es el torquímetro, el cual prevee una indicación exacta de la potencia del motor.

Los gases salen al exterior a través del conducto de salida (exhaust duct) el cual tiene una o dos ramificaciones, dependiendo del modelo de motor. Estos gases proveen a su salida un empuje adicional de unos 50 kilos debido a su energía remanente. Diseño aerodinámico de los tubos de salida produce considerable ganancia de velocidad y disminución de los consumos de combustible.

La temperatura usada como referencia en los PT6A es la llamada **T5** que se toma de la zona inmediatamente anterior a la turbina de potencia y consta de 8 sensores de Cromel/Alumel (termocuplas) unidos en paralelo a través del "bus bar" y con salida al exterior a través de un cable blindado (wring harness) con conexión para la instrumentación en la cabina del piloto en el gas generador.

Todos los accesorios, excepto los gobernadores de la hélice y el tacómetro generador de la turbina de potencia, están montados en la caja de accesorios, en la parte trasera del motor. El movimiento lo reciben del compresor a través de un eje que pasa por un tubo cónico por el centro del tanque de aceite. Esta localización hace que el mantenimiento sea más sencillo y que el motor sea más limpio.

El aceite está contenido en una cámara formada en la parte posterior de la cámara anular de ingreso de aire a la máquina (inlet case). Su capacidad es de 2.3 Galones US y tiene una varilla de verificación de nivel y un tapón de drenado.

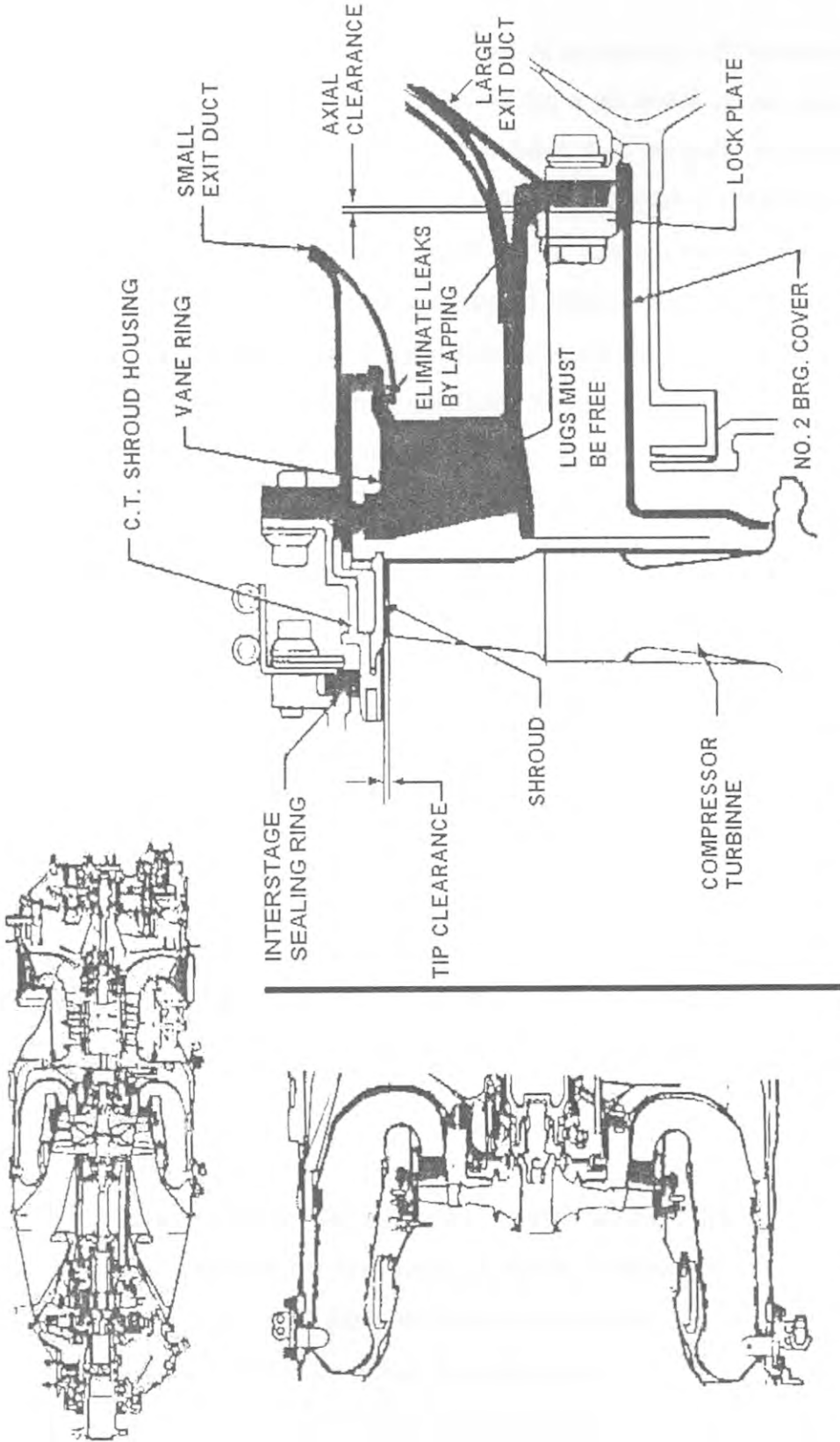
El combustible se provee al motor desde un tanque externo, presurizado por una bomba movida por el motor y regulado por el FCU, unidad reguladora del combustible montada sobre la misma bomba.

## 2.2 COSTRUCCION DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A

**El anillo de álabes guías de la turbina del compresor** consiste de 14 álabes moldeados en una sola pieza, enfriados entre los anillos de aseguramiento externo e interno(ver Fig.4). Los contornos externos de los álabes dirigen los gases de la expansión desde la cámara de combustión a los álabes de la turbina del compresor en un ángulo óptimo para impulsar la turbina. El anillo de álabes es asegurado entre el conducto mayor de salida de la cámara de combustión y la cubierta del cojinete #2 en el hueco central de la caja del generador de gas. El alojamiento del anillo de refuerzo de la turbina del compresor sitúa a la circunferencia externa del anillo de alabes de la turbina del compresor.

El aire de enfriamiento desde los alrededores de la pared interior de la funda de la cámara de combustión, pasa a través de 14 portalones en el conducto menor de salida de la cámara de combustión en su brida de aseguramiento para aparear los huecos con los huecos hechos en las 14 orejetas en el anillo externo de los álabes. El aire entonces pasa a través de pasajes internos en cada álabe para ser venteado axialmente desde el borde de salida a través de su raíz en el anillo interno.

El alojamiento del anillo de refuerzo de la turbina del compresor se extiende hacia la turbina de potencia y es ranurada externamente para recibir a los dos anillos de sellado. Estos proveen un sello de potencia en el punto de separación mecánica de las turbinas generadora de gas y la de potencia del motor.



**FIG. 4 COMPRESSOR TURBINE VANE ASSY**

Fig. 4 Anillo de álabes guías y alojamiento de Segmentos de la turbina del Motor PT6A

**La turbina del compresor** consiste de un disco con 58 álabes balanceados en dos planos por pesos clasificados fijados a las bridas en las caras frontal y posterior. El cubo se extiende hacia adelante y es ranurado externamente para enganchar en el manguito del eje del compresor, el cual es impulsado en sentido horario. Una ranura maestra asegura que la relación angular de la turbina y compresor sea preservada para mantener el balance original. Un perno central y huacha de seguro, aseguran el disco al manguito del eje del compresor. Los álabes maquinados en una aleación de fundición Níquel -Cobalto, están asegurados por remaches tubulares en estrías maquinadas en forma de pino invertido en la circunferencia del disco. Extremos silbadores aseguran daños mínimos que podrían suceder si los extremos tienen contacto con los segmentos del anillo de refuerzo. Un deflector de aire montado en el hueco central de la caja del generador de gas, y un conjunto de deflector inter-etapa entre las turbinas del compresor y de potencia dirige el aire de enfriamiento hacia afuera a través de las caras frontal y posterior del disco de la turbina del compresor, el deflector inter-etapas actúa también como un sello entre las etapas de turbina.

**Los álabes guías** se encuentra entre los conductos de salida de la cámara de combustión y la turbina del compresor formadas por álabes moldeados en una sola pieza. Una plataforma periférica formada en el vane ring acopla con el conducto de salida pequeño y con la carcasa que rodea los álabes de la turbina (shroud housing).

Este alojamiento de segmentos se extiende hacia adelante y forma una superficie cilíndrica exterior donde se apoya y desliza el aro de sellado inter-etapas y a la vez es el punto de unión (o separación de la sección de potencia). Los segmentos se colocan dentro de la envolvente y sirven para darle a los álabes la mínima luz para evitar fugas de gases al tiempo que se eviten los rozamientos y desgastes. Si la luz es demasiado grande esta se manifiesta con alta temperatura

En la turbina se trabaja casi toda la energía calorífica del gas. La energía restante del gas genera un empuje reactivo, que aparece durante la descarga del flujo gaseoso desde la tobera reactiva. La expansión del gas se produce hasta la presión estática detrás de la última etapa de la turbina en un 4 % inferior a la atmosférica.

El conducto de la turbina es en la sección longitudinal un canal que suavemente se expande.

Para trabajar la diferencial térmica con un alto valor del rendimiento, la turbina se hace reactiva. La parte perforada de los álabes móviles de todas las etapas están elaborados respecto a la altura de la paleta.

Para eliminar Las pérdidas por la fuga de los gases desde el intrados al extrados, se colocan segmentos con una medida determinada de espesor "A" (Fig. 1) en la parte estática de la turbina. Con la finalidad de aumentar el rendimiento de la turbina se han empleado sellos de laberinto entre las etapas formados por las crestas y los anillos sellantes con insertos metalocerámicos en los cuerpos internos de los vanos de tobera.

El desgastamiento de las piezas de las turbinas es provocado por las tensiones cíclicas y las cargas térmicas estáticas prolongadas y por las acciones del flujo gaseoso.

En condiciones de fricción aparecen y se desarrollan las descargas de los soportes y de las puntas de los álabes, de las plataformas de los laberintos, de los sellos.

Las partículas sólidas de carbonilla de la cámara de combustión varían la rugosidad del perfil de la paleta.

La corrosión gaseosa ataca a Las piezas del ducto de gases, sobre todo los sellos radiales, los álabes móviles y los vanos de tobera.

La fluencia plástica provoca deformaciones irreversibles de los álabes y de los discos. Los alargamientos residuales de los álabes móviles debido a la fluencia varían el juego radial.

#### **2.4 DETERMINACION DEL TIPO PRINCIPAL DE DESGASTAMIENTO DEL MATERIAL DEL SEGMENTO SELLANTE DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A EN EL PROCESO DE OPERACIÓN.**

El material sellante del segmento de la turbina del motor PT6A en el proceso de operación del MTG está sujeto a las acciones simultaneas de un complejo complicado de condiciones de trabajo, que se generan tanto por los procesos de fricción que se producen durante el contacto de las puntas de los álabes de la turbina con el material sellante del segmento a altas velocidades tangenciales (200 m/s), como debido a la acción directa del flujo gaseoso con altas temperaturas.

Para investigar los procesos de desgastamiento del material sellante del segmento en condiciones de altas temperaturas de desplazamiento relativos se necesita obtener sus características cualitativas; durante esto se debe tener en cuenta dos procesos que se desarrollan continuamente en el tiempo: el proceso de corte que se caracteriza por el desgaste intenso del material sellante y el proceso de fricción de película.

La principal característica del proceso de corte es la fuerza de corte.

Se sabe que el criterio de transición desde la deformación plástica al corte es la relación:



$$\frac{h}{R} = M \dots\dots\dots ( 3 )$$

Donde  $h$  = Es la profundidad de la introducción (mm)  
 $R$  = Es el radio de la desigualdad que se introduce (mm)  
 $M > 0,1$  Para la superficie seca.

La presión de contorno, que corresponde a la transición al corte se calcula según la fórmula:

$$q = \left( \frac{Mr}{h_{max}} \right)^v \cdot C \cdot \sigma_s \cdot b \dots\dots\dots ( 4 )$$

De donde:

$$M = \frac{h_{max}}{r} \sqrt[2]{\frac{q}{C \cdot \sigma_s \cdot b}} \dots\dots\dots ( 5 )$$

Donde  $h_{max}$  = Es la altura de la saliente máxima  
 $R$  = Es el radio de la desigualdad introducida  
 $v$  = 2 (Coeficiente para el corte)  
 $b$  = 1 a 3 (Coeficiente para el corte)  
 $q$  = Es la presión de contorno  
 $C$  = Constante que depende de las propiedades del material y de la temperatura  
 $\sigma_s$  = Es el límite de fluencia del material

De la formula (5) se deduce que la presión de contorno puede tener un valor crítico durante el cual se produce la transición de la deformación plástica al corte y viceversa.

En nuestro caso la presión de contorno, creado por la punta del álabe de la turbina, en el primer momento de contacto va a tener un máximo valor.

La fuerza de empuje del álabe al segmento sellante debido a la fuerza centrífuga y a otros factores va a permanecer constante. Sin embargo la presión de contorno debido a las capas cortadas en cada vuelta del rotor de la turbina va a disminuir hasta el valor crítico. Cuando la presión de contacto de la punta del álabe alcanza el valor crítico se produce la transición del corte al deslizamiento plástico y luego al elástico y comienza el proceso de fricción.

En la figura Nro. 5 se muestra el esquema de microcorte del material sellante por la punta del álabe.

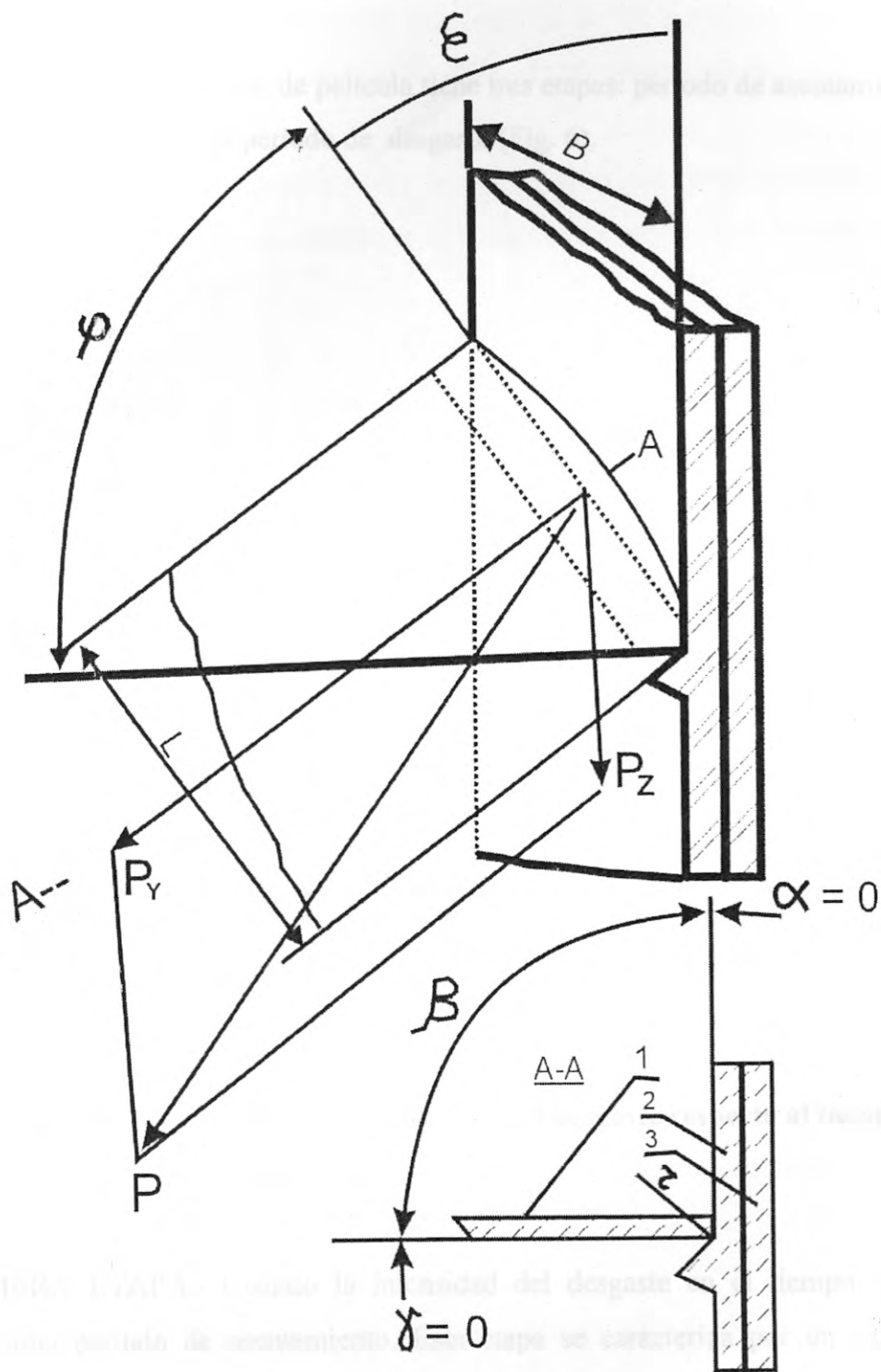
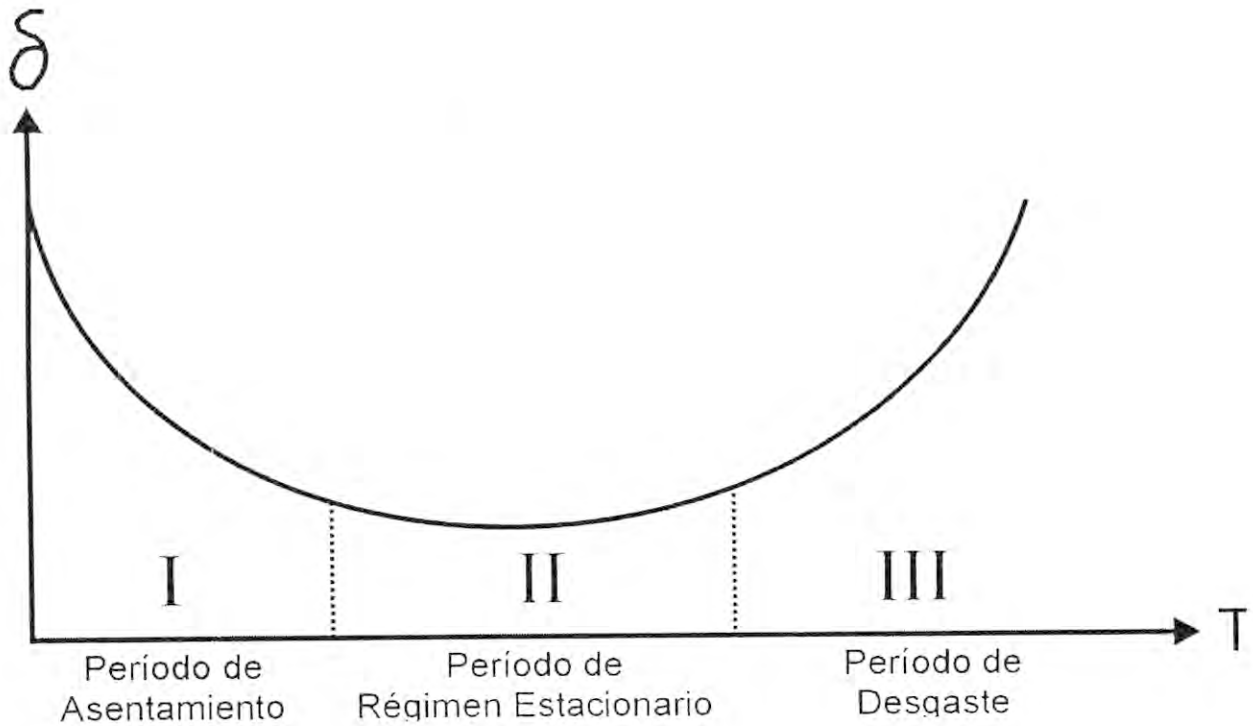


Fig. 5. Esquema del Corte del Material Sellante por la punta del álabre ( $\alpha = 0^\circ$  ;  $\gamma = 0^\circ$  ;  $\beta = 90^\circ$  ;  $\phi = 55^\circ$  ;  $\epsilon = 35^\circ$ )  
 1.- Alabe 2.- Material del Segmento 3.- Anillo de Trabajo

El proceso de fricción de película tiene tres etapas: período de asentamiento, régimen estacionario y el período de desgaste (Fig. 6).



**Fig. 6 Variación de la intensidad del desgaste respecto al tiempo de Operación**

PRIMERA ETAPA.- Cuando la intensidad del desgaste en el tiempo cae se denomina período de asentamiento. Esta etapa se caracteriza por un desgaste intenso de las salientes de la microrugosidad de las superficies de fricción hasta que se produzca una transición de contacto de las superficies de trabajo por el área real de contacto.

SEGUNTA ETAPA.- La intensidad del desgaste en el tiempo de operación prácticamente permanece constante ya que el contacto de las superficies de fricción se produce por el área real de contacto.

TERCERA ETAPA.- La intensidad del desgaste de las superficies de contacto comienza a crecer lo que está condicionado por el envejecimiento del material.

Este proceso se produce hasta la aparición de un juego físico entre las puntas de los álabes de la turbina y los segmentos sellantes del estator de la turbina del motor PT6A.

Sin embargo con la aparición del juego, el material de los segmentos sellantes, en el proceso de operación está sujeto a la acción del flujo gaseoso. El flujo de gases posee una gran energía cinética y una alta temperatura (y en algunos casos está sucio con abrasivo), lo que condiciona el desgastamiento erosivo y abrasivo del material del segmento sellante del estator de la turbina del PT6A.

Cuando se estudia las leyes del desarrollo de los procesos principales que condicionan el desgaste del material de los segmentos sellantes en el proceso de operación, se necesita conocer la magnitud cuantitativa del desgaste en el tiempo operacional del motor PT6A.

Con la finalidad de determinar la magnitud cuantitativa del desgaste se efectuaron mediciones de los diámetros reales de los estatores de la turbina en el armado con los segmentos sellantes en 8 -10 motores que trabajaron 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, horas de operación.

Los anillos de trabajo del estator de la turbina conjuntamente con los segmentos sellantes se midieron en dos secciones mutuamente perpendiculares en el medio del ancho del segmento, como se muestra en la figura Fig. 7.

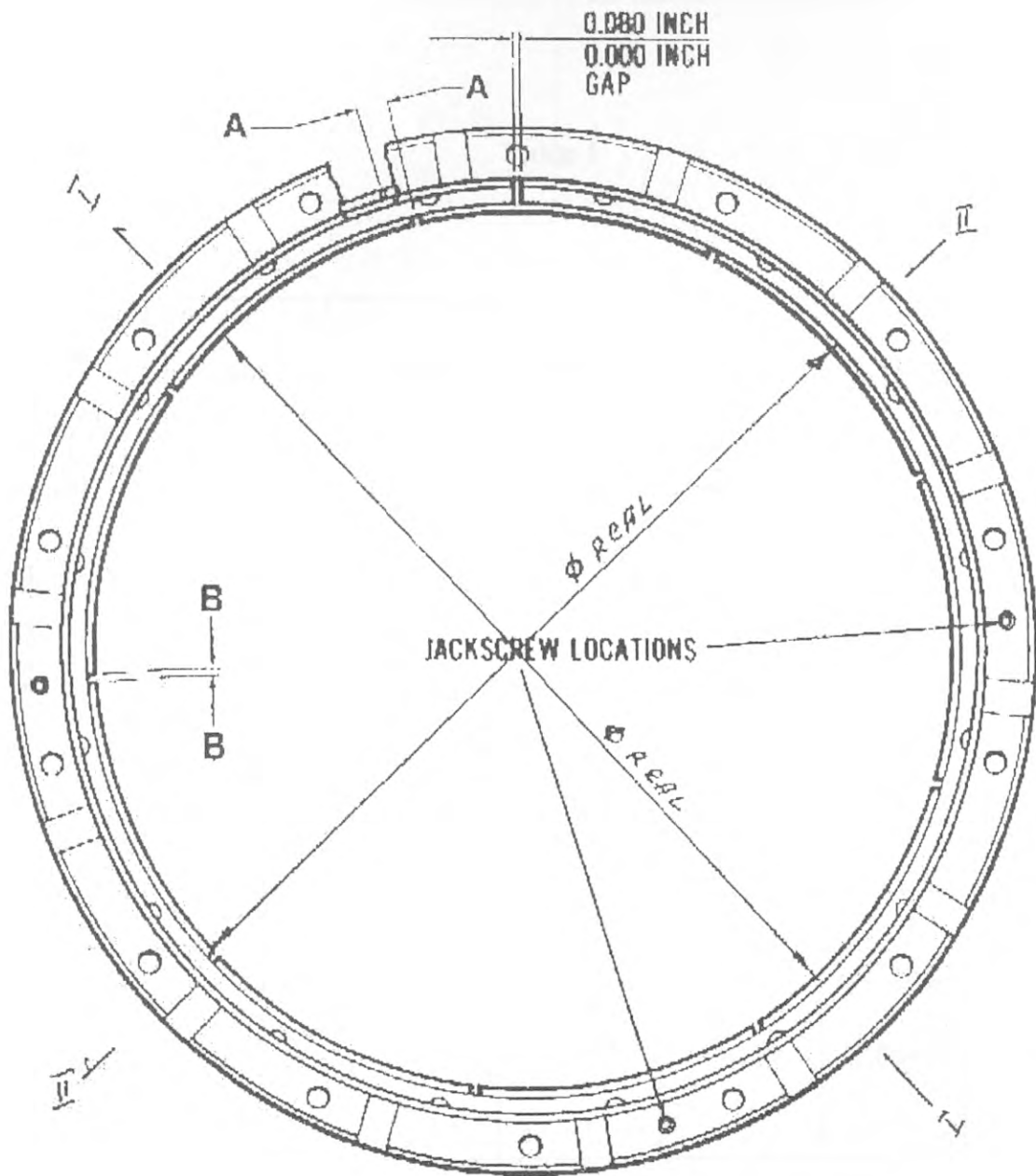
Las mediciones se efectuaron con un medidor micrométrico cuya exactitud es de 0,01 mm. Según los resultados obtenidos determinamos el valor medio del diámetro real de las superficies de los segmentos. Del valor medio del diámetro real le restamos el diámetro constructivo, que es igual a ( $\Phi_K = 220.218 \text{ mm}$ ).

El valor absoluto del juego radial ( $\delta$ ) ósea el desgaste, se determinó como la diferencia de los diámetros (real y constructivo), dividido entre dos. Como en los cálculos se utiliza el valor relativo del juego radial, nosotros determinamos este parámetro según la fórmula:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{l} \cdot 100\% \dots \dots \dots (6)$$

Donde:  $\delta$  = es el juego radial absoluto en mm.

$l$  = es la longitud del álabe de la turbina (21,4452 mm)



- AA** 0.250 INCH MINIMUM DISTANCE FROM  
ANY ADJACENT COOLING HOLE
- BB** SHROUD SEGMENT GAPS MUST BE EQUAL

Fig. 7 Localización de los Alojamiento de Segmentos de la  
Turbina de Compresor del Motor PT6A

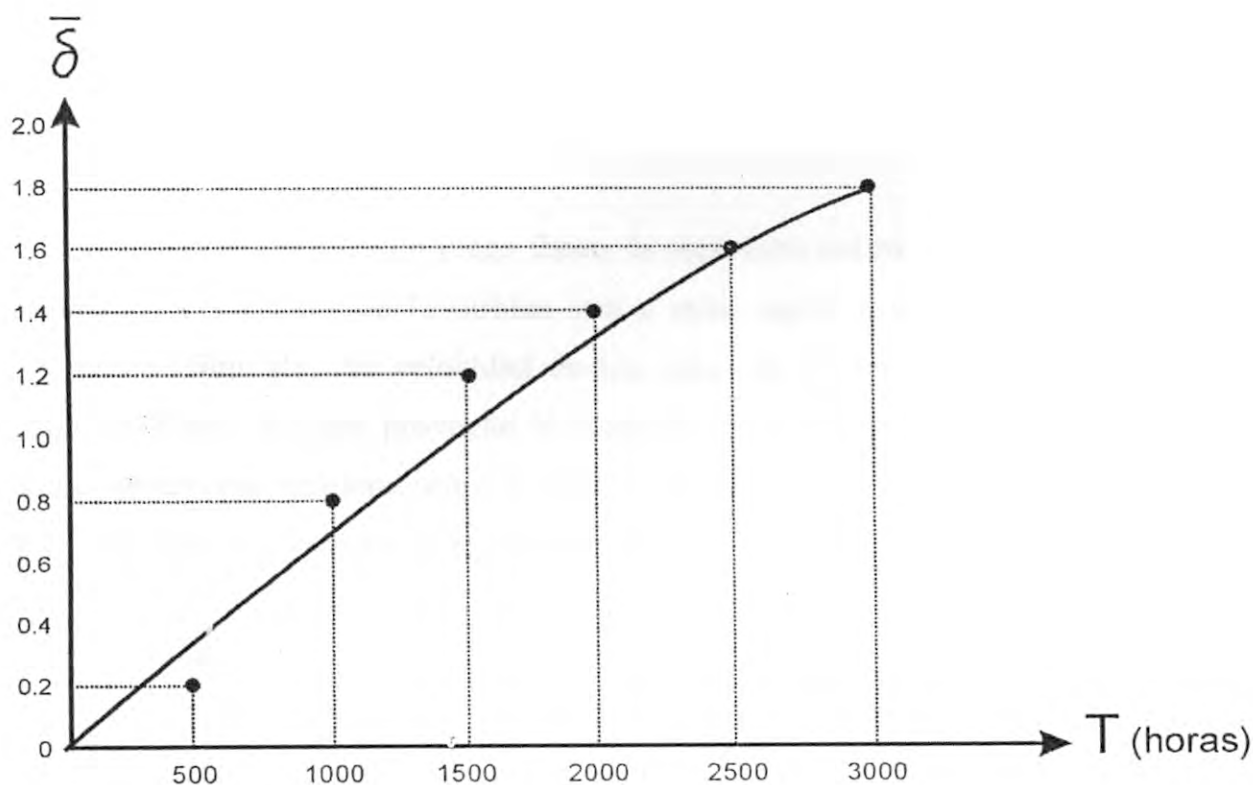
Los resultados de las mediciones y de los cálculos lo mostramos en la tabla Nro. 1.

**Tabla 1**

<b>Horas</b>	<b>500</b>	<b>1,000</b>	<b>1,500</b>	<b>2,000</b>	<b>2,500</b>	<b>3,000</b>
<b>Parámetros</b>						
$\Phi_R$ (mm)	220.298	220.522	220.748	220.824	220.932	220.984
$\Phi_C$ (mm)	220.218	220.218	220.218	220.218	220.218	220.218
$\delta$ (mm) <b>Absoluto</b>	0,04	0,152	0,265	0,303	0,357	0,383
<b>L (mm.)</b> <b>Longitud del</b> <b>Alabe</b>	21,4452	21,4452	21,4452	21,4452	21,4452	21,4452
$\delta$ Relativo $\delta = \frac{\delta}{L} * 100 \%$	0,1865	0,7088	1,2357	1,4129	1,6647	1,859

Según los datos tabulares construimos el gráfico de desgaste del material de los segmentos sellantes del estator de la turbina respecto al tiempo operacional del motor PT6A en el proceso de operación (Fig. 8).





**Fig. 8 Gráfico de Variación del desgaste del material de los Segmentos de la Turbina respecto al tiempo operacional del Motor PT6A.**

De la figura se ve que un desgaste del material de los segmentos se produce en el periodo de trabajo del motor hasta 1500 horas.

El aumento del desgaste en el proceso de operación se produce debido a la acción sobre el material sellante de un complejo complicado de diversos factores como son: el microcorte cuando raspa punta del álabe con el material sellante, la fricción de película, la temperatura, la velocidad y la suciedad abrasiva del flujo de gases.

Hasta 1500 horas de trabajo, sobre la superficie del material sellante van a actuar todos los factores enumerados arriba, lo que condiciona un brusco aumento del desgaste ( $\delta$ ..varía desde 0 hasta 1, 2 %).

Cuando se alcanza 1500 horas de trabajo se forma un juego físico constante entre las puntas de los álabes del rotor de la turbina y la superficie del material sellante de los segmentos del estator de la turbina.

Cuando se produce un juego físico, la superficie del material sellante de los segmentos del estator de la turbina van a estar sujeta a una acción térmica y también al flujo de alta velocidad de los gases de escape que tienen suciedad abrasiva. Estos factores provocan el desgaste del material de los segmentos en menor grado que el microcorte y la fricción de película (varía desde 1.2 % hasta 1.78 %), ósea el desgaste prácticamente es menor de dos veces que el primer caso.

Si consideramos que durante la fricción de película se produce un desgaste abrasivo de las superficies de trabajo y que durante la acción del flujo gaseoso sucio con abrasivo, también prevalece el desgaste abrasivo, entonces en conclusiones determinan que el tipo principal de desgaste del material sellante de los segmentos del estator de la turbina en el proceso de operación del motor PT6A es el desgaste abrasivo.

# CAPITULO

## III

## DESARROLLO DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE REPARACION DE LOS SEGMENTOS DEL ESTATOR DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A POR EL METODO DE ASPERSION POR DETONACION

### **3.1 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS POR MEDIO DEL METALIZADO POR ROCIADO**

Uno de los métodos más comunes para aplicar recubrimientos metálicos son los metalizados por rociado, el cual se obtiene por la pulverización y fusión del metal de aporte en partículas de 3 a 300 micrones, aplicada sobre una superficie anteriormente preparada. La unión del recubrimiento con el metal base se produce por cohesión mecánica de las partículas rociadas en las salientes y cavidades de la micro-rugosidad superficial del material base formada por un tratamiento previo.

Los recubrimientos rociados se utilizan para mejorar las siguientes propiedades: la restauración de superficie planas y cilíndricas (internas y externas) afectadas por el desgaste, incrementar la resistencia térmica y a la corrosión, incrementar las propiedades antifriccionantes e incluso para fines decorativos, etc.

Los recubrimientos por rociado tienen una serie de bondades una de las cuales es su alta productividad, un bajo calentamiento del material base no mayor de 200 ° C, la posibilidad de utilizar recubrimientos metálicos de diferentes composiciones sobre la superficie de partes de cualquier material (aceros, maderas, vidrios, etc.). Este tipo de metalizado no es muy recomendable para ser utilizados en partes aeronáuticas que están sujetas a grandes cargas específicas de compresión y cizallamiento por tener una baja adherencia, tienen una alta porosidad, baja resistencia mecánica y fragilidad.

El rociado por metalizado como un proceso de precipitación por impacto de partículas fundidas sobre la superficie del material base incluye las siguientes operaciones; Un preliminar tratamiento superficial del material base para asegurar una buena adherencia de las partículas rociadas, el rociado y un posterior tratamiento al recubrimiento a necesidad que puede incluir un tratamiento o un endurecimiento superficial.

### **3.1.1 Preparación preliminar de las partes para el metalizado por rociado.**

El tratamiento preliminar de la superficie base es uno de los factores más importantes que determinan la adherencia del recubrimiento con el material base. La cohesión del recubrimiento se realiza por acción de una serie de mecanismos, de los cuales la más importante es la resistencia al desprendimiento o adherencia del recubrimiento con el material base. Consecuentemente, para que las partículas rociadas, las cuales impactan y se deforman sobre el material base se adhieran resistentemente con una superficie irregular, el material base deberá ser lo suficientemente rugoso.

En los casos en que la adherencia del recubrimiento dependa mucho de la fusión del material de aportes con el material base o de la formación de uniones químicas en la zona de transición, el tratamiento preliminar deberá incluir una limpieza de la superficie. El tratamiento superficial del material base para darle una rugosidad determinada es una medida importante incrementar el área de la superficie base y crear una mayor actividad de la base.

Para eliminar grasas y aceites de la superficie se utiliza mucho la limpieza con solventes por ejemplo: bencina, pirobenceno, tricloroetileno etc, para eliminar óxidos de las superficies se realiza el

arenado con el empleo de granalla acerada, o granos de cuarzo, y para dar la rugosidad superficial a la superficie base se usa uno de los siguientes tratamientos superficiales 1) arenado, 2) un tratamiento superficial mecánico, 3) aplicación de una capa preliminar de alta adhesividad como el molibdeno.

El tratamiento superficial más común para dar una rugosidad superficial a los materiales es el arenado porque es posible obtener un tratamiento uniforme a grandes áreas.

En calidad de materiales abrasivos se utilizan: granalla acerada, granalla de fundición blanca, óxido de aluminio, arenilla, electrocorun, granito, escoria, silicio, carburos de silicio etc. Las dimensiones de las partículas abrasivas pueden tener 400 a 1000 micrones, en función a las dimensiones del material base y la presión del aire comprimido varía de 0.3 a 0.5 MPa dependiendo del material abrasivo.

En un tratamiento de arenado si se utiliza un mismo abrasivo, entonces, la productividad del proceso de arenado aumenta con el incremento de la presión del aire comprimido.

La efectividad del tratamiento aumenta con el incremento de granulometría del abrasivo, sin embargo con estos se incrementa la rugosidad de la superficie tratada. Una granulometría pequeña de los abrasivos proporciona una baja rugosidad. En la práctica de los tratamientos superficiales se realizan una mezcla de abrasivo grandes y pequeños para aprovechar completamente sus ventajas, la granulometría de los materiales abrasivos determina la rugosidad superficial del material base.

El metalizado por rociado es necesario iniciar al término del tratamiento superficial, por cuanto una demora adicional, la superficie activa se ve afectada de una oxidación, que disminuye la adherencia del recubrimiento con el metal base.

La rugosidad en forma de pequeños cortes fileteados, pequeñas ranuras y moleteados en las superficie de los ejes, cilindros u otras partes cilíndricas se puede obtener por métodos de tratamiento mecánico, que en particular se utiliza como un método previo del tratamiento superficial en casos necesarios de aplicación de recubrimientos de alto espesor u obtener un recubrimiento destinado a trabajos en condiciones de sobre cargas.

### **3.1.2 El proceso del metalizado por rociado.**

En un proceso de rociado es necesario establecer los regímenes óptimos para el método y tipo de equipamiento elegido. El régimen óptimo del metalizado depende de muchos factores: característica de la fuente de energía (tipo del gas de trabajo, su consumo, la potencia consumida); su composición química, las propiedades físico-caloríficas, formas granulométricas (en caso de alambre y varillas) del material de aporte; composición del material base; dimensiones y formas de las partes, condición de su superficie metalizada; temperatura del pre-recubrimiento; el ángulo y distancia del rociado y otros.

En la práctica del metalizado es necesario seguir las recomendaciones referente a los diferentes aspectos del proceso que a continuación se detallan:

- 1) **Condición de la superficie del metal base.-** Durante una inspección visual en la superficie de la materia base se observa huellas de suciedad (humedad, óxidos cascarillas de óxido y fundición etc). Entonces es necesario repetir el proceso de limpieza. Después del arenado de la primera capa es necesario metalizar con una demora máxima de 4 horas, el tiempo total del arenado y del metalizado no debe ser mayor de 8 horas.
- 2) **Distancia del metalizado.-** La distancia óptima del soplete hasta la superficie del material base generalmente no excede los límites 75 a 250 mm. A una distancia pequeña surge la posibilidad de deformar el material base por acción de las tensiones térmicas; cuando esa misma distancia es demasiado grande la temperatura y la velocidad de las partículas disminuye, lo que produce la formación de un recubrimiento fofo y disminuye la adherencia con la base y finalmente puede producirse un levantamiento del recubrimiento.
- 3) **El ángulo del metalizado.-** La mayor deformación de las partículas del material de aporte durante el impacto con la superficie base se produce si el soplete se coloca en forma perpendicular a la superficie. Si no es posible obtener este ángulo, se permite una inclinación respecto a la vertical no mayor de 45°. Si el ángulo es menor de 90° disminuye ligeramente la calidad del metalizado,
- 4) **Temperatura de la Superficie del material base en el metalizado.-** El calentamiento de la superficie del material base en el metalizado produce una disminución de la adherencia o podría originar una deformación. La temperatura teórica de la superficie del metal base no debe ser mayor de 260 ° C. Para temperaturas menores realizar el metalizado no es



recomendable, en estos casos se recomienda un calentamiento previo del material base hasta una temperatura de 120 a 150° C.

- 5) **Uniformidad en el espesor del recubrimiento.**- Para obtener un recubrimiento de espesor uniforme, es deseable que espesor de la capa del recubrimiento en una sola pasada no sea mayor de 0.25 mm. El espesor requerido del recubrimiento se obtiene en varias pasadas.
  
- 6) **Espesor del recubrimiento.**- Durante el metalizado es necesario considerar que la superficie base se contrae. Un alto espesor del recubrimiento por acción de las tensiones residuales que aparecen en la superficie base, a consecuencia de la contracción produce el deterioro de la zona de contacto y finalmente el levantamiento del recubrimiento. En un metalizado de superficies internas de las tuberías que tiene una gran contracción se produce un abultamiento del recubrimiento. En estos casos se aplican recubrimientos con espesores mínimos permisibles. Uno de las formas para evitar los abultamientos del recubrimiento es el calentamiento previo del material base hasta una determinada temperatura.
  
- 7) **Velocidad de las partículas del material de aporte.**- Es muy importante que el recubrimiento se realice a una velocidad óptima y constante. Así como en el metalizado oxi-acetilénico con alambre la disminución de la velocidad produce una disminución de las dimensiones de las partículas y su rápida refrigeración en su desplazamiento desde el soplete hasta la superficie base.

### 3.1.3 Tratamiento superficial posterior al metalizado.

El recubrimiento obtenido después del metalizado, por su estructura es sumamente poroso para algunas finalidades. La porosidad es una característica ventajosa, para otros no es recomendable y por lo tanto se necesita tomar medidas para su eliminación. Un método para eliminar la porosidad es la aplicación de una capa de pintura en la superficie del recubrimiento. También encuentra utilización los métodos de rellenado de poros por impregnación de los recubrimientos de composiciones especiales y para recubrimientos metalizados con aleaciones auto fundentes se realiza una fusión del recubrimiento después de su aplicación. Para mejorar las propiedades mecánicas y resistencia al fuego se le aplica un tratamiento térmico.

**Pintado:** El pintado de los recubrimientos se realizan básicamente para incrementar las propiedades anticorrosivas del recubrimiento, aplicados a los metales ferrosos. La penetración del colorante por los poros permite un endurecimiento del recubrimiento y también un aumento de la tenacidad del colorante.

Para tapar vacíos y rajaduras internas en el recubrimiento se utilizan soluciones de baja viscosidad. Estas soluciones durante su aplicación penetran fácilmente por acción del efecto capilar, por esto se le concede una mayor consideración a los colorantes de baja viscosidad tienen un alto contenido fracciones sólidas.

No se recomienda utilizar colorantes de secado rápido, por cuanto no son capaces de penetrar profundamente.

**Fusión del recubrimiento auto fundente:** Con la finalidad de eliminar los poros, aumentar la adhesión al metal base y ciclos

resistentes al tratamiento que incluye la limpieza de la superficie y un tratamiento previo para conseguir una determinada rugosidad la parte ha recuperar deberá ser calentada con flama de gas a una temperatura no menor a 500 ° C. Al término de la restauración se realiza un calentamiento por toda la superficie de recubrimiento para igualar las temperaturas y después la parte se refrigera suavemente.

### **3.2 FORMACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS METALIZADOS POR ROCIADO Y SU ADHERENCIA**

Para cualquier método de metalizado por rociado la distancia entre el soplete metalizador y la superficie del material base es no menor a 100 mm. El recubrimiento se forma de partículas independientes fundidas o próximas a ese estado, que con gran velocidad impactan sobre el material base formando capas.

Durante el metalizado por rociado las partículas en movimiento se desplazan en un medio gaseoso a altas temperaturas encontrándose la mayoría de ellas en estado de fusión y al impactar en el material base sus superficies se recubren de una película de óxido, en el impacto las partículas se esparcen, formando una película muy fina que se adhiere mecánicamente a la superficie del material base o sobre otro recubrimiento. Durante el rociado de un metal la velocidad de enfriamiento de las partículas esta en el orden de  $10^6 - 10^8$  °C/seg., y de un material cerámico  $10^4 - 10^6$  °C/seg, por esta razón la cristalización de las partículas líquidas se realiza en un insignificante periodo de tiempo.

En el momento del rociado las partículas se adhieren entre sí, cayendo sobre la superficie partículas fundidas y semi fundidas, así mismo, en el interior del recubrimiento se rellenan los vacíos con gas, cuya cantidad esta determinado por la porosidad del recubrimiento.

La adhesión de las partículas rociadas se produce por medio de la cohesión mecánica con las salientes y cavidades de la superficie rugosa del material base preparadas con anterioridad y por los lugares donde se destruye la película de óxido, al destruirse las películas de óxido produce una fusión de las partículas metálicas con el material base formando recubrimientos de alta adherencia. Además de la cohesión mecánica; la adherencia se logra por una serie de mecanismos incluyendo la difusión de los componentes del recubrimiento en el material base y la fusión e interacción química. Por cuanto, las partículas rociadas poseen generalmente una película de óxido, su cohesión con la superficie del material base en algunas micro zonas se produce a través de ella.

El incremento de la adherencia se consigue también por uniones físicas por acción de las fuerzas de Vander Walls, estas fuerzas como las fuerzas de atracción inter atómica pueden surgir solamente en un acercamiento de las partículas del recubrimiento con la superficie del metal base a una distancia muy cercana al parámetro de la red cristalina.

Cualquier tipo de metalizado por rociado supone el desplazamiento de partículas a altas temperaturas hasta alcanzar su fase líquida en un chorro de gas aplicado por un soplete metalizador hasta la superficie del material base. En un metalizado convencional (oxiacetilénica) y por plasma, en el aire se produce la inyección del chorro que transporta el material de aporte al material base. En un metalizado por arco eléctrico se utiliza aire comprimido como medio de transporte para el rociado del material de aporte.

De esta forma, el movimiento de las partículas fundidas en un chorro de aire van acompañados de la interacción de sus superficies con el oxígeno y el nitrógeno del medio ambiente. En un metalizado por plasma cuando se utiliza el nitrógeno como gas de trabajo, el calentamiento de las partículas del material de aporte se produce en un chorro de plasma producido por este gas, como resultado las partículas pueden interactuar con el nitrógeno, y los productos de esta interacción pueden entrar en la composición del recubrimiento.

Las partículas del metal o aleación de aporte (en función a su tenacidad a la oxidación) en alguna medida pueden estar sujetas a la oxidación, cuando se aplica el recubrimiento interactúan con el oxígeno formando en ellas al momento del impacto una película muy fina de óxido. La aparición de óxidos en los recubrimientos de metales o aleaciones representa grandes dificultades.

Durante las investigaciones micro estructurales para poner en evidencia la presencia de óxidos en los recubrimientos se recomienda someterlos a un pulido sin ataque químico, sin embargo después de esto, partículas de óxido muy pequeñas pueden ser difícilmente detectadas en medio de las huellas de la plasticidad del metal, en este caso para ponerlos en evidencia puede aplicarse un ataque químico muy suave.

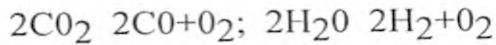
### 3.3 PRINCIPALES MÉTODOS DE METALIZADOS POR ROCIADO

Los equipos empleados para el metalizado por rociado están diseñados en función a la fuente de energía (calor) que utilizan para fundir el material pulverizado y se dividen en llama de gas y eléctricos. Los equipos por llama de gas utilizan el calor que se desprende al quemarse una mezcla de gas combustible con el oxígeno. Los equipos eléctricos se basan en el empleo del calor que produce el arco eléctrico o las corrientes inducidas. Ambos equipos gozan de una amplia utilización en la industria aeronáutica.

#### 3.3.1 Métodos de Metalizados por flama de gas

**Metalizado Convencional:** En 1915 el Ing suizo M.B. Shoop propuso por primera vez aplicar un metal fundido por una flama generada por una mezcla gaseosa sobre la superficie de otro metal por medio de un chorro de aire comprimido, de este forma se podían obtener recubrimientos de metales fácilmente fundibles.

En equipos convencionales modernos, el rociado de las partículas metálicas se realiza directamente con el chorro de los productos de la combustión sin el empleo del aire comprimido. La flama producida por la mezcla oxi-acetilénica produce el flujo térmico más intenso en relación a otras mezclas y tienen mucha utilización en la actualidad, sin embargo en la flama de un soplete oxi-acetilénico a temperaturas de 3000°C la combustión transcurre con formaciones de gas carbónico y agua la cual va acompañada de reacciones endotérmicas de disociación:



Esto limita un mayor incremento de la temperatura en la flama, por lo que, no le permite alcanzar la temperatura de fusión de una serie de metales y aleaciones, así mismo siempre se observará la presencia del oxígeno en el chorro del gas que en forma brusca reduce la gama de materiales de aporte a utilizar como los carburos, nitruros y otros metales, no conservando sus propiedades al pasar por un medio oxidante con altas temperaturas.

Los principales parámetros de este método son; velocidad de las partículas de 50 a 100 m/seg. en el momento de impacto, temperatura en el momento del impacto hasta 2000 °C, resistencia al desprendimiento 16-20 MPa, porosidad de 2 a 6%.

El metalizado convencional en función al estado del material de aporte puede ser de tres tipos; con alambre, con varillas y polvos. En los dos primeros casos se alimenta a través de un orificio central del soplete y se esparce en la flama, el chorro de aire comprimido esparce el material fundido en partículas pequeñas, las cuales se precipitan en la superficie base. Los alambres se alimentan por rodillos a velocidad constante, el diámetro de los alambres no superan los 3 mm.

El polvo como material de aporte ingresa al soplete por un orificio y se acelera con el flujo del gas comprimido y en la salida del soplete cae en la flama producida por la mezcla del gas combustible y el oxígeno, donde se esparce. El chorro de gas caliente transporta a las partículas a la superficie base.

Los materiales utilizados para el metalizado por flama de gas son de diferentes aleaciones basándose en níquel y cromo, además en las aleaciones se introduce boro y wolframio. Uno de los componentes más difundidos son: Ni 65 - 80%, Cr de 8 - 20%, B de 2 - 5% y otros (Fe, Si y H) 10 %. Los recubrimiento de aplican en varias pasadas, el espesor del recubrimiento en una pasada puede estar en 0.16 - 0.25 mm.

**Metalizado por detonación;** La detonación es un caso especial de la propagación de la flama, muy cercano a la explosión y en determinadas condiciones alcanza velocidades mayores a la del sonido en el medio que se encuentre. Si encendemos una mezcla explosiva por ejemplo (oxígeno y acetileno) con una chispa eléctrica en un tubo especial preparado o un cañón entonces el frente de llama comenzará a propagarse a través del cañón incrementando su velocidad hasta el momento en que en el gas no surja una onda de detonación. la velocidad de propagación de dicha onda es de 2-4 Km /seg.

Si se le introduce el material de aporte en forma de polvo antes de la formación de la onda de detonación, entonces el flujo altamente acelerado de los gases calientes lo funden y con gran velocidad impacta sobre el material base en forma de recubrimiento.

La velocidad de las partículas del polvo rociado alcanza 600-1000 m/seg. 10 veces más que en el metalizado convencional. La alta

velocidad de desplazamiento del polvo rociado y la alta temperatura que se forma durante la explosión (hasta 4000° C) permite aplicar recubrimientos de materiales con altas temperaturas de fusión sobre las superficies del material base, con una alta calidad y una alta resistencia al desprendimiento (adherencia).

En un metalizado por detonación la resistencia al desprendimiento es de 200 MPa, mientras que en el metalizado convencional la misma resistencia alcanza 20-25 MPa, la velocidad de las partículas a una distancia de 100 mm es de 600-1000 m/seg. la temperatura en el momento del impacto alcanza hasta los 2000°C , porosidad 1 - 6%, el área de deposito por disparo es de 25 mm<sup>2</sup>, el espesor del recubrimiento 0.25 - 0.3 mm, posee una alta productividad para áreas pequeñas. En comparación al método anterior este tiene mayor demanda en los centros de producción y reparación aeronáutica.

Como deficiencias de este método se puede considerar el alto costo de su equipamiento y el excesivo ruido, por lo que requiere de un ambiente especial. Con este método se puede obtener recubrimientos de diferentes durezas tenaces al desgaste y al calor compuestos de carburos de metales con altas temperaturas de fusión.

### 3.3.2 Métodos de Metalizado por corriente eléctrica

Existen una serie de métodos por corriente eléctrica tales como; metalizado por arco eléctrico, metalizado por plasma y metalizado por inducción, de los cuales solo analizaremos el metalizado por plasma.

**Metalizado por plasma:** El plasma es el gas que contiene más del 1% de moléculas en estado iónico, en el cual la cantidad de iones



positivos debe ser igual a la cantidad de electrones y iones con carga negativa. Si se calienta el gas a temperaturas mayores de 10,000 °C entonces el gas pasará al estado plasma.

El metalizado por plasma goza de una amplia aceptación en la industria aeronáutica y centros de reparación. Los recubrimientos por plasma de molibdeno, wolframio, óxidos y uniones de metales con altas temperaturas de fusión permitieron resolver una serie de problemas técnicos relacionados al incremento de la resistencia al desgaste, al fuego, a las altas temperaturas y otras propiedades, además posee una alta conductividad eléctrica.

El detalle de este método consiste en crear una fuente de calor que permita elevar la temperatura del gas sobre los 10,000 °C como es conocido, en el eje del arco eléctrico la temperatura alcanza los 6,000 – 7,000 °C, la dificultad de incrementar la temperatura de este arco consiste en que al aumentar la potencia de la fuente eléctrica se incrementa la columna del arco haciendo disminuir su resistencia y la densidad de corriente tiende a permanecer constante.

Si este arco eléctrico se hace pasar a través de una boquilla refrigerada y al mismo tiempo introducir gas, entonces el arco eléctrico se contrae, es decir se produce una compresión térmica de la columna de dicho arco, lo que a su vez aumenta la acción de compresión de su campo magnético. Como resultado se incrementa la tensión de la carga del campo eléctrico y en consecuencia la potencia eléctrica.

Esto permite que la temperatura en el eje del arco de incremente hasta alcanzar valores que caracterizan la formación del plasma es decir mayores a 20,000°C.

Para la aplicación de una serie de recubrimientos por plasma se utilizan sopletes especiales para plasma y potentes generadores de energía eléctrica. El soplete para plasma diferencia solo por el estado en que se encuentre el material de aporte ("polvo, alambre o barra), dichos sopletes están provistos de electrodos (metales con alta temperatura de fusión) como el wolframio, circonio etc. que cumplen la función de cátodos y una boquilla cilíndrica de cobre refrigerada, que sirve de ánodo en caso de ser polvo el material de aporte. Si se usa alambre o barras como material de aporte, entonces éstos servirán de ánodos.

En la cámara de carga se introduce a presión el gas que se transformará en plasma, los más comunes son el argón, helio, nitrógeno, hidrogeno y sus mezclas. Este gas ingresa a alta velocidad se a remolina la cámara de descarga dirigiéndose a la boquilla, con esto comprime el arco eléctrico y refrigera el electrodo y la boquilla. El otro gas que también se introduce a la cámara de descarga y que se usa para transportar el material de aporte en forma de polvo es el nitrógeno como un gas barato, inerte y seguro.

Sus principales parámetros: temperatura en el momento del impacto hasta 3800 °C, velocidad a una distancia de 100 a 300 mm 500 m/seg., resistencia al desprendimiento 37 Mpa, porosidad 7.7 a 13%.

### **3.4 FUNDAMENTACION DE LA ELECCION DEL MATERIAL PARA LA RECUPERACION DE LAS SUPERFICIES DESGASTADAS DE LOS SEGMENTOS**

*En la actualidad los segmentos del estator de la turbina del motor PT6A en el proceso de operación no se reparan sino que se desechan.*

Tabla 2

Alabe del disco de turbina pre- maquinado (pulgadas)	Clase de Segmento recomendado	Dimensión del Alojamiento de segmento  (A)	Alojamiento de Segmento antes de esmerilado (pulgadas)	
			Min	Max
8.556(max)	Clase 1	0.042-0.043	8.575	8.581
8.550	Clase 2	0.045-0.046	8.569	8.575
8.544	Clase 3	0.048-0.049	8.563	8.569
8.538	Clase 4	0.051-0.052	8.557	8.563
8.532	Clase 5	0.054-0.055	8.551	8.557
8.526	Clase 6	0.057-0.058	8.545	8.551
8.520	Clase 7	0.060-0.061	8.539	8.545
8.512(min)	Clase 8	0.069-0.072	8.521	8.527
	Clase 9	0.079-0.083	8.501	8.507
		0.079-0.083		

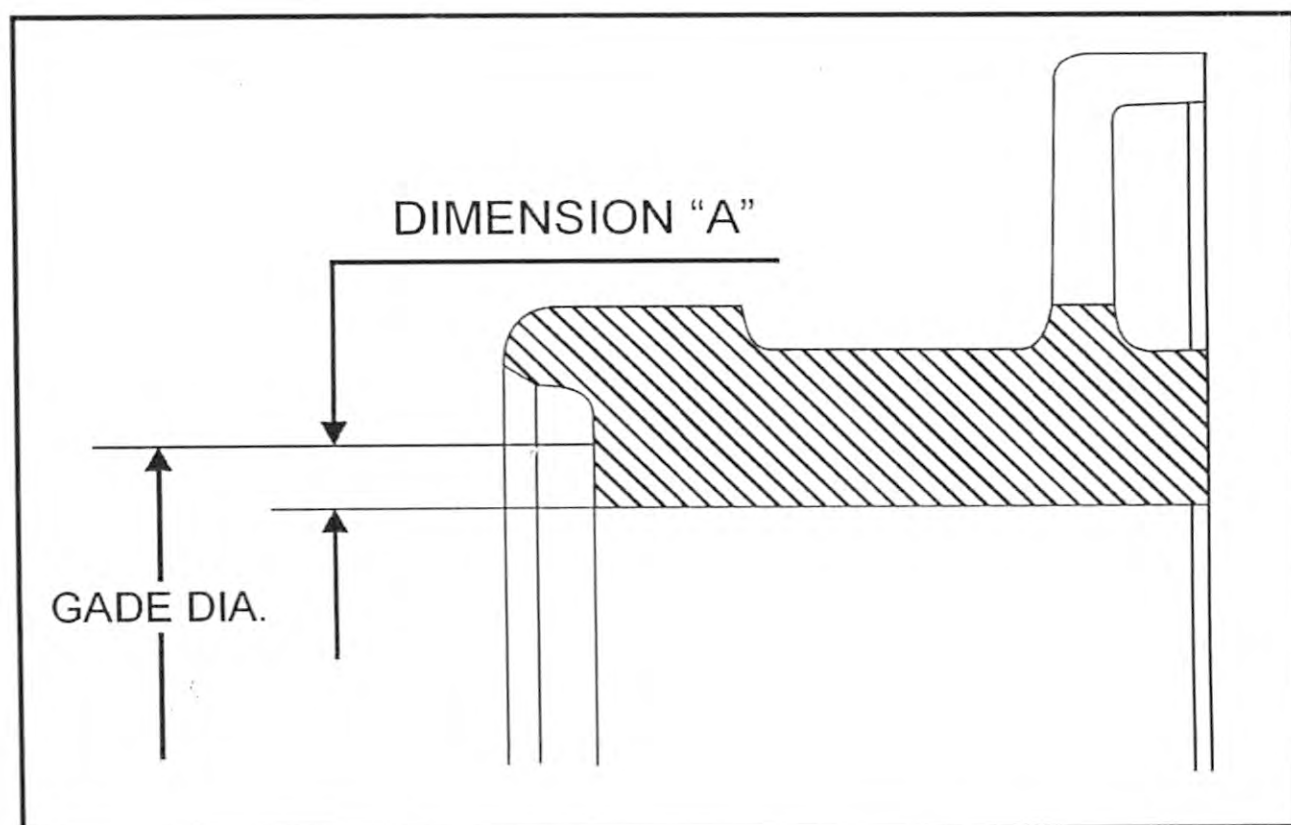
Note: If blade tip clearance exceeds specified limits after removing eccentricity on shroud segments, select next class ( thicker ) segments and grind as necessary.

Minimum grind to remove ovality only. Minimum thickness of shroud segment after grinding on assembly is 0.0055 in.

**Traducción:**

Si la luz de la punta del álabe excede los límites especificados después de remover la excentricidad sobre los alojamientos de los segmentos, seleccione la siguiente clase (más gruesa) de segmentos y esmerile como sea necesario.

Esmerile el mínimo para remover solamente la ovalidad, el grosor mínimo del alojamiento del segmento después de esmerilar sobre el conjunto es 0.0055 pulgadas.



**Fig. 9** Clasificación de los segmentos de la turbina del compresor

La gran resistencia mecánica y la alta temperatura de fundición del níquel (1454° C), garantizan la resistencia térmica del material sellante. En el intervalo de temperaturas (-253° C hasta 1000° C), el níquel posee alta plasticidad, lo que asegura el asentamiento de las puntas de los álabes de la turbina en el proceso de operación.

Las propiedades químicas del níquel se determinan por su alta resistencia corrosiva en la atmósfera del aire, del flujo gaseoso y en una serie de medios químicos agresivos. La resistencia contra la oxidación del níquel en el intervalo de temperatura de hasta 800°C es muy alta, el coeficiente de dilatación térmica del níquel no varía en el margen de temperaturas de 200 a 1000 °C y es muy parecido al coeficiente de dilatación térmico del material del segmento del estator de la turbina.

Como los materiales compuestos de polvo son una composición del motor con lubricante sólido (por ejemplo Ni + lubricante sólido), entonces es indispensable elegir el lubricante sólido específico.

De los lubricantes sólidos existentes se propone el grafito (**GOH4428-48**), ya que el posee una alta resistencia química a altas temperaturas.

Para obtener recubrimiento de alta calidad, el polvo del grafito se desengrasa con una solución de trifosfato de sodio con una concentración de 25-30 Gr/L a una temperatura de 80°C, la duración del desengrasado es de 15 a 20 minutos (con mezclado).

La solución para la niquelación química tiene la siguiente composición (en Gr):

Sulfato de níquel	20 a 30
Sulfato de armenio	45 a 60
Hipofosfito de sodio	20 a 30
Alichek	15 a 20

El proceso de precipitación del níquel sobre las partículas del grafito se efectúa durante un PH de 8 a 10, con una temperatura entre 80 y 90°C y una velocidad de 55 a 60  $\mu\text{m}/\text{Hora}$ .

El alichek se añade a la composición de la solución en calidad de estabilización y es un extracto líquido de cebolla.

Como resultado de las precipitaciones química se obtiene polvos compuestos tipo cápsulas.



**Fig. 11** Partículas de Grafito, plaqueados con el método de Precipitación Química

### 3.6 DESCRIPCION TECNICA DEL EQUIPO DE DETONACION

#### A. Los Informes Generales

La aspersion representa en sí el proceso, de aplicación de un revestimiento sobre la superficie de las piezas con la ayuda de chorro de alta temperatura que sostiene a las partículas de polvo o gotas de material fundido en aspersion, que se depositan sobre el metal básico durante la fuerza de impacto con la superficie.

La Tecnología de aspersion existe en dependencia de la fuente de la energía térmica empleable y se puede dividir en dos tipos principales:

- Aspersion por llama de gas
- Aspersion eléctrica.





- 1.- Tobera para el suministro de oxígeno
- 2.- Tubo de refrigeración por agua
- 3.- Cámara de combustión / explosión/
- 4.- Tobera para suministro de propano
- 5.- Material básico /soporte/
- 6.- Bujía para encendido de la mezcla
- 7.- Revestimiento

A través del agujero especial dentro de la cámara con argón como vehículo transportador se suministra el polvo de material de aporte (B). Concorre la mezcla gaseosa, en la cual en estado de suspensión se encuentra el polvo de material de aporte, se encuentra con la chispa eléctrica (C). Como resultado de la explosión de la mezcla sucede la energía calorífica y una onda en la cual se dispersan las partículas del polvo y se proyectan en dirección hacia la superficie del artículo (D).

El Proceso se regula de tal manera que la precisión se repite con una frecuencia adecuada ( 4,5,6,8,10 ) de ciclo por segundo. En un ciclo de aspersión se obtienen el revestimiento de espesor 6  $\mu\text{m}$  (micrón).

La alta velocidad de movimiento de las partículas y su calentamiento durante la aspersión de detonación aseguran la obtención de revestimientos de alta densidad y la resistencia de cohesión con la base. El proceso no afecta térmicamente al material base. Esto excluye su deformación y el cambio físico de la estructura de la capa superficial de las piezas de tratamiento.

La densidad en los revestimientos de detonación es en cantidad porcentual igual o mayor al 98 %; la resistencia de cohesión durante la ruptura alcanza 200  $\text{MN/m}^2$

En dependencia de las condiciones del servicio industrial de los revestimientos de detonaciones se puede dividir en tres tipos:

- Resistente al desgaste.
- Resistente al juego.
- Resistente a la corrosión.

La resistencia al desgaste de los revestimiento esta dada por las aleaciones duras en base de carburos de cromo, titanio y tungsteno. Estas aleaciones sostienen la cantidad de enlace 8-30 % de cobalto, níquel o cromo. A medida de incremento de obtención del enlace metálico se logra aumentar la viscosidad del revestimiento con alguna disminución de la dureza y resistencia al desgaste. Los revestimientos de las aleaciones duras poseen alta estabilidad hacia el desgaste de erosión y por abrasión.

La resistencia al juego de los revestimientos, la proporcionan generalmente los carburos de cromo u óxido de magnesio u óxidos de aluminio en enlaces de níquel o nicromio, de las uniones níquel aluminio, de las oxidaciones simples como óxido de aluminio, óxido de cromo, bióxido de titanio y sus mezclas.

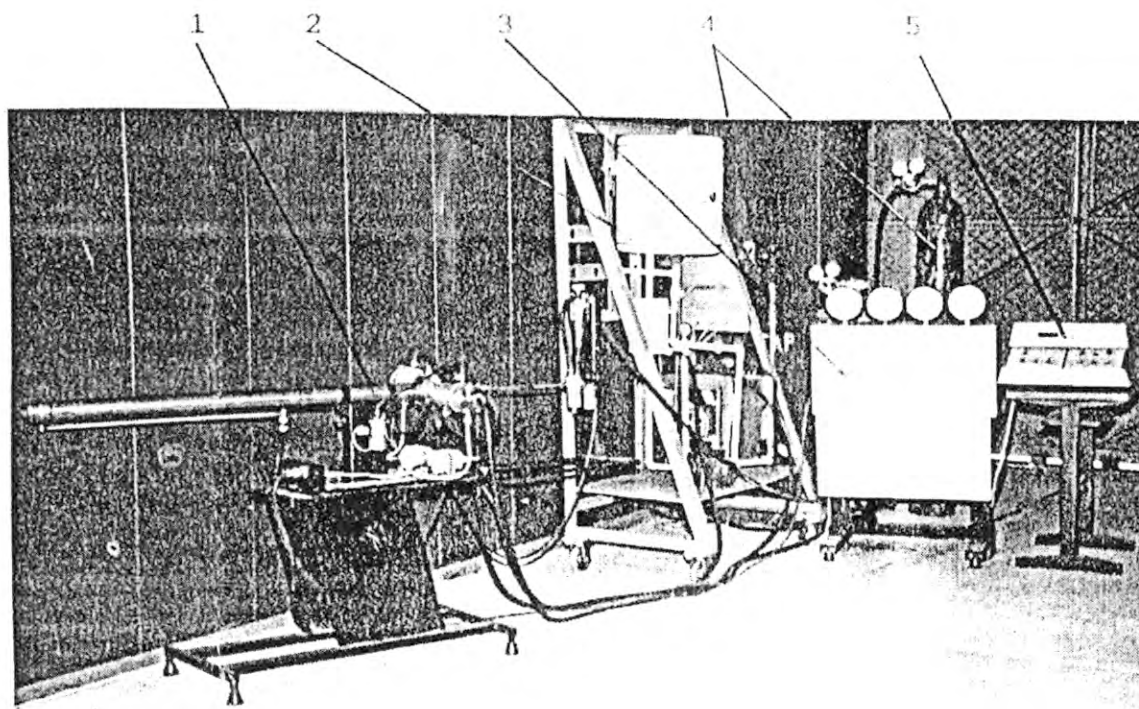
La resistencia a la corrosión de los revestimientos, se logra principalmente, con los metales como: níquel, nicromio, molibdeno, aluminio. Las partículas de los polvos metálicos en cualquier revestimiento, crean una película de óxido en los metales referidos que se dispersan en la capa del revestimiento, mejorando sus propiedades anticorrosivas.

## B. Principales Características Técnicas del Equipo de Detonación.

Tabla 03

No.	Denominación de parámetros	Magnitud	
-----		-----	
1. -	Los gases operativos: propano + oxígeno : $C_3H_8 + O_2$		
2. -	El medio tecnológico: argón, agua		
3. -	El consumo de gases, $M^3 / hra$		
	Oxígeno	0,09	- 1,65
	Propano	0,03	- 0,06
	Argón	0,04	- 0,08
4. -	El consumo de agua, $M^3 / hra$ .	0,05	- 0,09
5. -	La presión necesaria de los medios suministrables en los canales principales :		
	Oxígeno	0,4	
	Propano	0,2	
	Argón	0,05	
	Agua	0,2	
6.-	El diámetro del sector de dispersión del tubo , <b>mm</b>	22	
7. -	La velocidad de tiro, <b>disparo / seg.</b>	4-9	
8. -	El espesor de revestimiento formulado tras de 1 disparo, <b><math>\mu m</math></b> (micrón)	5-8	
9. -	El consumo de polvo de aspersión, <b>gr. / disparo</b>	0,05 - 0,1	
10. -	El coeficiente de empleo del polvo, %	40	
11. -	La tensión de alimentación, <b>V</b>	220	
12. -	La frecuencia, <b>Hz</b>	50 - 60	
13. -	La potencia consumible, <b>VT</b>	no más	de 100
14. -	El nivel de la presión de sonido en una distancia de 1 m desde el corte del tubo , <b>DB</b>		150

### C. Construcción del Equipo de Detonación

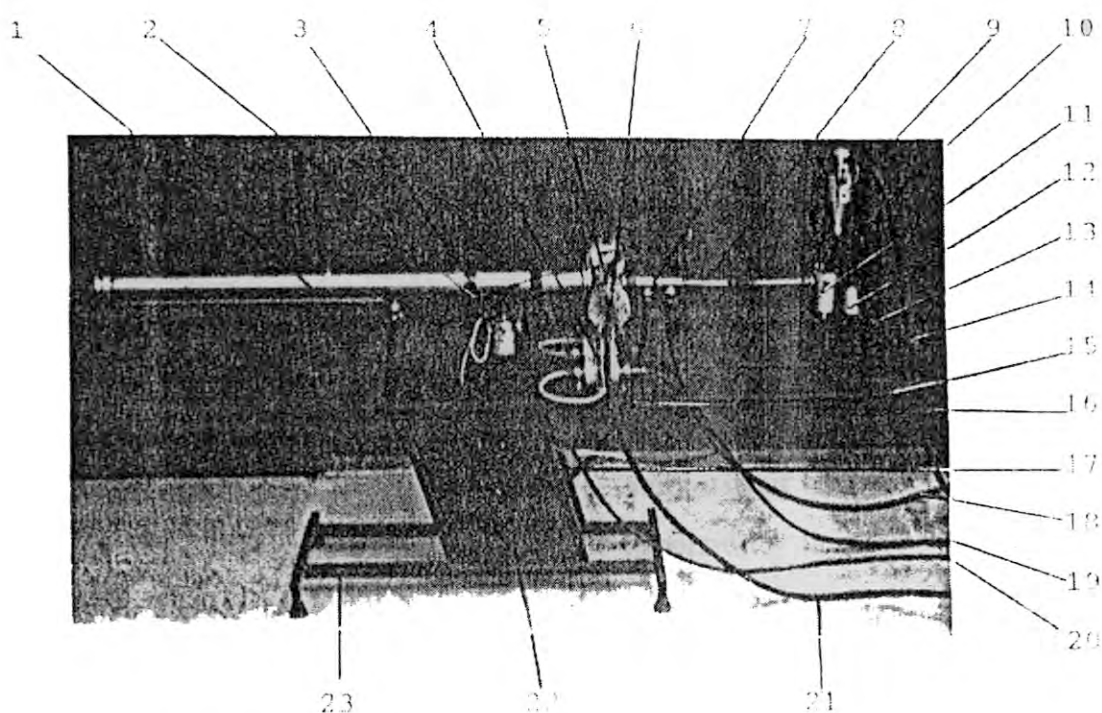


**Fig. 13**      **Equipo de Detonación**

1. - Cañón
2. - Sistema de refrigeración por agua
3. - Panel de gas
4. - Balones de gases/oxígeno, propano, argón
5. - Panel de Control

El equipo de detonación consta de los siguientes mecanismos:

- **El cañón** .- En el cual ocurre el proceso de formación de las ondas de detonaciones, la energía cinética que se emplea para la aplicación de los materiales de polvos en la superficie de las piezas de restablecimiento.
- **El sistema de refrigeración** por agua del equipo de detonación para mantener el régimen de temperatura adecuada.
- **El panel de gases** esta destinado para la regulación de la presión y flujo de los gases operativos.
- **De los balones** para los gases operativos de propano, oxígeno y gas transportador (argón).
- **Panel de control** esta destinado para el control de distancia del proceso de aspersión de detonación.



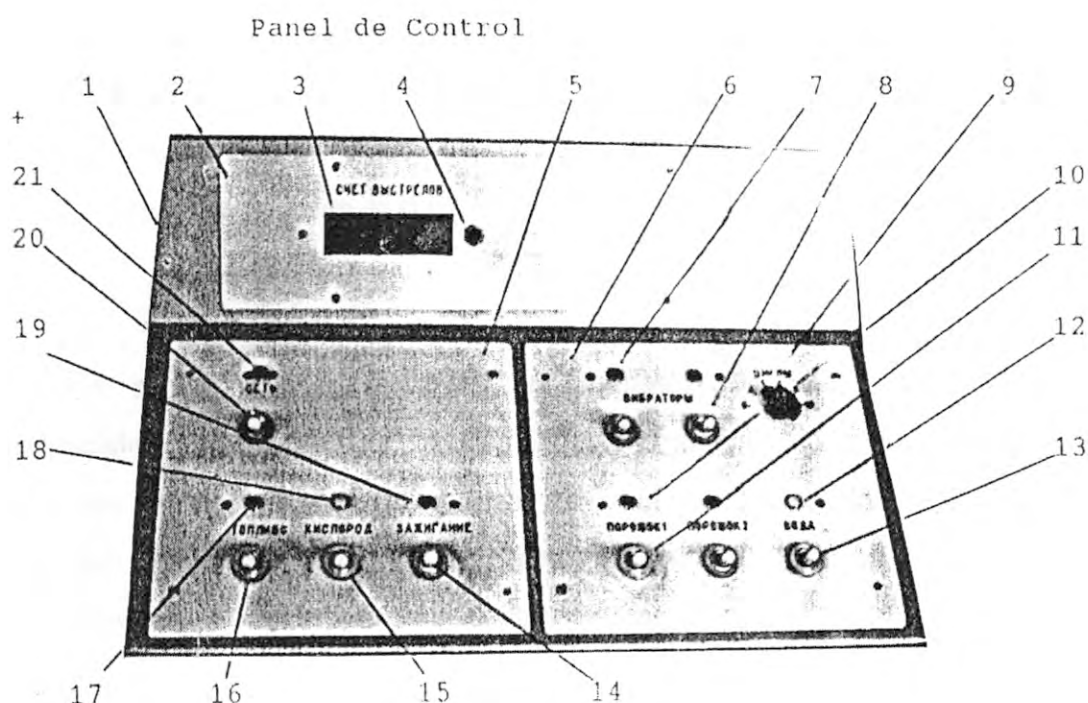
**Fig. 14 El cañón del Equipo de Detonación**

- 1.- Tubo de refrigeración por agua
- 2.- Abrazaderas de fijación
- 3.- Bobina
- 4.- Filtros
- 5.- Bujía de encendido
- 6.- Filtros
- 7.- Adaptador
- 8.- Tubo
- 9.- Recipiente
- 10.- Soporte
- 11.- Dosificador de polvo
- 12.- Vibrador
- 13.- Soporte
- 14.- Manguera
- 15.- Conjunto móvil
- 16.- Conjunto estacionario)
- 17.- Base
- 18.- Manguera
- 19.- Manguera
- 20.- Conductor eléctrico
- 21.- Manguera
- 22.- Bloque de encendido
- 23.- Base metálica principal.

En el interior del tubo de refrigeración por agua (1) esta ubicada la cámara de explosión, en el cual al mismo tiempo se suministran los gases operativos en las cantidades correspondientes, el polvo de aspersion y la chispa eléctrica para encender la mezcla de gas. Las abrazaderas (2) están destinados para la fijación del tubo hacia la base (17).

La Bobina (3) genera corriente de alta tensión y esta asegurado con la abrazadera para la cuña de la base (1,7). Los filtros cerámicos-metálicos (4) están colocados en el sistema de alimentación de gas de la cámara de explosión. Los filtros precautelan (resguardan) la penetración de la llama para el sistema de gas en el caso de un posible retroceso de llama dentro de la cámara de explosión. La bujía eléctrica (5) esta colocado en el cuerpo de la cámara de explosión y destinado para la inflamación de la mezcla gaseosa. Los filtros (6) están ubicados en forma sucesivos con las cerámicas metálicos dentro el sistema de alimentación gaseosa de la cámara de alimentación y protege al sistema de gas de la penetración de llama en el caso de la posibilidad de revelación del golpe de retorno dentro la cámara de explosión. El adaptador (7) sirve para suministrar el agua refrigerante para el cabezal de la cámara de explosión. El tubo (8) esta destinado para suministrar el polvo de aspersión desde el dosificador (11) para la cavidad de la cámara de explosión. El recipiente (9) esta hecho herméticamente y destinado para rellenar el polvo de aspersión. El soporte (10) empalma el recipiente (9) con el (13). El dosificador de polvo (11) suministra el polvo de aspersión en la zona de la cámara de explosión. El vibrador (12) se fija en el dosificador de polvo y destinado para el suministro uniforme del polvo. El soporte (13) esta enlazado rígidamente con el bastidor movable (15) y sirve para la fijación en el soporte de dosificador y soporte de fijación de recipiente. La manguera (14) se empalma al recipiente y al dosificador y sirve para suministrar el gas transportable - argón.

El bastidor movable (15) se fija en el bastidor inmóvil (16). Al bastidor se fija el soporte (13). El bastidor inmóvil (16) esta enlazado entre la cuña de fijación del tubo y con la base (17). La base (17) esta colocado y fijado en el bastidor (23). Por la manguera (18J) se suministra el gas operativo - propano. La manguera (19) esta destinado para suministrar el oxidante- oxígeno. El haz de cable (20) se empalma el panel de control con el bloque de formación de chispa. La manguera (21) esta destinado para la salida de agua refrigerante desde el sistema del equipo. En la caja (22) esta fijado el bloque de formación de chispa. Por la manguera (24) se suministra agua para refrigeración de sistema del equipo.



**Fig.15** Panel de Control

- 1.- Cuerpo
- 2.- Panel delantero
- 3.- Controlador de disparos
- 4.- Botón de descarga
- 5.- Panel izquierdo
- 6.- Panel derecho
- 7.- Lámparas de vibraciones
- 8.- Interruptores de vibraciones
- 9.- Conmutador de frecuencia de disparos
- 10.- Suministro en polvo
- 11.- Interruptores de suministro de polvo
- 12.- Lámpara de conexión de agua de refrigeración
- 13.- Interruptor de conexión de agua de refrigeración
- 14.- Interruptor de conexión de encendido
- 15.- Interruptor de conexión de oxígeno

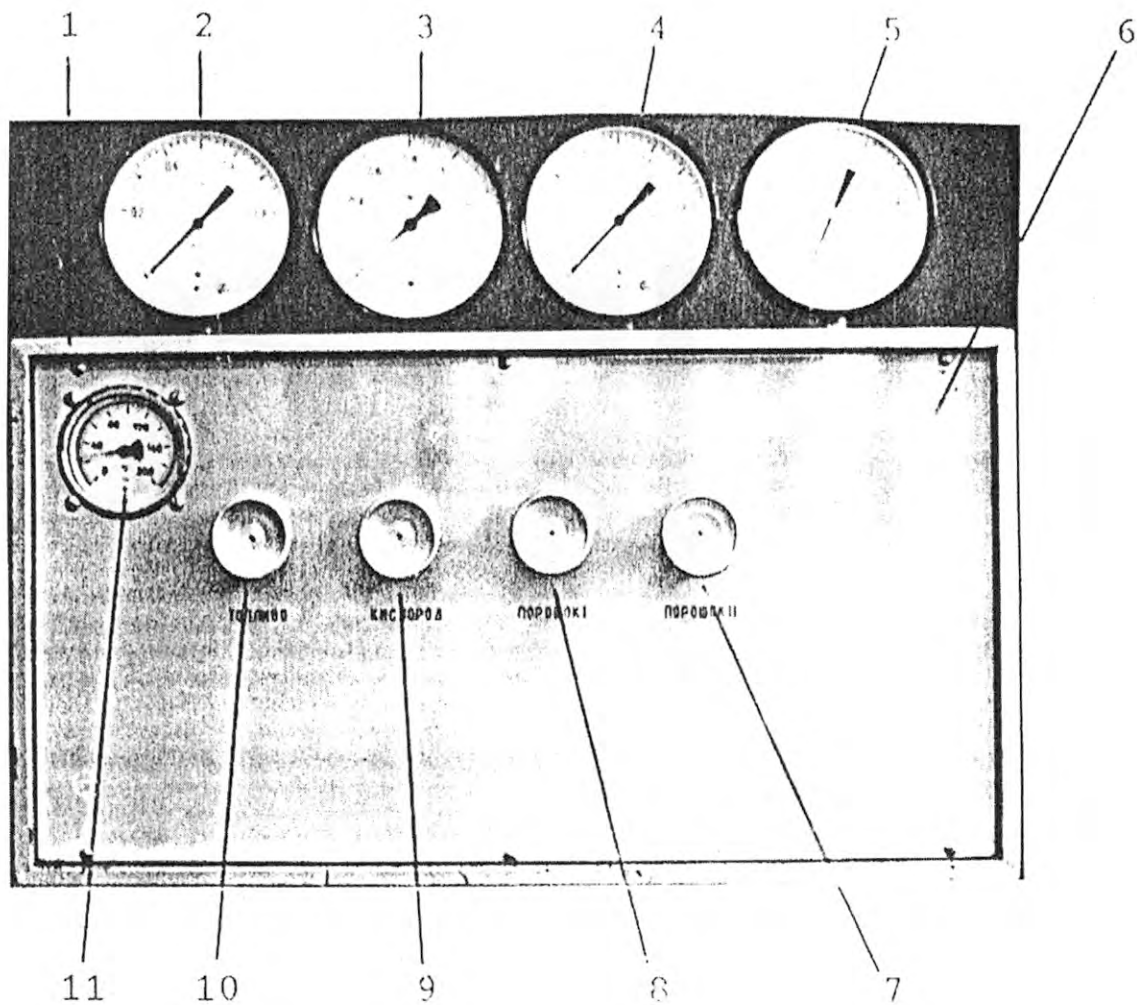


- 16.- Interruptor de conexión de propano
- 17.- Lámpara de conexión de propano
- 18.- Lámpara de conexión de oxígeno
- 19.- Lámpara de conexión de encendido
- 20.- Interruptor de conexión de la red eléctrica general
- 21.- Lámpara de conexión de la red eléctrica.

En el cuerpo (1) están: el transformador de baja tensión el estabilizador para suministro de tensión 5V para el generador de impulsos; que suministra los impulsos con una frecuencia adecuada para el bloque de formación de chispa; contadores de impulsos. En el panel posterior del cuerpo está ubicados dos fusibles (2A y 5A); así mismo el alambre de conexión hacia la red eléctrica de tensión de 220 voltios.

En el panel delantero (2) está el contador de impulsos (3) y el botón (4) de descarga de impulsos. En el panel izquierdo (5) están: el interruptor (20) de conexión de alimentación de 220 V y la Lámpara de conexión (21); el interruptor (16) de conexión de la válvula electromagnética de suministro de gas operativo de propano y la Lámpara de señal (17); el interruptor (15) de conexión de la válvula de suministro de oxidante de oxígeno y la Lámpara de señal (18); el interruptor (14) de conexión de encendido y la Lámpara de señal (19).

En el panel derecho están: los interruptores (8) de conexión de los vibradores de los clasificadores de polvos y las Lámparas de señales (7); el conmutador de frecuencia de impulsos (9); los interruptores (11) de conexiones de válvulas electromagnéticas de suministro de gas transportable de argón y las Lámparas de señales (10); el interruptor (13) de conexión del sistema de refrigeración por agua de equipo Lámpara de señal (12).



**Fig. 16 Panel de Gases**

- 1.- Cuerpo
- 2.- Manómetro de combustible
- 3.- Manómetro de oxígeno
- 4, 5.- Manómetro de gas transportable de argón
- 6.- Panel delantero
- 7,8.- Llaves de reductores de gas transportables de argón
- 9.- Llave de reductor de oxígeno
- 10.- Llave de reductor de combustible de propano
- 11.- Indicador de temperatura de agua en el equipo

En el interior de cuerpo están las válvulas electromagnéticas, que están unidas con los reductores. Durante la conexión de la válvula electromagnética el gas ingresa desde el balón a través el reductor para el cañón.

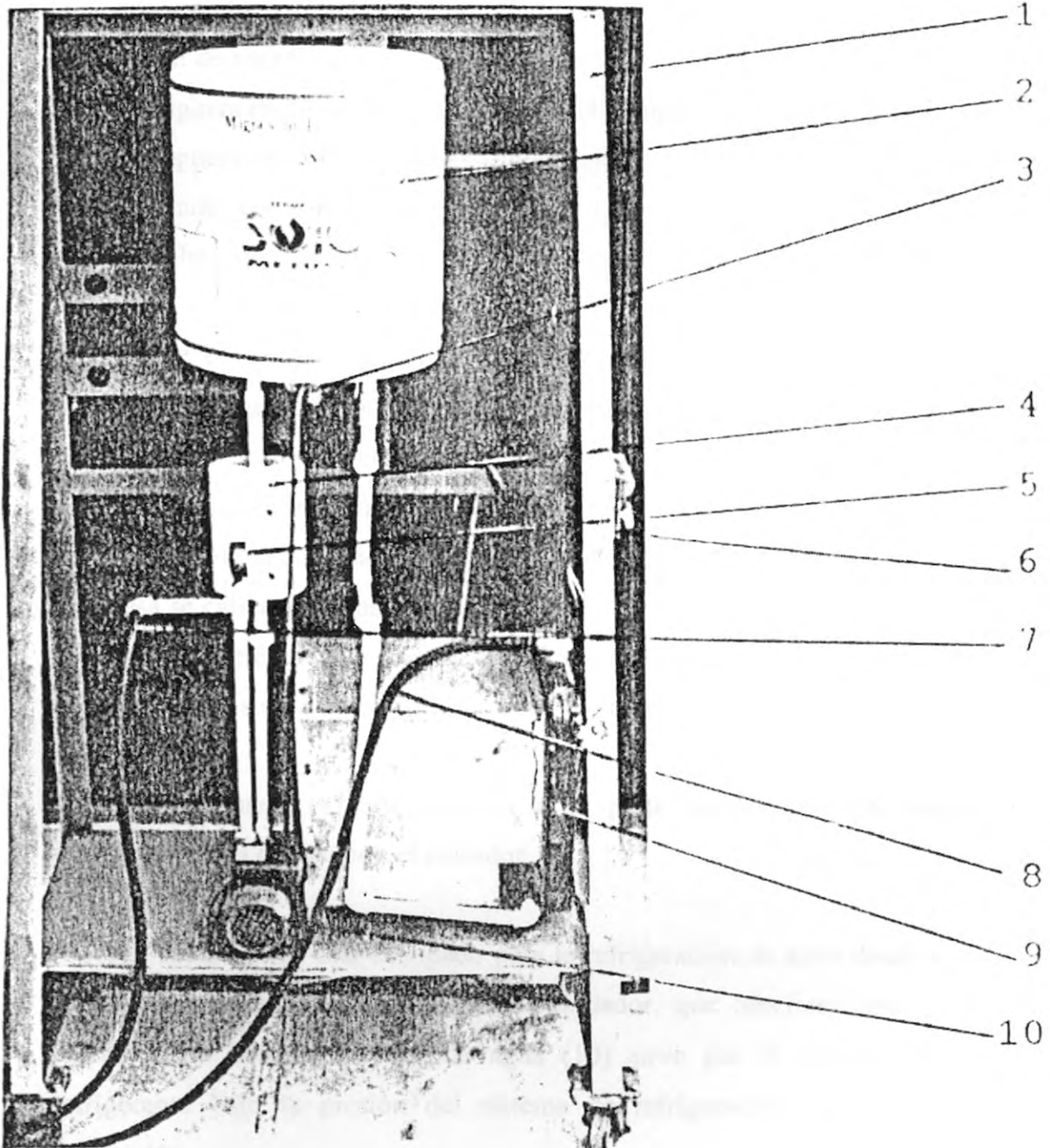


Fig. 17 Sistema de refrigeración por agua

- 1- Bastidor
- 2- Tanque térmico
- 3- Regulador térmico
- 4- Deposito de calentamiento
- 5- Manómetro
- 6- Panel de control
- 7- Manguera de suministro de agua para el equipo
- 8- Manguera de salida de agua desde el equipo
- 9- Radiador con el motor eléctrico
- 10- Bomba eléctrica de agua.

Sobre el bastidor (1) están asegurados todas las piezas y accesorios del sistema de refrigeración por agua. El recipiente térmico (2) con una capacidad de 40 litros sirve para el calentamiento preliminar de agua. El regulador térmico (3) se colocan para la temperatura adecuada y mantiene su constancia. En el interior del depósito (4) se encuentra el serpentín, confeccionado del tubo (le cobre, por el cual pasa se calienta, el gas transportable. El manómetro (5) muestra la presión de agua y motor eléctrico del ventilador. La manguera (7) se empalma a la parte impelente del sistema de refrigeración con el equipo.

La manguera (8) se empalma a la parte de bombeo del sistema de refrigeración del equipo con el radiador .

El radiador (9) esta destinado para la refrigeración de agua desde el equipo saliente. El radiador se sopla con el ventilador, que funciona desde el motor eléctrico. La bomba eléctrica de agua (10) sirve par el suministro de agua refrigerante bajo la presión del sistema de refrigeración para el equipo de detonación.

## Los balones de gases

Los balones de gases están destinados para la transportación, el almacenamiento y empleo de los gases: oxígeno, propano, argón. Cada balón esta equipado con reductor que tienen los manómetros. Los balones son colocados en forma separada dentro el bastidor y se empalman con el panel de gas con sus respectivas mangueras.

## El esquema del panel de Control eléctrico

(Ver FIG. 18)

En el panel izquierdo de panel de control (1) están montados los interruptores, las lámparas de señales y la resistencia de conexión "red" , "combustible", "oxígeno" "encendido".

Estando el interruptor conectado "red" 220V, 50 Hz / la tensión alterna se suministra para el transformador (2). Desde el transformador se retira la tensión alterna de 10V, 24V, 250V.

La tensión alterna de 10V alimenta el estabilizador de tensión (3); la tensión alterna de 24V se suministra 3 través el rectificador para el esquema eléctrico; la tensión de 250V es por las cuchillas 7 y 8 WP se suministra para el bloque de formación chispa, ubicado en el cuerpo del bastidor inmóvil del equipo de detonación.

El estabilizador de tensión (3) esta destinado para el suministro de la tensión de pulsación + 5V para el generador de impulsos (4), para el contador de impulsos (5).

El generador de impulsos (4) esta destinado para generar impulsos controlados que suministra al bloque de formación de chispa. :

El contador de impulsos (5) esta colocado en el panel delantero de panel de control y destinado para registrar la cantidad de impulsos por segundo.

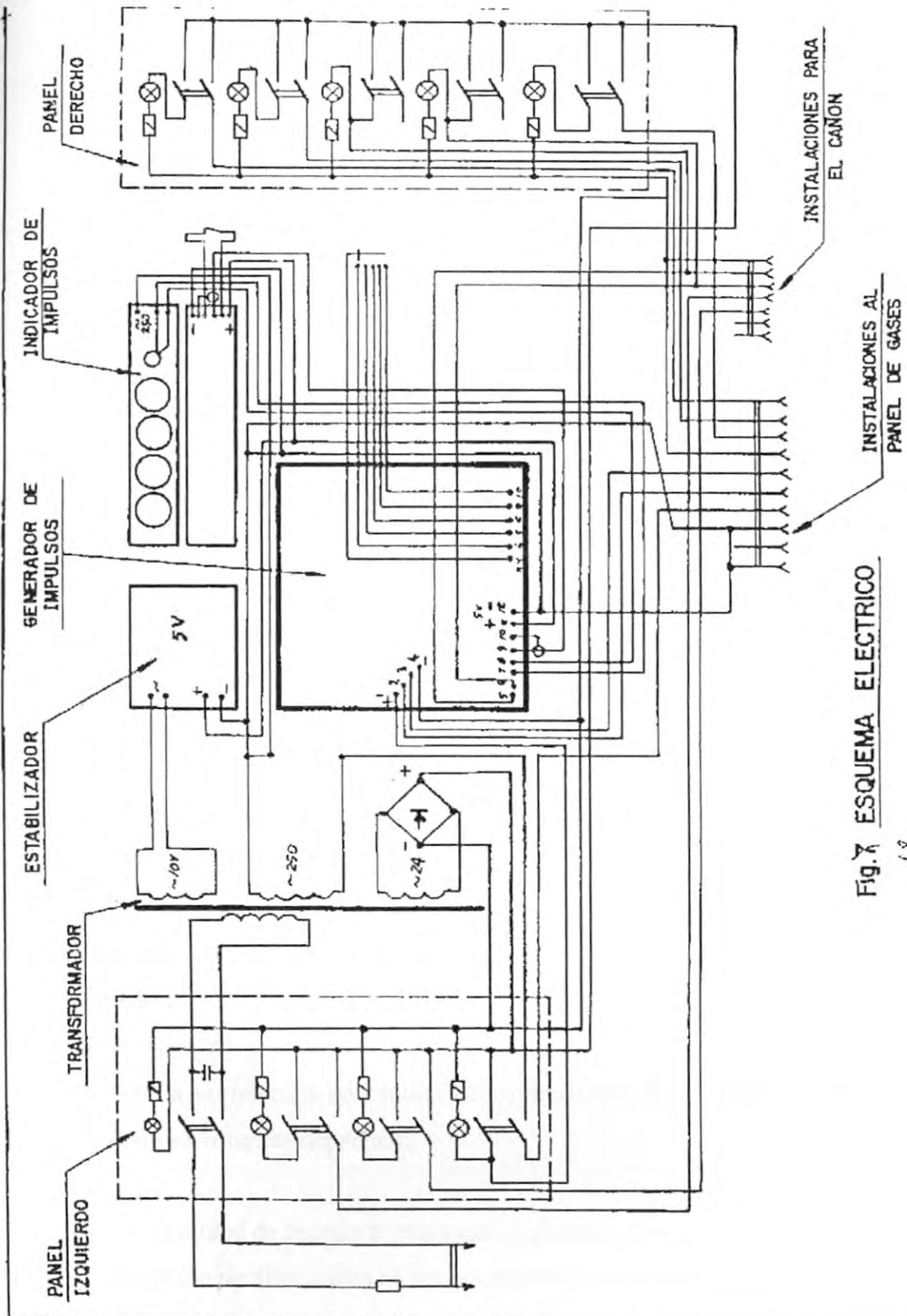


Fig. 7 ESQUEMA ELECTRICO

18

Fig. 18 Esquema Eléctrico

Sobre el panel derecho (6) están los interruptores, las lámparas de señales y la resistencia de conexión: "Vibrador -1", "Vibrador -2", "Polvo -1", "Polvo-2" y "Agua". El enchufe (7) esta destinado para el empalme del esquema eléctrica del panel de control con el esquema eléctrico del panel de gas. El enchufe (8) esta destinado para el empalme del esquema eléctrico de panel de control con el esquema eléctrico del bloque de formación de chispa y el vibrador, están sobre el equipo de detonación.

#### **D. La Tecnología de Aspersión de Detonación de los Revestimientos**

El método de metalizado por detonación para revestimientos especiales se realiza en forma sucesiva la realización de las siguientes operaciones, que componen el ciclo único de metalizado por detonación (Disparos del cañón).

- Abastecimiento de la mezcla de gases hacia cámara del cañón del equipo de detonación.
- El suministro del material de metalizado.
- El cebado de gas explosivo de la mezcla en el tubo.

La composición de la mezcla explosiva y el grado de llenado del tubo influyen sustancialmente para las características energéticas de los productos de detonación.

De la correlación porcentual de combustible, de oxidante y diluyente, así mismo de su volumen dependen:

- La cantidad de energía térmica que se generan durante la detonación.
- El grado de disociación de los productos de detonación.
- La actividad química de los productos de detonación según la relación para el material de aspersión.
- La temperatura y la velocidad del proceso de metalizado desde el cañón del equipo.



Algunas de las características de ignición y explosión de las mezclas de gases su diferente composición están en la Tabla 2.

El revestimiento que se obtiene por el método de detonación es de resultados ampliamente satisfactorios en lo concerniente a sus caracteres estructurales. Tiene tres tipos de límites de interfases:

- Límites entre las partículas deformadas
- Los límites entre las capas, obtenidos durante los disparos discontinuos
- Límite de revestimiento que separa la capa base.

Durante la formación de los límites con la capa base tiene lugar un empalme en la fase dura de los diferentes materiales según la composición. Además, el enlace entre las partículas de aspersión y la superficie revestible se establece durante la observación de las condiciones energéticas determinadas.

La actividad intensiva del proceso durante la aspersión de detonación da la posibilidad del grado de interacción en el límite revestimiento

### **3.7 PROCESO TECNOLÓGICO DE RECUPERACION DE LA CAPA SELLANTE DEL MATERIAL DEL SEGMENTO DEL ESTATOR DE LA TURBINA DEL MOTOR PT6A**

#### **A. Determinación de la Resistencia de Adhesión.**

Los recubrimientos aspersidos deberán poseer una resistencia necesaria de adhesión con el material base, una resistencia al desgaste, a las altas temperaturas y/o otras propiedades. La principal características de los recubrimientos aspersidos es la resistencia de adhesión con el material base.

Durante la aspersión el nivel de las propiedades del recubrimiento obtenido depende del régimen y de la técnica de la aspersión.

En la figura 19 se muestra la variación de la resistencia de adhesión en función a la distancia de la aspersión.

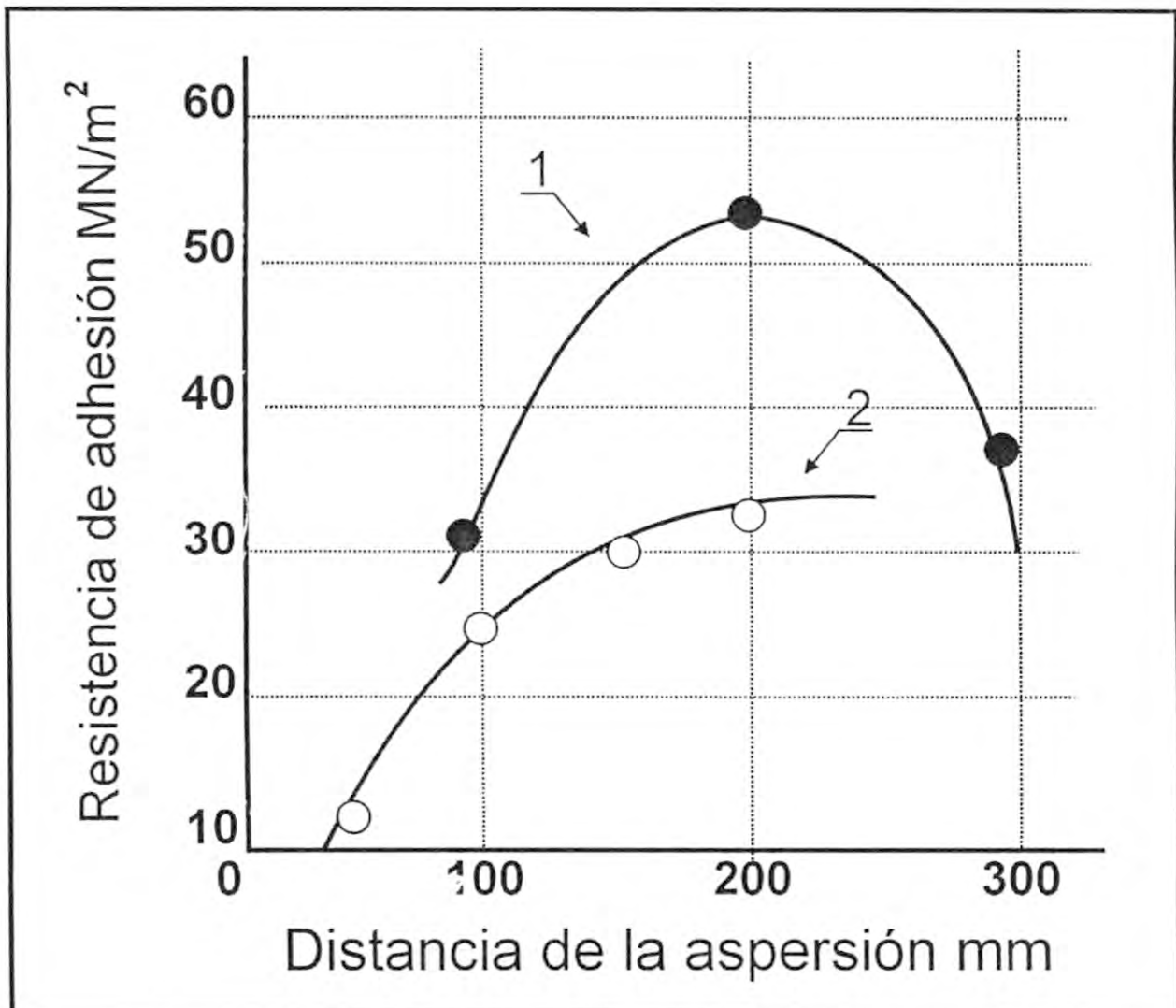


Fig. 19 Variación de la Resistencia de Adhesión de los Recubrimientos aspersados en función a la distancia de la Aspersión con el Método de Detonación. Relación del Oxígeno con el acetileno en la mezcla de trabajo:  
 1. - 1 a 1    2. - 1,4 a 1.

La máxima resistencia mecánica se observa a una distancia de aspersión igual a 200 mm. Esto se puede explicar evidentemente por que la velocidad del vuelo de las partículas en esta distancia (para una relación determinada del oxígeno con el acetileno), tiene un máximo valor.

En la figura 20 se muestra la influencia del espesor del recubrimiento sobre la resistencia de adhesión.

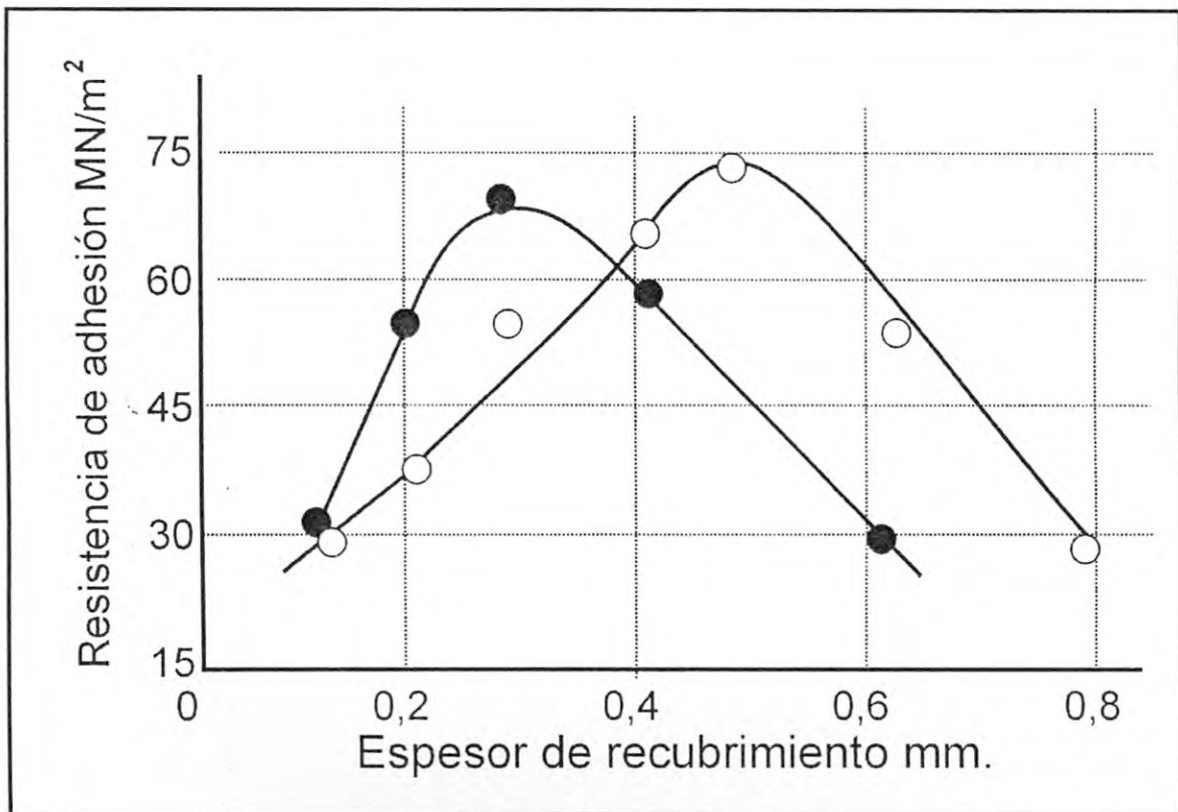


Fig. 20 Variación de la resistencia de Adhesión de los Recubrimientos aspersidos en función al espesor del recubrimiento. Distancia de Aspersión 1. - 150 mm 2. - 50 mm.

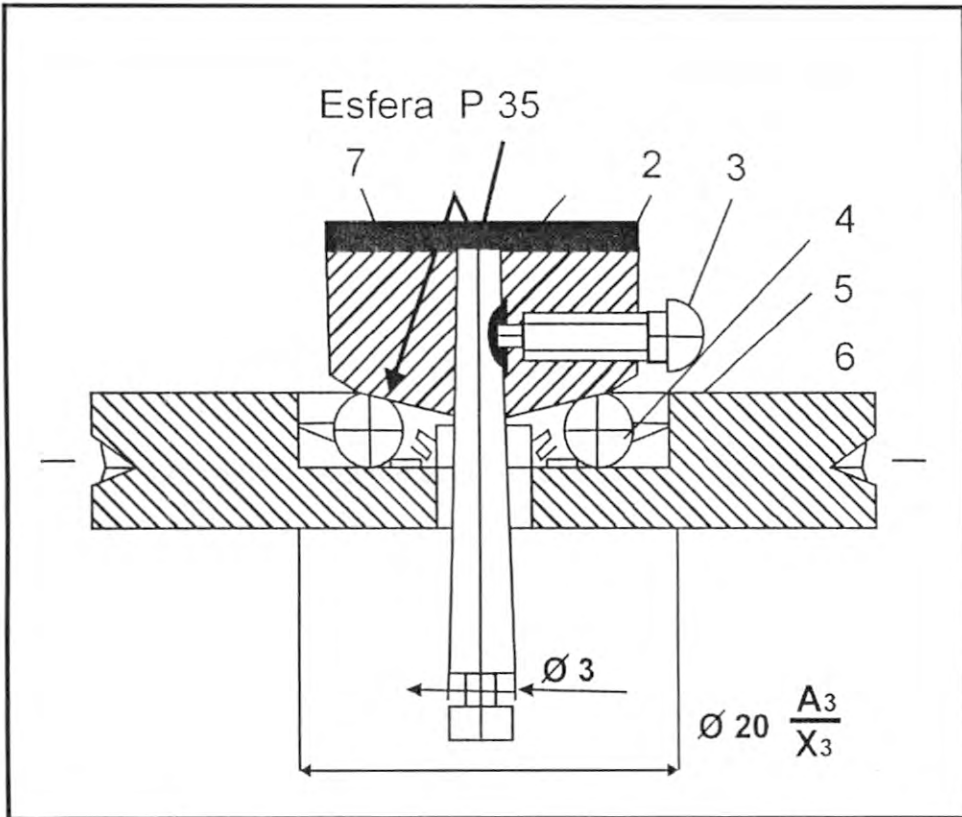
La adhesión de los recubrimientos aspersidos al metal base se consigue básicamente por la adherencia mecánica. Esto significa que la resistencia de adhesión de los recubrimientos con la base se determina por la magnitud y la rugosidad de la superficie del metal base.

\* Distancia de aspersión 1. - 150 mm. 2. - 50 mm.

Cuando se determina la resistencia de adhesión de los polvos compuestos aspersidos (75 % Ni + 25% C), con el material del segmento de estator de la turbina, se empleó el método de la rotura del pin cónico desde el material compuesto aspersido (Fig. 21). El pin 1 y la arandela 2 se hacen del mismo material que el segmento. Se fabricó veinte muestras, se calculó cinco muestras para una distancia dada de la aspersión. La distancia de la aspersión se eligió: 50, 100, 200, 250 mm.

Las muestras armadas (arandela con el pin cónico) se lijaban en un dispositivo especial en un grupo de cinco unidades.

El proceso se efectúa en la siguiente secuencia:



**Fig. 21** Dispositivo centrador y muestra para medir la resistencia de adhesión.

- |                    |                            |
|--------------------|----------------------------|
| 1. - Pincónico     | 2. - Arandela              |
| 3. - Seguro        | 4. - Centrador             |
| 5. - Separador     | 6. - Apaso del dispositivo |
| 7. - Recubrimiento |                            |

## B. Preparación de la Superficie

- La preparación de la superficie antes de la aspersión prevé la limpieza de los ácidos de las suciedades y darle una rugosidad que garantice una máxima resistencia de adhesión del recubrimiento con la base.

- Limpiar las suciedades de la superficie de las muestras, secar y desengrasar (escobilla de cerda, **acetin**, bencina, aire comprimido seco).
- Colocar las muestras fijadas en la celda del equipo chorro de perdigones y soplar Las muestras en el régimen.

$p = 4$  entre 6 (0, 4 entre 0,6 Mpa) Presión del aire comprimido

$\alpha = 90^\circ$  - Angulo del chorro del aire comprimido con abrasivo respecto a la superficie de las muestras tratados.

$H = 100 + 10$  mm. Distancia desde la salida de la tobera de la pistola hasta la superficie tratada.

$T = 5$  a 7 segundos - tiempo del tratamiento de una muestra

- NOTA:
- a) En calidad de abrasivo se recomienda utilizar el electroconindon de la marca 16 A, 23 A o 25A (OST 2-115 - 71), con una granulidad de 50 entre 100  $\mu\text{m}$ .
  - b) Antes del tratamiento, el material abrasivo se debe cernir y secar de acuerdo con las instrucciones.
  - c) Se permite un uso múltiple del abrasivo si se garantiza la eliminación de los fracciones pequeñas.

- Después del tratamiento por chorro de perdigones con abrasivo, las superficies de las muestras se debe soplar con aire comprimido seco.
- Colocar el dispositivo con Las muestras en el manipulador para la aspersión de detonación.

### C. Preparación del Material Compuesto de Polvo (Ni - 75% + C 25 %)

Con la finalidad de aumentar la calidad del recubrimiento aspersido el polvo compuesto se debe secar.

- 250 Gr del polvo compuesto cernir a través de una malla (20 a 40  $\mu\text{m}$ .), Un recipiente de acero inoxidable y colocar el recipiente con polvo en un horno secador eléctrico.

La capa del polvo en el recipiente debe ser no mayor de 10 mm.

- Prender el horno eléctrico y mantener el polvo durante 1.5 entre 2 horas a  $T= 80^{\circ}\text{C}$
- Enfriar el polvo secado hasta una temperatura del medio ambiente en la puerta cerrada del horno eléctrico.
- El polvo secado y frío hechar a la tolva del dosificador de polvo para lo cual se quita la tapa superior y se coloca el tapón inferior del dosificador
- El polvo secado y frío hechar a la tolva del dosificador de polvo para lo cual se quita la tapa superior y se coloca el tapón inferior del dosificador
  - . El polvo se hecha inmediatamente antes del proceso de aspersión por detonación.
  - . El almacenamiento del polvo en el dosificador se permite no mas de un día.
  - . Cuando el tiempo de almacenamiento es mayor sacar el polvo de nuevo

#### **D. Aplicación del Polvo Compuesto sobre las Muestras**

Con esta finalidad se debe realizar la preparación del funcionamiento del equipo de detonación.

- Abrir la llave del reductor oxígeno y comprobar la presencia y la presión del oxígeno en la botella.
- Abrir la llave del reductor de propano y comprobar la presión del propano en la botella.
- Abrir la llave de argón y comprobar la presión del argón en la botella.
- Prender el interruptor de calentamiento de agua en el tanque térmico del sistema de enfriamiento de agua del equipo (colocar previamente el regulador del sensor de temperatura del agua en 70 a 80°C) conectando el enchufe del al circuito eléctrico de 220 V.
- La comprobación del trabajo del sistema de enfriamiento del equipo detonador se comienza cuando está caliente el agua en el termotanque del sistema de enfriamiento.
- Encender el interruptor de la bomba de agua eléctrica y certificar el buen funcionamiento del sistema de enfriamiento, el manómetro debe mostrar presión. Apagar el interruptor.
- Encender el interruptor del motor eléctrico del ventilador para el enfriamiento del radiador del agua, certificar el buen funcionamiento, apagar el interruptor.



- Conectar el panel eléctrico de control al circuito eléctrico 220 Watts:
  - . Encender el interruptor "CIRCUITO", deberá encenderse una luz verde y destellar el diodo de luz.
  - . Encender el interruptor de "PROPANO", y según el flujometro comprobar el encendido de la válvula electromagnética, apagar el interruptor
  - . Encender el interruptor de "Oxígeno" y según el flujo metro comprobar el encendido de la válvula electromagnética, apagar el interruptor.
  - . Encender el interruptor "POLVO 1" y según el flujometro comprobar el encendido de la válvula electromagnética de la alimentación del argón a la tolva del dosificador de polvo ¡ soplar el canal del tubo del cañón un argón de propano y del oxígeno! Apagar el interruptor.

NOTA:

- a) El soplado del cañón realizar cuando están cerrados la tapa del dosificador del polvo y del tapón.
- b) ¡ La comprobación del sistema de alimentación de gas realiza cuando está prendido la ventilación extractiva de la celda !

- . Encender el interruptor "ENCENDIDO" y según el sonido certificar del normal funcionamiento de la bujía de encendido. Apagar el interruptor.
- . Encender el interruptor "VIBRADOR 1" y certificar el funcionamiento, apagar el interruptor.

- . El switch de la frecuencia de disparos en segundos colocar en la posición "4".

#### **E. Proceso de Aspersión del Recubrimiento Compuesto sobre las Muestras**

- Colocar las muestras preparadas (5 unidades en el dispositivo) en el manipulador a una distancia de 50 mm de la salida del tubo del cañón detonador.
- Conectar el sistema de enfriamiento de agua al circuito de agua de 220 voltios.
- Conectar el panel eléctrico de control al circuito eléctrico de 220 V.
- Abrir la tapa de la tolva del dosificador de polvo y echar el polvo compuesto preparado (Ni 75% y 25 %), - 250 Gr. Correr la tapa.
- Encender la bomba de agua eléctrica y certificar la presencia de presión del agua en el sistema de enfriamiento según el manómetro
- Encender el motor eléctrico del ventilador de enfriamiento del radiador.
- Encender el sistema de ventilación extractor de la tolva en el panel eléctrico del control:
  - . Encender el interruptor "CIRCUITO" (debe parpadear el diodo de luz).
  - . Encender el interruptor "OXIGENO" y según el flujometro colocar un caudal de 40 L/Min. Apagar el interruptor.

Simultáneamente encender los interruptores:

"PROPANO", "OXIGENO", "ENCENDIDO " según el sonido de los disparos, regular "brillo", variando el caudal de "PROPANO" (para un caudal constante de oxígeno).

Lograr un color de la llama pajizo lo que corresponde a una llama reductora.

- Encender el interruptor " POLVO 1" y colocar la presión del gas transportador "argón" de 0,06 Kg/cm<sup>2</sup>; durante centímetro cuadrado, durante este lograr un cono de chispeo uniforme del polvo aspersido.
- Encender el interruptor "VIBRADOR 1"
- Llevar el manipulador con las muestras a una distancia de 50 mm de la salida del tubo del cañón y realizar la aspersión del polvo compuesto durante 60 segundos.
- Apagar el interruptor " POLVO"
- Apagar el interruptor "VIBRADOR"
- Simultáneamente apagar los interruptores "PROPANO Y OXIGENO"
- Encender el interruptor "ENCENDIDO"
- Quitar el dispositivo con las muestras
- Quitar las muestras:

- Realizar una inspección externa del recubrimiento, el debe ser uniforme en toda la superficie de la muestra, de color gris claro, sin inclusiones.
- Realizar la medición de la altura de la muestra en el recubrimiento; con la ayuda de un micrómetro, para determinar el espesor de la capa aplicada en 60 segundos.

Colocar en el dispositivo en el siguiente lote (05 unidades de muestras, luego colocar en el manipulador y realizar el proceso de aspersión según la metodología descrita arriba en una distancia de aspersión de igual a 100 mm.

Repetir el proceso de aspersión para las siguientes muestras de manera similar para una distancia de aspersión de igual a 200 a 250 mm.

En el laboratorio de metalurgia determinar la fuerza de rotura (P en Kg.), del pin cónico 1 en el recubrimiento aspersido 7 (Fig. 21) en una máquina de rotura

La resistencia de adhesión se determina según la formula:

$$\delta = \frac{P}{F} \Rightarrow Mpa \dots \dots \dots (7)$$

Donde  $\delta$  = es la resistencia de adhesión (Mpa)

$P$  = es la fuerza de rotura del pin cónico (Kg-f)

$F$  =  $4 \text{ mm} = \pi R^2$  área del pin en  $\text{mm}^2$

Los resultados de las pruebas y del cálculo se dan en la tabla 4

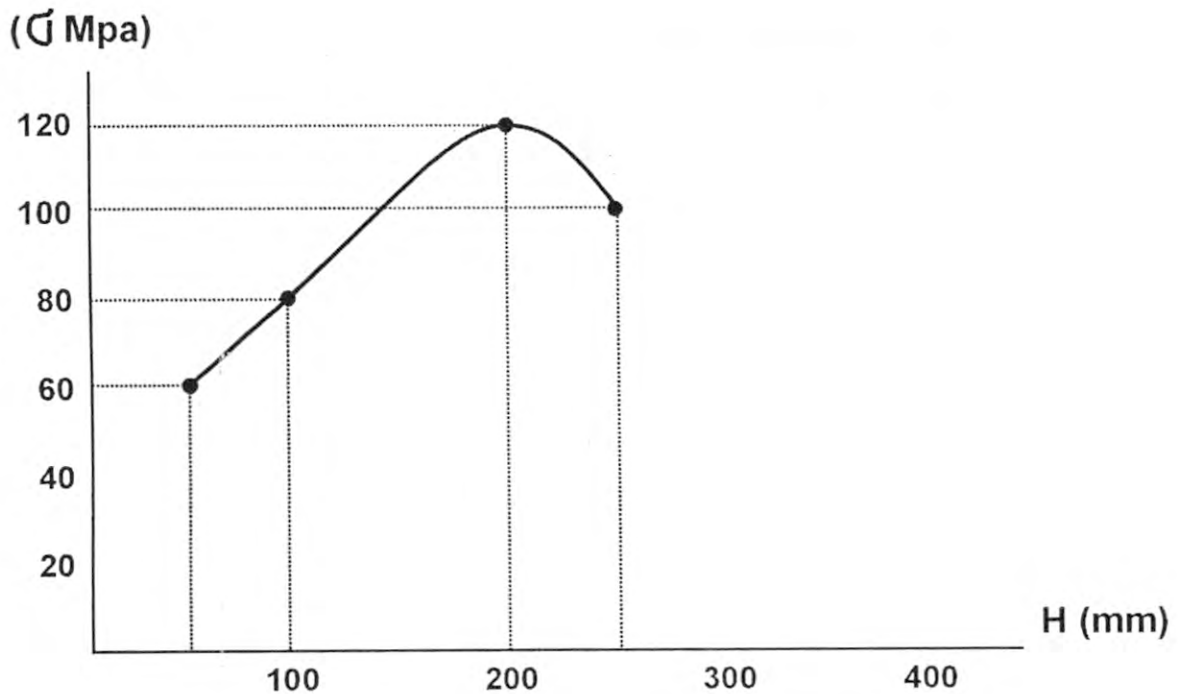
TABLA 4

Distancia	50	100	200	250
<b>Parámetro</b>				
Fuerza de Rotura(Kgf)	24	32	48	40
Area del Pin (mm <sup>2</sup> )	4	4	4	4
Resistencia de adhesión (Kgf/mm <sup>2</sup> )	6	8	12	10
$\delta$ (Mpa)	60	80	120	100

Según los resultados de los datos tabulares graficamos la función de la resistencia de adhesión de la distancia de aspersión (Fig. 22).

De la curva se deduce que la máxima resistencia de adhesión de los polvos compuestos sobre la base de níquel con el material de la base tiene lugar a una distancia de aspersión de  $H = 200$  mm.

Esta distancia lo colocamos en el proceso tecnológico de aspersión por deformación del material sellante compuesto sobre la superficie de los segmentos del estator de la turbina del motor PT6.



**Fig. 22** Curva de la Función de la Resistencia de Adhesión de los Recubrimientos Compuestos Respecto a la Distancia De Aspersión.

**F. Proceso de Aspersión del Material Sellante Compuesto (NiC) sobre los Segmentos del Estator de la Turbina del Motor PT-6**

- Colocar los segmentos del estator de la turbina en el dispositivo especial y fijarlos.
- Realizar la preparación de la superficie de los segmentos conjuntamente con la muestra de control en el arenador en el régimen, elegido para las muestras (ver arriba en la parte E).
- Realizar la preparación del material compuesto (NiC) en una cantidad de 400 gr.

- . Cernir en una malla de 20 a 40  $\mu\text{m}$ .
  - . Secar en un horno eléctrico a  $T = 80^\circ\text{C}$  durante 1,5 a 2 horas
  - . Enfriar el polvo conjuntamente con el horno eléctrico hasta una temperatura del aire del ambiente.
- El polvo preparado hechar a la tolva del dosificador de polvo del equipo detonador inmediatamente antes del proceso de aspersión.
  - Colocar el dispositivo con los segmentos en el manipulador a una distancia de  $H = 200 \text{ mm}$ . de la salida del tubo del cañón detonador.
  - Cerca de los segmentos fijar la muestra del control
  - Realizar la preparación del equipo detonador para el trabajo según la metodología descrita arriba en la parte E.
  - Realizar el proceso de aspersión del material sellante compuesto NiC, sobre los segmentos del estator de la turbina del motor PT-6A según el proceso tecnológico descrito en el párrafo E en el régimen:

**H = 200 mm.** Distancia desde el tubo del cañón detonador hasta la superficie metalizada.

**$\alpha = 90^\circ$**  ángulo del envío del material aplicado sobre la superficie de los segmentos

**v** RPM Se elige del cálculo del recubrimiento de la huella del disparo en 1/3 del siguiente disparo (según el área de la huella de un disparo).

**$\delta$ (mm)** Espesor de capa aspersada, depende del desgaste del material base, a este espesor se da una tolerancia de (0,1 - 0,2 mm.), para el maquinado hasta la medida de fabrica.

**T - Seg.** Se determina para cada lote de segmento en función al espesor del material aspersado.

**Q = 40 L/min.** Caudal del oxigeno

**Q = 10 L /Min.** Caudal del propano

**q = 0,06 Kg/cm<sup>2</sup>** presión del gas transportador "argón"

**n = 4** Cantidad de disparos en un segundo

- Al finalizar la aspersión, apagar el equipo detonador según el proceso tecnológico en la parte E.
- Apagar la ventilación de extracción.
- Quitar el dispositivo con los segmentos del manipulador.
- Inspeccionar el recubrimiento:
  - . El recubrimiento deberá ser uniforme sin inclusiones de color gris claro.
  - . En los recubrimientos esparcidos no se permiten fisuras, roturas, inclusiones, abultamientos.
  - . El control de espesor de la capa aspersada de recubrimiento (considerando el maquinado) realizar con la ayuda del dispositivo de medición.



- . Los segmentos con un recubrimiento insatisfactorio se someten a un recubrimiento.
  
- Los segmentos con los recubrimientos establecidos transmitirlos a la zona del maquinado.

# CAPITULO

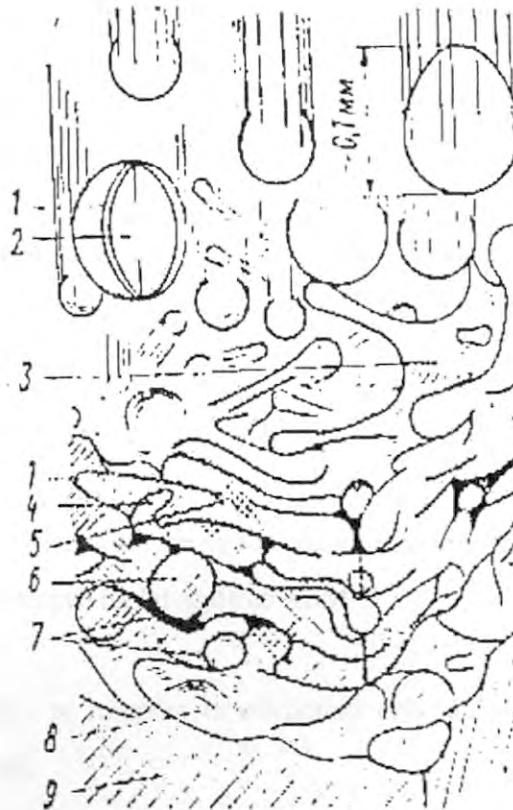
IV

INVESTIGACION DE LAS PROPIEDADES FISICO - MECANICAS DE LOS  
RECUBRIMIENTOS COMPUESTOS.

#### 4.1 FORMACION DE LOS RECUBRIMIENTOS

El recubrimiento se forma de partículas individuales fundidas ó próximos a este estado, que con alta velocidad se golpean y se acumula en capas sobre la superficie de la base.

En la figura 23 se muestra el esquema de formación de recubrimiento durante la aspersión.



**Fig. 23** Esquema de los Recubrimientos durante la Aspersión:

1. - Partícula de óxido
2. - Partícula de material aspersado fundido
3. - Partícula durante el impacto con la superficie
4. - Parte de adhesión mecánica
5. - Parte de la fundición local
6. - Partícula No fundida totalmente.
7. - Porosidad
8. - Superficie del Material base.
9. - Material base.

Durante el movimiento del material principal en un medio gaseoso de alta temperatura, las partículas se encuentran en un estado fundido y su superficie se cubre con película de óxido. Durante el impacto con la superficie del material principal o con la superficie del recubrimiento anteriormente formado, las partículas se desparraman formando una capa delgada, mecánicamente adherida con la superficie del material principal o con el recubrimiento.

El pegado de las partículas se efectúa mediante adhesión mecánica con las microsaliencias de la rugosidad de la superficie de la junta y a través del sitio de destrucción del óxido de la junta. En los lugares de destrucción de las películas de óxido se produce la fundición (soldado) de las partículas metálicas con la junta garantizando una alta resistencia de adhesión del recubrimiento con la junta.

En el proceso de pegado de las partículas una con la otra, entre los fundidos se encuentran partículas no fundidas completamente. Además dentro del recubrimiento, aparecen juegos y vacíos llenos de gas, cuya cantidad determina la porosidad del recubrimiento.

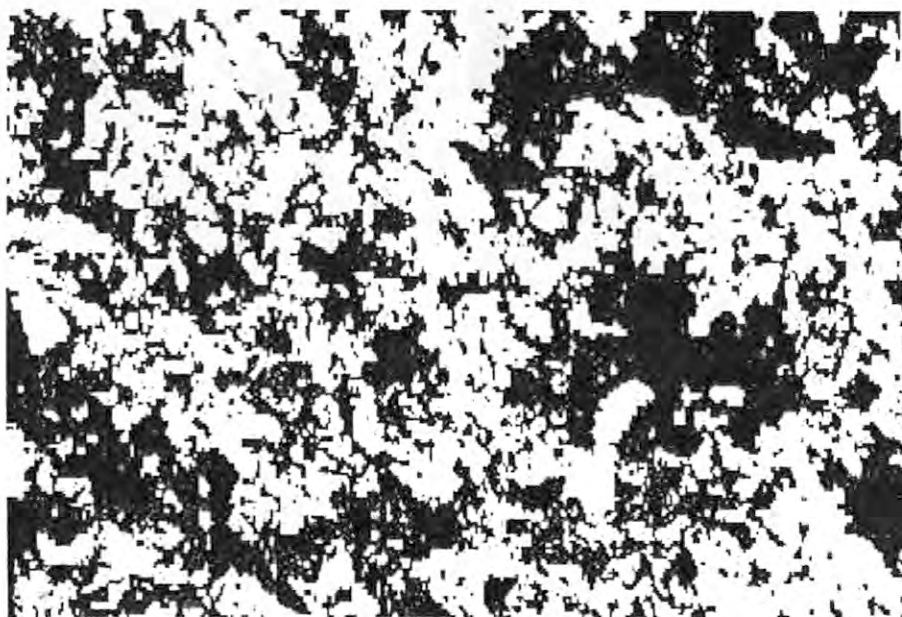
## 4.2 CONSTRUCCION Y ESTRUCTURA DE LOS RECUBRIMIENTOS

La construcción y la estructura de los recubrimientos compuestos se estudió con la ayuda del microscopio metalográfico MIM-8.

En la figura **23a** se muestra la estructura del recubrimiento compuesto sobre la base de Níquel.

La construcción de las capas aspersadas de los recubrimientos de los polvos de grafito, plaqueado con níquel compactamente tiene una pequeña cantidad de poros.

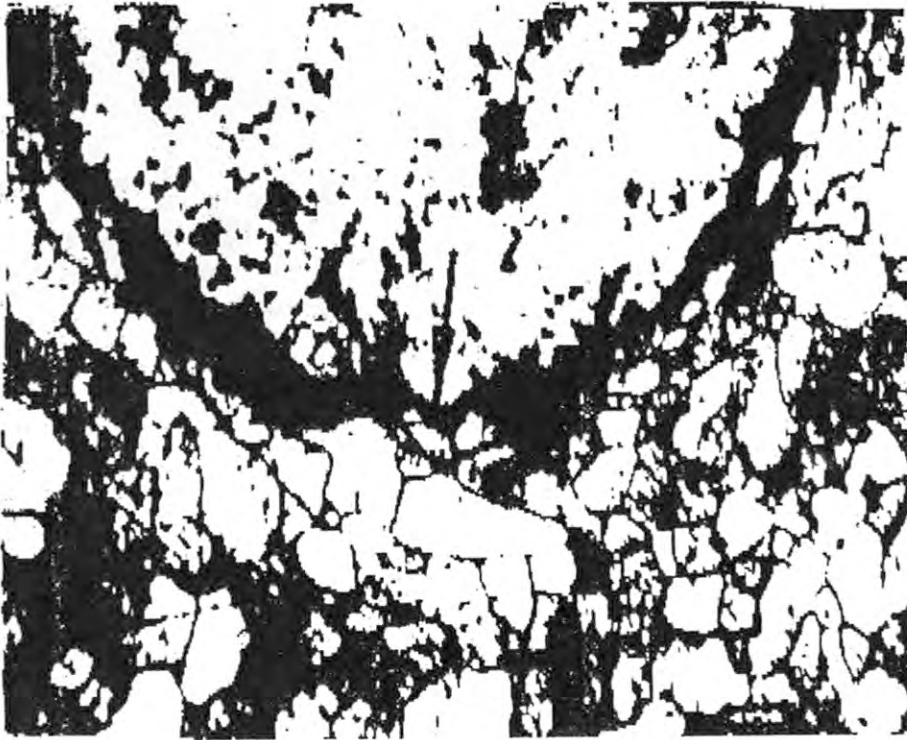
En el componente metálico (Níquel) se observa una carcasa fibrosa, dentro de la cual está distribuida la partícula del grafito. La construcción de la carcasa fibrosa evidencia que la envoltura del níquel del polvo plaqueado de grafito en el proceso de formación del recubrimiento se encontró en un estado fundido, lo que facilitó la formación de unión metalúrgica entre las partículas plaqueadas vecinas.



**Fig. 23a** Estructura de los Recubrimientos Compuestos X200 sobre la base de NÍQUEL.

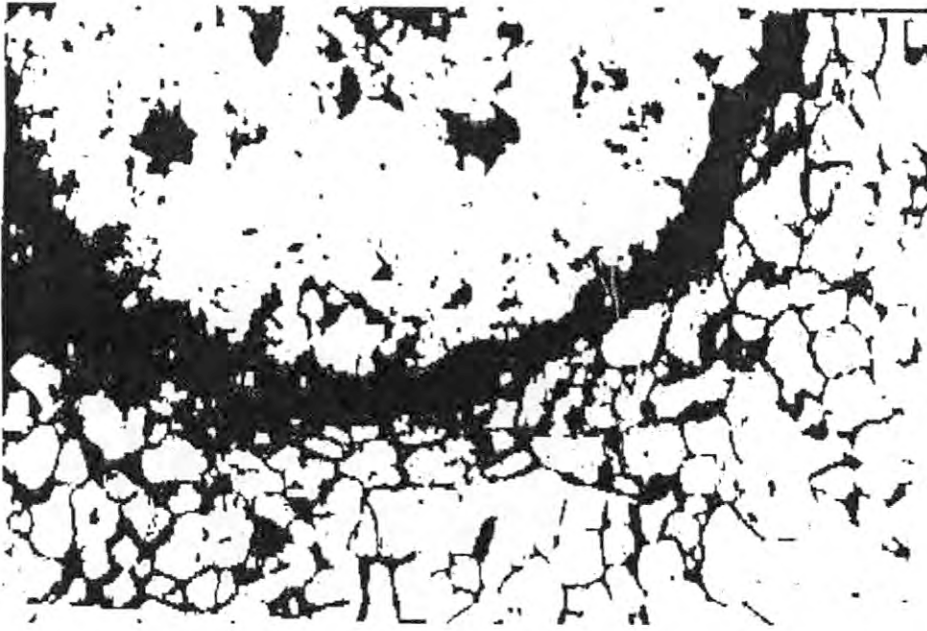
Una distribución relativamente uniforme de las partículas de grafito en la carcasa metálica evidencia en el proceso de aspersión por detonación, no se produce una abertura de la envoltura de níquel. Esto conserva el grafito de la descomposición a altas temperaturas de la aspersión. Además, las partículas de grafito no sufren una deformación visible y conservan su forma a las partículas plaqueadas iniciales. Este hecho evidencia que en el momento de formación de recubrimiento compuesto, las variaciones termodinámicas se producen básicamente en el componente metálico.

En el proceso de esta micro estructura se investigó los límites de la división del recubrimiento compuesto del material y de la base



**Fig. 24** Límite de División del Recubrimiento Compuesto en Base a Níquel (arriba) con el material de la base (abajo) X200 (H=200 mm).

De la Fig.24 se ve, que el límite de la división de recubrimiento compuesto sobre la base de níquel con la base (para una distancia de aspersion de H=200 mm) tiene un espesor menor que el límite de la división obtenida para una distancia de aspersion H = 250 mm. (Fig. 25)

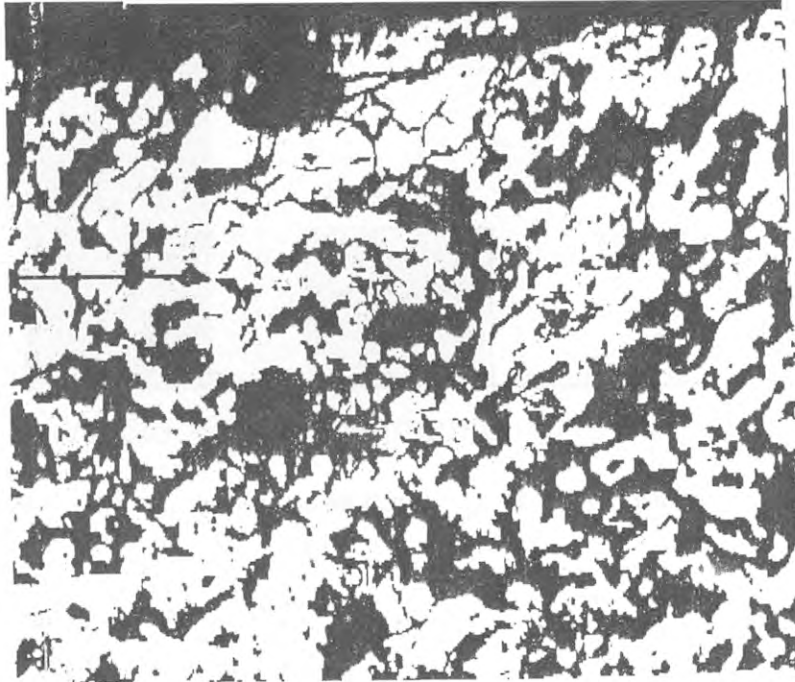


**Fig. 25** Límite de División del Recubrimiento Compuesto en Base a Níquel ( arriba ) con el material de la base ( abajo ) X200 ( H= 250 mm ).

Este hecho se explica por que una distancia de aspersión  $H = 200$  mm la velocidad del vuelo de las partículas plaqueadas tienen un máximo valor, por consiguiente su energía cinética con el aumento de la energía cinética de la partícula durante el impacto con el material de la base, disminuye el espesor del límite de división, y por consiguiente aumenta la resistencia de adhesión ya que el límite de la división es un conjunto de partículas de óxido del material de la base con las partículas plaqueadas y de porosidades formadas entre las películas de óxido, y con la disminución del espesor de la división disminuye la cantidad de poros en la unidad de superficie lo que evidencia el aumento de la resistencia de adhesión.

Además, la disminución del límite de la división favorece a los procesos difusivos y a la acción de las fuerzas de Van der Waals, lo que también condiciona el aumento de la resistencia de adhesión.

La microdureza de la carcaza de níquel del recubrimiento compuesto  $H_{\mu}^{20} = 30$  a  $37 \text{ Kg/mm}^2$  se muestra en la Figura 26.

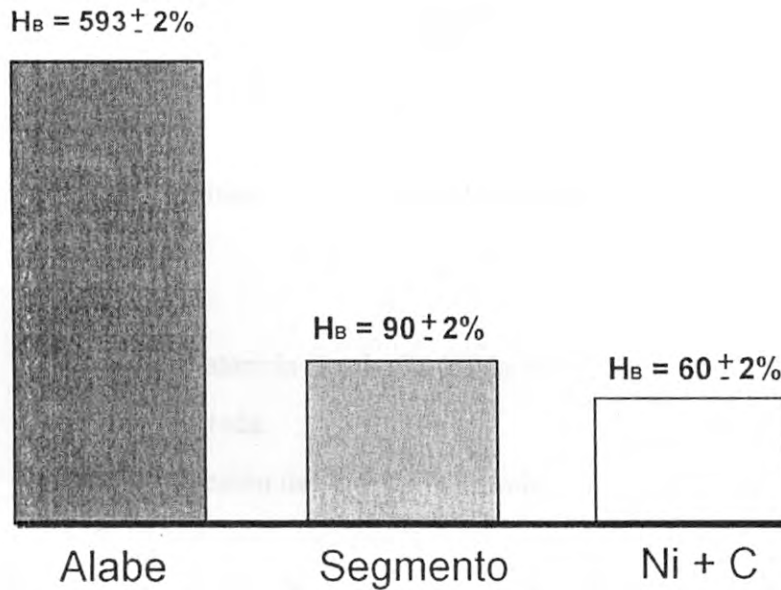


**Fig. 26** Microdureza de componente Metálico del Recubrimiento Compuesto X200.

La dureza del álabe de la turbina del motor PT-6A del segmento del estator de la turbina y del material compuesto sobre la base de Níquel se da en el diagrama de la figura. 27.

Del diagrama se ve, que la dureza, (según HB) del recubrimiento sobre la base de Ni en 1,5 veces, es menor a la dureza del material del segmento, sin embargo la dureza del álabe es en 6 veces superior a la dureza del material del segmento y en 10 veces al material sellante compuesto; lo que totalmente garantiza el proceso de corte que tiene lugar cuando choca la punta de álabe de la turbina con el material sellante.





**Fig. 27 Diagrama de la Dureza del material del álabe, del segmento y del Recubrimiento**

#### 4.3 RESISTENCIA DE ADHESION

La principal característica de los materiales sellantes es resistencia de adhesión con el material de la base.

Sobre la resistencia de adhesión de recubrimientos de detonación por aspersión influye tanto los factores de la preparación de la superficie como los regímenes de aspersión de detonación. Los regímenes de la aspersión se vieron en el capítulo III.

Examinaremos la influencia de la preparación de la superficie sobre la resistencia de la adhesión. En nuestro caso se utilizó un tratamiento por chorro de la superficie. Antes de la aspersión se le necesita dar a la superficie la rugosidad necesaria que depende del régimen de tratamiento por chorro de perdigones. Con la finalidad de investigar la variación de la microrugosidad de las muestras planas en función a los regímenes del tratamiento de chorro de perdigones, se efectuó una serie de experimentos

Las muestras se fabricaron del mismo material que los segmentos del estator de la turbina PT-6A.

El experimento múltiple se planeó para estudiar la influencia de factores como:

- $l$  = Distancia desde la salida de la tobera hasta la superficie tratada.
- $p$  = Presión del aire comprimido.
- $t$  = Tiempo de tratamiento por chorro de perdigones.
- $\alpha$  = Angulo de inclinación de la superficie tratada respecto al eje del chorro del aire comprimido.

Los factores de la distancia, presión y tiempo se examinaron para 4 niveles

- $l$  = 70, 100, 130, 160, mm.
- $p$  = 2, 3, 4, 5 Kg./ Cm<sup>2</sup>.
- $t$  = 30, 60, 90, 120 Segundos

El factor del ángulo de inclinación para 3 niveles

- $\alpha$  = 30°, 45°, 90°

Las muestras se fijaron con un dispositivo especialmente fabricado. El experimento se efectuó en un equipo de chorro de perdigones estándar utilizando electrocorindón en una granulación de 32 a 40  $\mu$ m. El grado de sequedad del aire comprimido fue de 98%.

Después del tratamiento por chorro de perdigones de la superficie de las muestras se registraron perfilogramas en el perfilógrafo "CALIBRE-BEI "

Según los resultados de los perfilogramas procesados se estableció que la máxima rugosidad de las microdesigualdades ( $H_{max}$ ), tiene lugar cuando  $\alpha = 90^\circ$ , además de la distancia desde la salida de la tobera de la pistola hasta la superficie tratada de la muestra en el intervalo de 70 hasta 160 mm no ejerce una influencia sustancial sobre  $H_{max}$ .

Por esta razón examinaremos la variación de la microrugosidades de la superficie de las muestras respecto al tiempo del tratamiento por chorro de perdigones (Fig. 28) y a la presión del aire comprimido (Fig. 29).

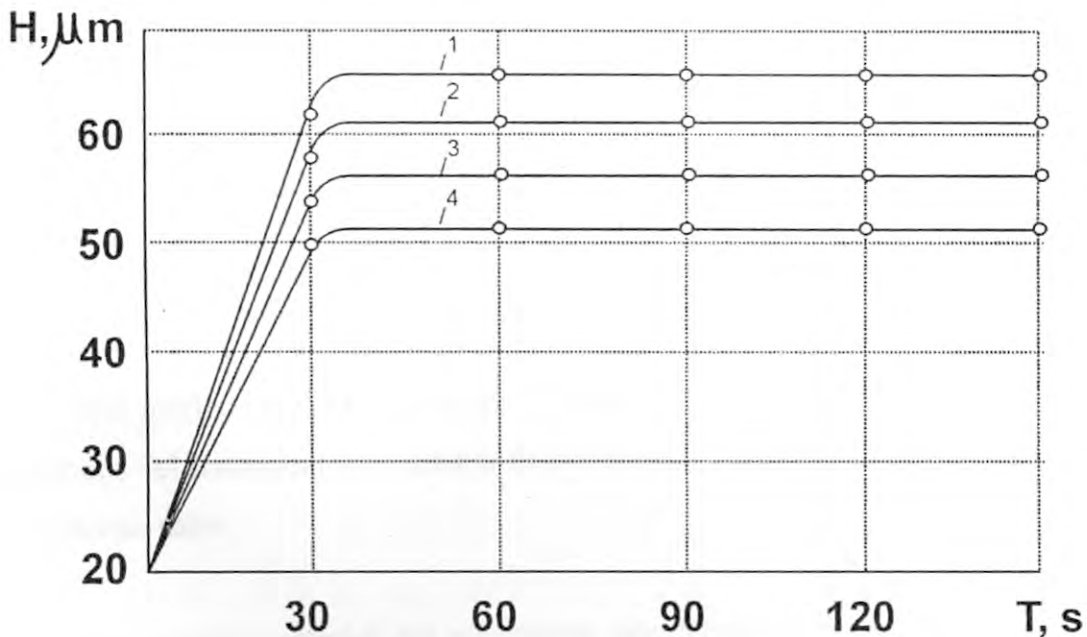
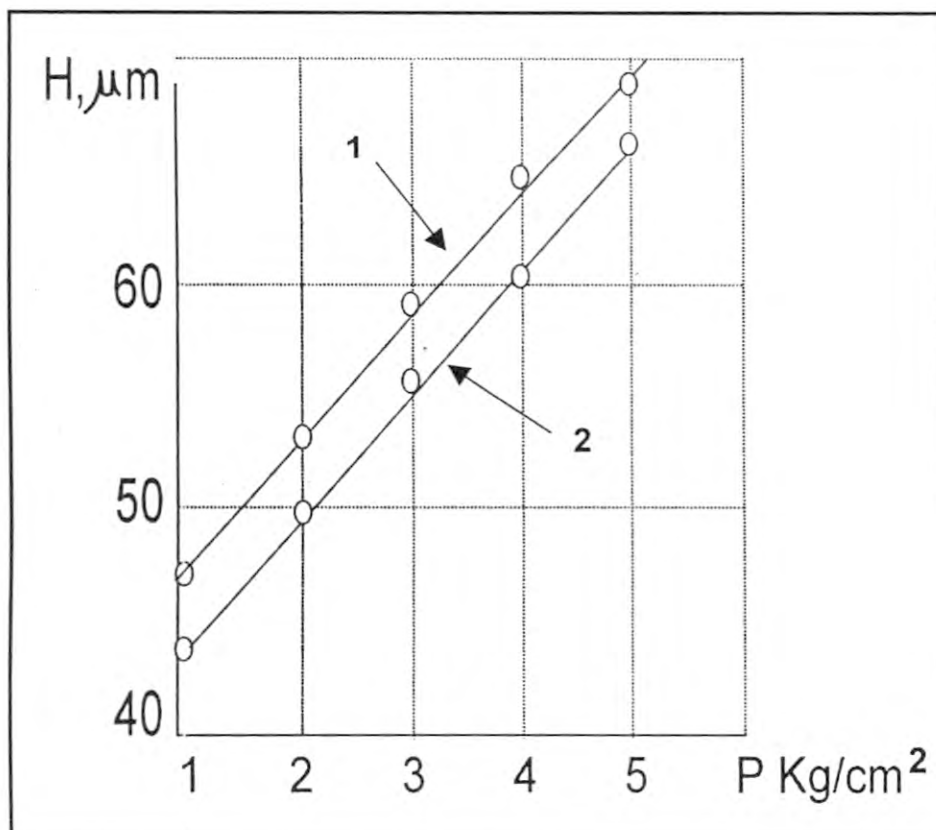


Fig. 28 Variación de la Microrugosidad respecto al tiempo de tratamiento por chorro de perdigones. 1. -  $P = 5 \text{ Kg/cm}^2$   
2.-  $P = 4 \text{ Kg/cm}^2$  3.-  $P=3 \text{ Kg/cm}^2$  4.-  $P=2 \text{ Kg/cm}^2$



**Fig. 29** Variación de la Rugosidad en función a la presión del aire  
 1.-  $t = 90$  seg    2.-  $t = 30$  seg.

Del gráfico (Fig. 28), se ve que  $H_{max}$  bruscamente crece en los primeros segundos del tratamiento por chorro de perdigones y después de 30 a 45 alcanza el máximo valor.

El aumento posterior del tratamiento por chorro de perdigones provoca el desgaste abrasivo de las muestras para un  $H_{max}$  constante (Fig. 30)

Con la finalidad de explicar los resultados obtenidos examinaremos la fuerza del impacto del perdigón individual. En este caso la fuerza del impacto va ser igual a la velocidad de variación de la cantidad del movimiento.

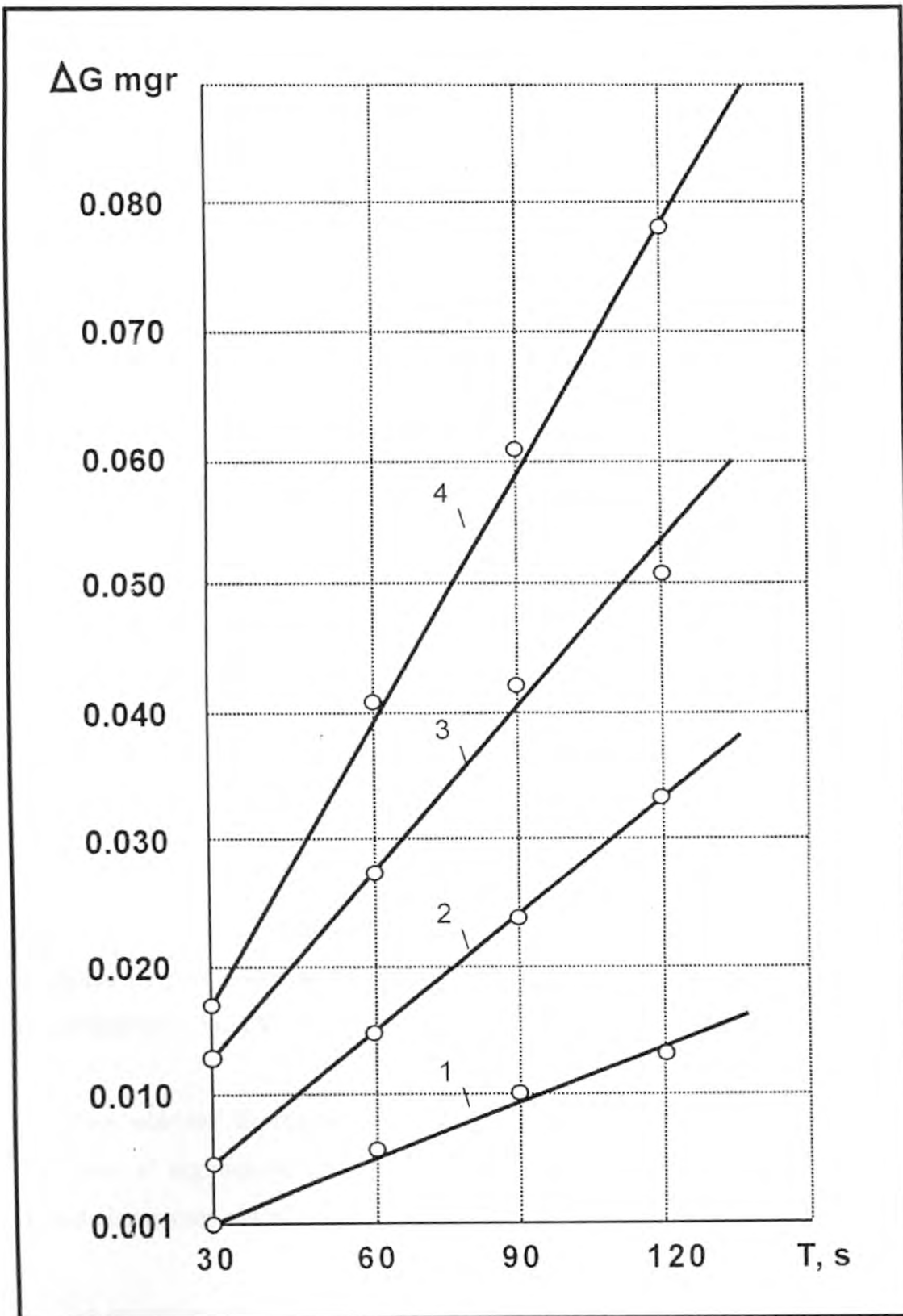


Fig. 30 Función de la Variación de la masa de las muestras respecto a la duración del tratamiento.

- 1.-  $P = 2 \text{ Kg/cm}^2$     2.-  $P = 3 \text{ Kg/cm}^2$     3.-  $P = 4 \text{ Kg/cm}^2$   
 4.-  $P = 5 \text{ Kg/cm}^2$

$$F = d \left( \frac{Mv}{dt} \right) \dots\dots\dots(8)$$

Donde            **F**    =    Es la fuerza del impacto  
                       **Mv** =    Cantidad de movimiento  
                       **t**    =    Tiempo

Evidentemente el valor total de esta fuerza alcanzará al máximo valor después de 30 a 45 segundos del tratamiento por chorro de perdigones, y luego permanece constante para dicho régimen, lo que explica las curvas mostradas en la figuras 28 y 29.

De la fórmula se ve que la fuerza del impacto crece directamente proporcional a la variación de velocidad del perdigón, que a su vez, es proporcional a la presión del aire comprimido. Esto da una explicación del porque la variación de la microrugosidad de las muestras durante el tratamiento por chorro de perdigones se produce directamente proporcional a la presión del aire comprimido (Fig.29).

Para obtener la rugosidad necesaria en la superficie tratada de los segmentos, el régimen de tratamiento de chorro de perdigones lo elegimos con ayuda de las curvas obtenidas (Pág. 28 y 29).

La investigación de los perfilogramas obtenidos (Fig. 31) dio la posibilidad en una primera aproximación adoptar la forma de la rugosidad unitaria de una pirámide correcta, cuya base es un cuadrado, y la altura es igual a la mitad del lado del cuadrado.

Las partículas aspersadas según forma son próximas a una esfera, en este caso para unas medidas comparables las partículas del material aspersado y de la rugosidad del material de la base tiene lugar la siguiente relación:

$$V_{\text{esfera}} = V_{\text{pirámide}} \quad (\text{ósea los volúmenes})$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi H^3 \dots\dots\dots(9)$$

De donde:

$$H_{\text{max}} = 0,75 d \quad \dots\dots\dots (10)$$

**d** es el diámetro medio de la partícula del polvo aspersado, por consiguiente, para determinar la conmesurabilidad de las medidas de las partículas del material aspersado con las medidas de la rugosidad de la base, se necesita determinar la composición granulométrica del polvo. Luego, según la fórmula 10 calcular **H max** y con ayuda de las curvas (Fig. 28 y 29), determinar el régimen de tratamiento por chorro de perdigones.

La resistencia de adhesión de recubrimientos con la base aumenta, si es que el área de su contactado real aumenta durante la formación del recubrimiento. Además, el aumento del área de contacto real (para unas mismas condiciones) se observa para una medidas comparables de la rugosidad de la base y de las partículas del polvo aspersado.

Los resultados obtenidos de la variación de la resistencia de adhesión del material sellante en base a níquel en función a la micro rugosidad de la base se muestra en la Fig. 32.

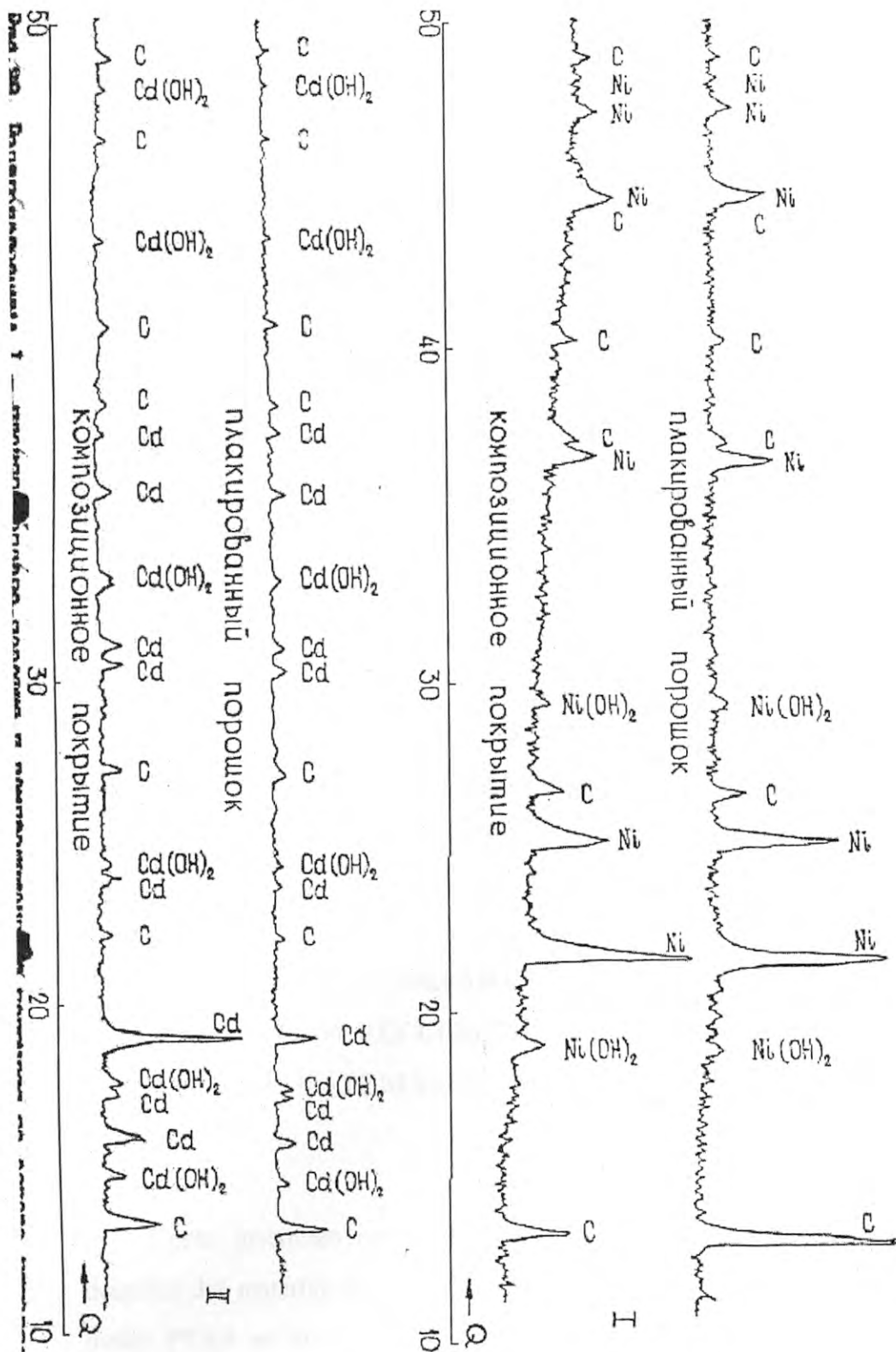
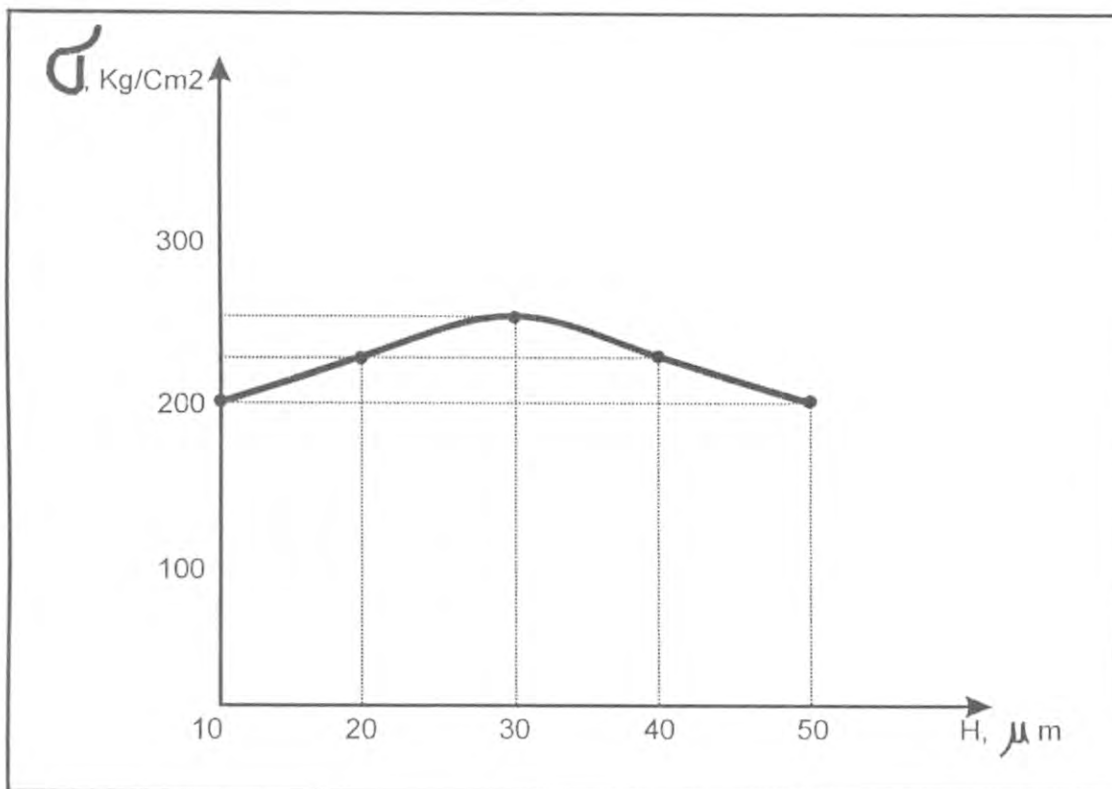


Fig. 31 RADIOGRAMAS I.- Del polvo plaqueado y del recubrimiento compuesto en base a níquel II.- Del polvo plaqueado y del recubrimiento cadmiado en base a Cadmio.





**Fig. 32** Función de la Resistencia de Adhesión del Recubrimiento compuesto en base a Níquel respecto a la microrugosidad del material de la base.

#### 4.4 CARACTERISTICAS COMPARATIVA DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS RECUBRIMIENTOS SELLANTES COMPUESTOS RESPECTO AL MATERIAL DE LOS SEGMENTOS DE LA TURBINA PT-6A

Como mostraran los resultados de la investigación de la resistencia al desgaste del material de los segmentos sellantes del estator de la turbina del motor PT-6A en el proceso de operación (ver Fig.8), un intenso desgaste del material de los segmentos se produce en el período de trabajo del motor hasta las 1500 horas. Este proceso depende de un conjunto complicado de factores tales como:

- a) MICROCORTE durante el raspado de la punta del álabe con la caja sellante.  
Este proceso es de corta duración ,instantáneo y no influye sustancialmente sobre el desgaste en el tiempo.
- b) TEMPERATURA DE LOS GASES influye en todo el ducto en la formación de desgastamiento erosivo. Este factor también es insignificante en el tiempo.
- c) La suciedad abrasiva del flujo gaseoso ejerce una influencia sustancial sobre la resistencia al desgaste de la superficie del material de los segmentos, tanto durante la presencia del proceso de fricción, como durante la presencia del contacto físico entre la punta del álabe de la turbina y el material del segmento.

Cuando se introduce en el material compuesto lubricante sólido "grafito" el proceso de desgastamiento abrasivo disminuye como muestran las múltiples investigaciones. El desgastamiento abrasivo del material con lubricante sólido disminuye en comparación con el material sin lubricante sólido en 1.5 a 2 veces.

- d) FRICCIÓN DE PELÍCULA durante esta etapa se produce un proceso intenso de desgastamiento en el contacto sin lubricante, lo que se confirma por la curva (fig.8), en la primera etapa.

Cuando se agrega lubricante sólido (grafito) al material compuesto el desgastamiento de la superficie de contacto bruscamente se reduce.

Según los datos bibliográficos, el desgastamiento de los materiales con lubricantes sólidos disminuye en comparación con el material sin lubricantes sólidos en 2 a 3 veces.

Tomando en cuenta lo enunciado anteriormente, nosotros podemos pronosticar la resistencia al desgaste del recubrimiento compuesto (NiC) en el sello radial de la punta del álabe de la turbina del motor PT-6A en el proceso de operación.

Del análisis realizado se deduce que la resistencia al desgaste de los materiales compuestos propuestos (NiC), en nuestro caso va a ser 2 veces menor en comparación con la resistencia al desgaste del material de los segmentos del estator de la turbina del motor PT-6A.

Las características comparativas se muestran en la figura 33.

## CONCLUSIONES

- 1.- Se ha desarrollado la metodología que permita evaluar las propiedades físico - químico y la resistencia al desgaste de los recubrimientos compuestos y del material sellante de serie, aplicables a los sellos radiales de la turbina del motor PT-6A.
  
- 2.- Las investigaciones de los desgastamientos de los materiales sellantes de serie en el proceso de operación demostraron que:
  - El proceso de corte tiene lugar cuando las puntas de los álabes raspan con el material sellante en el período de asentamiento.
  
  - El desgastamiento durante la fricción de película tiene lugar cuando hay contacto físico entre la punta del álabe y el material sellante y cuando la presión de contorno es inferior a la crítica.
  
  - El desgastamiento abrasivo del material de los segmentos se produce en el proceso de trabajo del motor en la atmósfera con polvo.
  
  - El desgastamiento erosivo de los materiales sellantes de los segmentos y también del material de los álabes se produce en el proceso de todo el período de operación.
  
- 3.- Se ha propuesto el material compuesto sobre la base de níquel con el lubricante sólido grafito, para el trabajo en el sello radial de los sectores de la turbina del motor PT-6A.

El material compuesto propuesto permite reducir la resistencia al desgaste del sello radial en el proceso de operación en dos veces.

4.- Las investigaciones experimentales de las propiedades físico-mecánicas de los recubrimientos compuestos demostraron que:

- a) La máxima resistencia de adhesión de los recubrimientos compuesto con el material de la base tiene lugar:
- Cuando tienen el mismo orden las medidas de los gránulos de los polvos aspersidos y la medida de la micro rugosidad de la superficie de la base.
  - Cuando la distancia de aspersión es de  $H = 200$  mm.
  - Cuando el espesor de caja aspersida es del orden de  $\delta = 0,4$  mm a  $0,6$  mm.
- b) La mínima porosidad de los recubrimientos compuestos (5 a 10%) se consigue para una composición granulométrica de los polvos de 40 a 50  $\mu\text{m}$  y un correspondiente régimen de aspersión por detonación.

## **RECOMENDACIONES**

Sobre la base de los resultados de la investigación se recomienda:

1. - Utilizar en calidad de sellos radiales el material compuesto en base a níquel con lubricante sólido grafito
2. - Para la aplicación de los materiales compuestos utilizar el método de aspersión por detonación, como el mas útil para este tipo de trabajo.

- Tratamiento de materiales . Autor J. Asuill, Morigaki
- Recubrimiento por detonación. Autor A.I Zverev, S.U. Charivker, E.A Astaiov.
- Termodinámica Técnica . Autor V. A Kirillin.
- Thermodynamics . Autor , Isaac Asimov , 1984
- Resistencia de Materiales. Autor Timoshenko, 1982
- Principios de termodinámica. Autor, Van Wylen, 1987
- Confiabilidad , Seguridad y Durabilidad de la Técnica Aeronáutica  
Autor L.L Anheliovich
- Legajo de estadística de Fallas del Motor PT6A del Arsenal Aeronaval.
- Manual de Inspecciones y Reparaciones menores traducidas al español del  
Manual de Entrenamiento de Pratt&Whitney .Canada  
1992.

Fig.10	Variación de la Estabilidad de los lubricantes sólidos en función a la temperatura de oxidación.....	54
Fig.11	Partículas de Grafito, plaqueados con el método de Precipitación Química.....	56
Fig.12	El esquema de Aspersión por Detonación.....	57
Fig.13	Equipo de Detonación.....	61
Fig. 14	El cañón del Equipo de Detonación.....	62
Fig.15	Panel de Control.....	65
Fig.16	Panel de Gases.....	67
Fig.17	Sistema de refrigeración por agua.....	68
Fig.18	Esquema Eléctrico.....	72
Fig.19	Variación de la Resistencia de Adhesión de los Recubrimientos aspersidos en función a la distancia de la Aspersión con el Método de Detonación.....	75
Fig.20	Variación de la resistencia de Adhesión de los Recubrimientos aspersidos en función al espesor del recubrimiento.....	76
Fig. 21	Dispositivo Centrador y muestra para medir la resistencia de adhesión.....	78



Fig. 22	Curva de la función de la Resistencia de adhesión de los recubrimientos compuestos respecto a la distancia de Aspersión.....	87
Fig. 23	Esquema de los Recubrimientos durante la Aspersión....	92
Fig. 23a	Estructura de los Recubrimientos Compuestos X200 sobre la base de NÍQUEL.....	94
Fig. 24	Límite de División del Recubrimiento Compuesto en Base a Níquel (H= 200 mm).....	95
Fig. 25	Límite de División del Recubrimiento Compuesto en Base a Níquel (H= 250 mm).....	96
Fig. 26	Microdureza de componente Metálico del Recubrimiento Compuesto X200.....	97
Fig. 27	Diagrama de la Dureza del material del álabe, del segmento y del Recubrimiento.....	98
Fig.28	Variación del la Microrugosidad respecto al tiempo de tratamiento por chorro de perdigones.....	100
Fig. 29	Variación de la Rugosidad en función a la presión del aire.....	101
Fig. 30	Función de la Variación de la masa de las muestras respecto a la duración del tratamiento. ....	102
Fig. 31	RADIOGRAMAS.....	105

Fig. 32	Función de la Resistencia de Adhesión del Recubrimiento compuesto en base a Níquel respecto a la microrugosidad del material de la base. ....	106
Fig.33	Variación de la Resistencia al desgaste respecto al tiempo Operacional en el proceso de Operación del motor PT6A.....	109

-----