

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
SECCION DE POST-GRADO**



**“INVESTIGACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESGASTAMIENTO  
DE LAS PLATAFORMAS DE PUNTA DE LOS ALABES DE LA  
SEGUNDA ETAPA DE LA TURBINA DEL MOTOR 55 BC Y  
DESARROLLO DEL PROCESO DE SU RECUPERACIÓN POR EL  
METODO DE ASPERSIÓN POR DETONACIÓN”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN**

**INGENIERIA AERONAUTICA**

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

**ROBERTO SANDRO JIMÉNEZ TORREBLANCA**

**PROMOCION 1999-II**

**LIMA-PERU**

**2001**

# INDICE

Dedicatoria

Tema

Índice

Resumen

Introducción

Capítulo I	Investigación del Proceso de desgastamiento del Material de las Plataformas de Punta del Alabe de la Turbina del Motor 55BC en el proceso de operación	1
1.	Características Técnicas del Motor 55BC.	1
1.1	Nociones principales del Motor 55BC.	1
1.2	Dimensiones Exteriores, Masa y Parámetros Principales de Los Regímenes de Funcionamiento del Motor.	2
1.3	Características de Masa.	2
1.4	Parámetros Principales de los Regímenes de funcionamiento de Motor en el Banco de Prueba.	3
1.5	Características del Rotor de la II Etapa de la Turbina	6
2.	Características general del objeto de investigación	8

3.	Panorama de los materiales existentes de las plataformas de punta de los alabes de la turbina de otros motores y métodos de su reparación.	10
4.	Determinación del tipo principal de desgastamiento del material de la plataforma de punta del Alabe de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC durante el proceso de operación.	11
5.	Determinación de la magnitud cuantitativa del desgastamiento del material de la Plataforma de Punta.	13
Capítulo II	Elaboración del proceso tecnológico de recuperación de las plataformas de punta de los alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC, con el Método de Aspersión por Detonación.	18
2.1	Procesos Tecnológicos de Recuperación de piezas por los métodos de aspersión por detonación.	18
2.1.1	Aspersión por Llama de Gas.	23
2.1.2	Aspersión por Arco Eléctrico.	27
2.1.3	Aspersión por Plasma.	30
2.1.4	Aspersión por Detonación.	33
2.1.5	Método de Reparación de Fabrica de los Alabes.	36
2.2	Fundamentación para la aplicación del Método de Aspersión por Detonación.	37
2.3	Construcción del Equipo de Detonación.	40

2.4	Trabajo de la Cámara de Combustión.	45
2.5	Selección de los Materiales de Aspersión de Polvo.	50
2.6	Aspersión.	56
2.7	Proceso Tecnológico de Restablecimiento del Bandaje de los Alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC.	58
2.7.1	La Recepción y Detección de fallas de los Alabes.	58
2.7.2	La Preparación de la Superficie.	59
2.7.3	La Preparación del Material de Polvo.	61
2.7.4	La Aspersión de Recubrimientos.	62
2.8	Realizar la preparación del Equipo de Detonación para el trabajo.	63
2.9	Realizar la Aspersión para la muestra de Referencia.	65
2.10	Realizar la Aspersión para los anillos sujetos de las puntas de alabes de la Turbinas.	67
2.11	El Control de la Calidad de Recubrimiento pos Aspersión.	69
2.12	El Tratamiento Mecánico.	69
Capítulo III	Determinación de las propiedades físico mecánicas de Los recubrimientos aspersidos sobre las plataformas de punta de la Alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC.	71

3.1	Formación de los Recubrimientos.	71
3.2	Resistencia de adherencia del Recubrimiento con el material base.	73
3.3	Prueba de los Recubrimientos de Detonación del Material NHL a la Resistencia de Adhesión.	76
Capítulo IV	Análisis comparativo respecto a la Resistencia al Desgaste y a las Propiedades del Material propuesto NHL y del Material de Serie AMS 5837.	92
Capítulo V	Análisis de Costo Beneficio.	95
5.1	Costo de Recuperación de la Operatividad del Motor Colocando Alabes nuevos.	95
5.2	Costo de Recuperación de los 88 Alabes por el Método de Aspersión por Arco Eléctrico.	95
5.3	Costo de Recuperación de los 88 Alabes por el Método de Aspersión por Plasma.	96
5.4	Costo de Recuperación de los 88 Alabes por el Método de Aspersión por Detonación.	96
5.5	Costo de Recuperación de los 88 Alabes por el Método de Fusión recomendado por el fabricante.	97
	Conclusiones	100
	Recomendaciones	102
	Bibliografía	104

## INDICE DE FIGURAS

Fig 1.1	Diagrama del Rotor de la II Etapa de la Turbina	4
Fig 1.2	Plano del Alabe de la II Etapa de la Turbina	5
Fig 1.3	Alabes de la II Etapa de la Turbina	8
Fig 1.4	Plataforma de Punta de los Alabes	9
Fig 1.5	Esquema de Medición del Juego Total	13
Fig 1.6	Curva de variación del desgaste relativo del material de Material de la plataforma de la II etapa de la turbina respecto al tiempo operacional del motor 55BC durante su operación.	17
Fig 2.1	Esquema de aspersion por llama de gas	26
Fig 2.2	Esquema de un Aspensor por Arco Eléctrico	29
Fig 2.3	Esquema de un Aspensor por plasma	32
Fig 2.4	Esquema de un Aspensor por Detonación	35
Fig 2.5	Vista General de Equipo de Detonación	39
Fig 2.6	Diagrama Funcional del Equipo	42
Fig 2.7	Construcción de la Cámara de Explosión	48

Fig 3.1 Esquema de la Formación del Revestimiento durante la Aspersión	72
Fig 3.2 Micro estructura de la Zona de Adherencia del Recubrimiento Níquel-Cromo con el Material Base	75
Fig 3.3 Modelo de Prueba	77
Fig 3.4 Curva de Variación de la Resistencia de Adherencia en Función de la Distancia de Aspersión	82
Fig 3.5 Curva de la Resistencia de Adhesión del Níquel – Cromo respecto a la velocidad de vuelo de las partículas	85
Fig. 3.6 Curva de la resistencia de Adhesión del Níquel – Cromo respecto al espesor del recubrimiento	86
Fig. 3.7 Curva de la resistencia de Adhesión del Níquel – Cromo respecto a la temperatura de Calentamiento de la Base	88
Fig. 3.8 Micro estructura de la zona de adherencia del Recubrimiento Aspersado de Níquel – Cromo con el material del Alabe	90
Fig 4.1 Curvas de Variación del Desgaste Relativo de los Materiales de las Plataformas de Punta e los Alabes de la II Etapa de la Turbina Respecto al tiempo operacional	93
Fig 5.1 Cuadro Comparativo de Costos para Recuperar los Alabes	98
Fig 5.2 Cuadro Comparativo de Tiempo para Recuperar los Alabes	99

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Resultados de los Cálculos del Desgaste	16
Tabla 2.1	Cuadro Comparativo de Aplicación de Diferentes Procedimientos de Recubrimiento para proteger las piezas contra los diversos tipos de desgaste	22
Tabla 2.2	Materiales para el Recubrimiento por Aspersión	52
Tabla 2.3	Propiedades Funcionales de los Recubrimientos por Aspersión	53
Tabla 2.4	Influencia del Recubrimiento sobre la resistencia a la Fatiga	54
Tabla 3.1	Resultados de la Prueba de adherencia	83
Tabla 4.1	Características Comparativas de las Propiedades de los recubrimientos Aspersidos	94

## RESUMEN

Las plataformas de punta de los alabes del motor de la II etapa de la Turbina del motor 55BC son uno de los componentes del motor sometidos a las mayores exigencias de trabajo, debido a las necesidades operativas del motor, es necesario que no requieran reparación antes del tiempo establecido para el overhauls, a fin de que en todo este tiempo el motor trabaje dentro de sus parámetros de diseño.

Las estadísticas de reparaciones y la experiencia adquirida operando estos motores, nos muestra que el material de las plataformas de punta se desgasta antes de este tiempo, lo que ocasiona oscilación de los alabes, distorsión del flujo gasodinámico y por consiguiente pérdida de potencia en el motor.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad brindar una solución a este problema latente en el motor, para lo cual esta dividido en CINCO (05) capítulos.

El capítulo I partiendo de las características estructurales del alabe del motor de la II Etapa de la turbina, se determinan los principales tipos de desgastamiento de las plataformas de punta, su magnitud y características.

El capítulo II analiza los diversos procesos tecnológicos que existen para recuperar el desgaste de las plataformas de punta, y en él se desarrolla el método de aspersion por detonación.

Para establecer la adecuación del método en la recuperación de estas piezas, el capítulo III establece las propiedades mecánicas y físicas del recubrimiento por aspersion aplicado al bandaje de los alabes del motor 55BC.

El capítulo IV compara la resistencia al desgaste del material proveniente de fábrica con el recubrimiento propuesto, determinando en este último mejores cualidades para el trabajo.

Finalmente esta investigación efectúa en el capítulo V un análisis de costo-beneficio, que nos permite apreciar la ventaja económica de utilizar el método de aspersion por detonación en comparación con otros métodos.

Investigación culmina enunciando estableciendo conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del trabajo.

## INTRODUCCION

### **Actualidad del tema y tareas de la investigación**

La confiabilidad del trabajo de los motores de turbina de gas 55BC su potencia y empuje en gran medida depende de la operatividad y durabilidad de las plataformas de punta de los alabes de la turbina, a las cuales se les exigen fuertes requisitos técnicos como son: alta resistencia al desgaste, a las altas temperaturas y a la deformación a altas temperaturas.

Las plataformas de punta de los alabes de las turbinas constructivamente se hacen de diferentes formas. Por ejemplo en el motor 55BC, las plataformas de punta se hacen en forma de láminas planas del material BRR $\wedge$ , que es mas resistente al desgaste en comparación con el material del alabe de la turbina que es en base a Ni con la adición de elementos y aleaciones. Estas láminas se sueldan a la plataforma de punta del alabe y luego se tratan térmicamente con la finalidad de eliminar las tensiones térmicas internas.

Las plataformas de punta sirven para garantizar la pretensión negativa en el contorno de todas las plataformas de punta, que debe mantenerse en el proceso de operación del motor.

La experiencia de operación muestra que las plataformas de punta se desgastan. Este desgaste provoca la aparición de juegos entre las plataformas de punta. La aparición de los juegos entre las plataformas de punta provoca oscilaciones de los alabes, lo que distorsiona el flujo gasodinámico de diseño, que pasa a través del alabe de la turbina.

A su vez la distorsión del flujo gasodinámico de diseño a través del alabe de la turbina provoca que el régimen de trabajo de la turbina sea distinto al de diseño y también ocasiona pérdidas de potencia del motor.

A pesar de que las plataformas de punta se fabrican de diferentes materiales con bases diferentes, todavía no se ha resuelto el problema de diseñar plataformas de punta resistentes al desgaste, que garanticen la confiabilidad del trabajo de la turbina en todo el periodo de tiempo de vida del motor.

Al igual que antes, en la actualidad continua la búsqueda de nuevos materiales, de nuevas construcciones de métodos de aspersion de recubrimientos resistentes al desgaste, y el desarrollo de métodos de evaluación de sus propiedades.

A parte de esto, en el proceso de operación se produce el deterioro, la exfoliación y el escamado de la capa aluminizada de la paleta del alabe de la turbina. Es por ello que en el proceso de reparación se necesita además recuperar estas capas aluminizadas deterioradas.

El trabajo actual, está dedicado a la investigación del desgastamiento del material de la plataforma de punta de los alabes de la turbina del motor 55BC durante el proceso de operación, y al desarrollo del proceso tecnológico de reparación de las plataformas de punta de los alabes de la turbina, y la evaluación de sus propiedades.

La tarea de investigación incluye:

1. La investigación del proceso de desgastamiento del material de la plataforma de punta del alabe de la turbina del motor 55BC durante el proceso de operación.
2. El desarrollo del proceso tecnológico de recuperación de las plataformas de punta de los alabes de la II etapa de la turbina del motor 55BC, por el método de aspersión por detonación.
3. La determinación de las propiedades físico-mecánicas de los recubrimientos aspersidos sobre las plataformas de punta de los alabes de la II etapa de la turbina del motor 55BC.
4. La realización del análisis comparativo sobre la resistencia al desgaste de los materiales propuestos con los materiales de serie.
5. Desarrollo del proceso tecnológico de recuperación de la capa aluminizada de la parte del alabe de la segunda etapa de la turbina del motor 55BC.
6. El desarrollo de las recomendaciones respecto a la aplicación del proceso tecnológico de reparación de las plataformas de punta de los alabes de la II etapa de turbina del motor 55BC por el método de aspersión por detonación.

# CAPITULO I INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE DESGASTAMIENTO DEL MATERIAL DE LAS PLATAFORMAS DE PUNTA DEL ALABE DE LA TURBINA DEL MOTOR 55BC EN EL PROCESO DE OPERACIÓN.

## 1. Características Técnicas del Motor 55BC.

### 1.1 Nociones principales del Motor 55BC:

El Motor 55BC es un turborreactor con dos ejes. El compresor consta de once (11) etapas, cinco (5) etapas del rotor de baja presión y seis (6) etapas de rotor de alta presión. La cámara de combustión es anular (inyectores con aeración) y la Turbina es de dos (2) etapas. Los Alabes de trabajo enfriados en la I etapa y los Alabes de la Tobera de Turbina enfriados en la I y II etapa. Cuenta con cámara de post combustión y tobera reactiva regulable para velocidades supersónicas.

El arranque del motor en tierra se efectúa mediante el turbo arrancador TC- 21 haciendo uso de las fuentes de alimentación autónomas o de las del aeródromo.

El motor 55BC está equipado con el mando reversible de dos velocidades de emergencia para la bomba del sistema de servomotores hidráulicos del avión.

### 1.2 Dimensiones Exteriores, Masa y Parámetros Principales de los Regímenes de Funcionamiento del Motor.

#### Dimensiones Exteriores

Longitud desde la brida delantera hasta el corte de las compuertas interiores de la tobera en posición abierta 4949.5 +13

-20

Diámetro de la entrada del motor en el lugar de empalme con el avión	860 mm
Diámetro de la brida de la Turbina	986 mm
Diámetro del cuerpo de la cámara de combustión Principal	908.4 mm

### 1.3 Características de Masa

La Masa en el estado de entrega (Kg):

- Del motor con camisa de enfriamiento	1956 <sup>+2%</sup>
- Del motor sin camisa de enfriamiento	1926 <sup>+2%</sup>
- De la tobera reactiva (sin camisa de enfriamiento)	247 <sup>+2%</sup>

Masa de motor seco con el turbo arrancador, así como con los grupos CK-224-1 y con dos conductores para las bujías del circuito de postcombustión y para el PT12-11B (Kg)	1766,5 <sup>+2%</sup>
---	-----------------------

**Nota** Datos de la masa para el motor de fabricación antes del 1/1/1976:

Masa del motor seco (Kg)	1773,5 <sup>+2%</sup>
Masa en el estado de entrega sin camisa de enfriamiento (Kg)	1933 <sup>+2%</sup>

#### 1.4 Parámetros Principales de los Regímenes de Funcionamiento de Motor en el Banco de Prueba

Parámetros	Denominación del Régimen				Marcha Lenta
	Post combustión plena	Postcombustión mínima	Máximo	Régimen de Crucero	
Revoluciones Del RBP, r.p.m	8482 ± 43	8482 ± 43	8482 ± 43	7468 <sup>+170</sup>	3730 <sup>+ 85</sup>
%	100 ± 0,5	100 ± 0,5	100 ± 0,5	88 <sup>+2</sup>	44 ± 1
Empuje Estático Kgf	115000 +ilim - 2%	≤ 9990	8000 + ilim -2%	4200± 0,5%	≤ 350
Consumo Específico de Combustible, Kg Combust. Kgf Empuje/h	1,8 <sup>+0,06</sup>	≤ 1,5	0,94 <sup>+0,03</sup>	0,78 <sup>+0,03</sup>	-
Consumo de Aire, Kg/s	105	105	105	-	-

**Nota** Los parámetros de todos los regímenes se exponen reducidos a las condiciones atmosféricas standard y relacionados con los valores nominales reducidos de revoluciones del Rotor del compresor de baja presión.

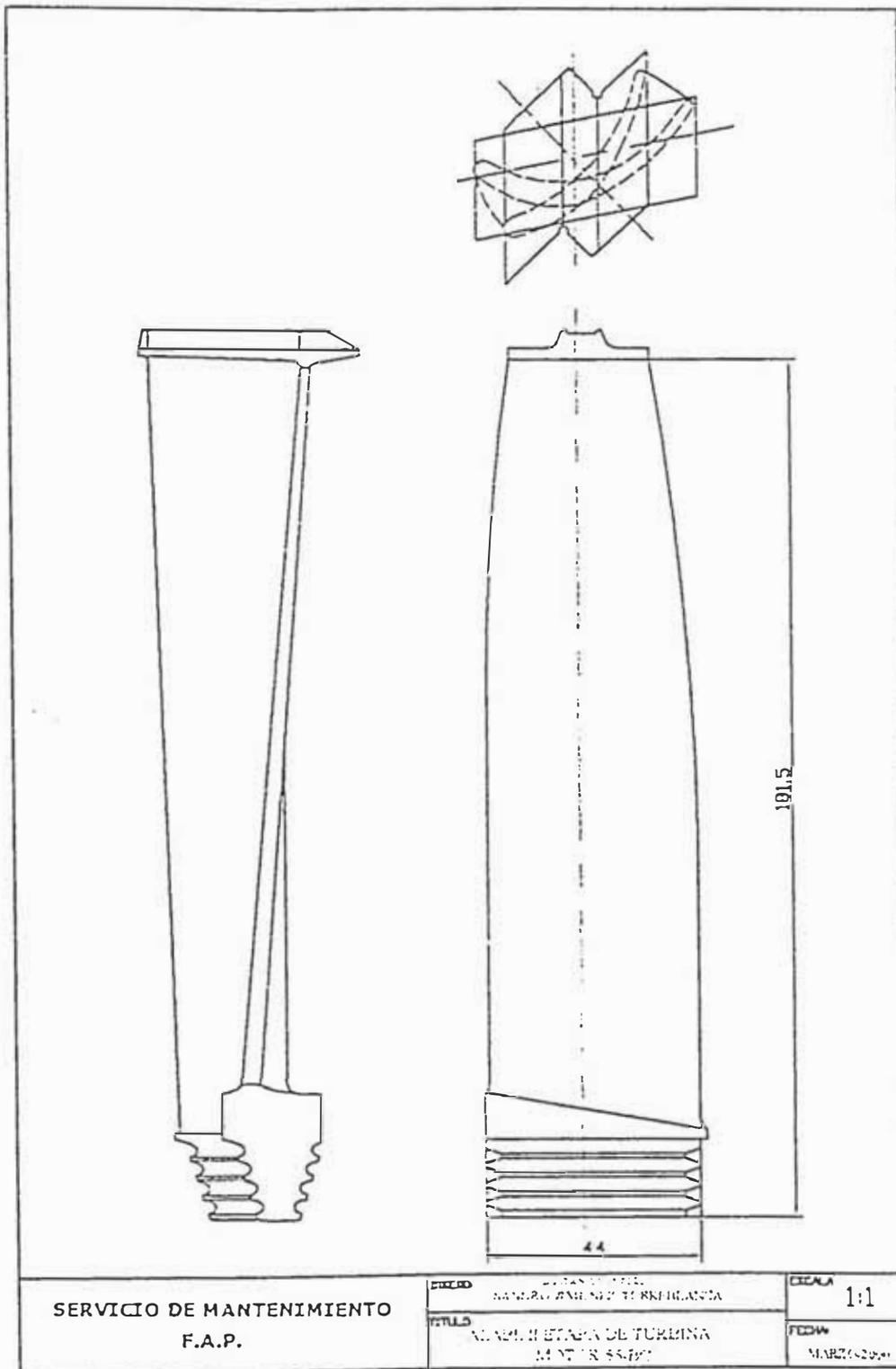


Fig. 1.2  
Plano del Alabe de la II Etapa de la Turbina

## 1.5 Características del Rotor de la II Etapa de la Turbina

Observando la Figura 1.1 y 1.2 se aprecia la estructura del rotor de la II Etapa de la Turbina. Este consta del árbol interior (101), y el disco (103) con el laberinto (82) y los alabes (72) de la turbina. En la parte trasera del árbol se sujetan por veinte pasadores el disco, el anillo laberinto (92), el laberinto interior (95) y el casquillo (100). La cavidad interior del árbol está cerrada con el tapón ciego (99). La unión del árbol con el disco es análoga a la del rotor de la II etapa.

El rotor de la II Etapa de la Turbina es de dos apoyos. De apoyo delantero sirve el cojinete de bolas (10) radial – axial que se ubica en el rotor del compresor de baja presión, de apoyo trasero sirve el cojinete de rodillo (102) cuyo anillo exterior va puesto a presión en la caja del cojinete ubicado en el interior del árbol exterior de la turbina. El anillo exterior del cojinete (102) se fija mediante tuerca. El anillo interior del cojinete se fija en el casquillo del árbol interior por medio de tuerca y arandela.

En la parte media de los árboles de la turbina se monta sobre ellos el cojinete de rodillos, destinado para limitar la flexión del árbol interior durante las evoluciones del avión. La unión de los árboles del compresor de baja presión y del rotor de la II Etapa de la Turbina es por estrías móviles.

La fijación del rotor de la II Etapa de la Turbina en el sentido longitudinal y la transmisión de los esfuerzos axiales se realiza a través de la tuerca esférica que se conjuga con la arandela esférica. En la unión esférica de los árboles de la turbina y del

Compresor de baja presión se asegura un huelgo axial determinado ajustado por la arandela calibrada.

En este caso se eliminan los momentos de flexión complementarios producto de los ladeos del árbol del rotor de la II Etapa de la Turbina el cual es bastante largo bastante largo. El rotor de la II Etapa de la Turbina forma junto con el rotor del compresor de baja presión el rotor de baja presión del motor.

Los alabes de la II Etapa de la Turbina son estampados, no enfriados y se fabrican de aleación blanda resistente al calor. El empalme de los alabes con el disco se efectúa mediante el cierre de cuatro dientes tipo "pino". La fijación longitudinal de los alabes se asegura por el laberinto (82) y cierres de placa (83).

Los alabes de la II Etapa de la Turbina están hechos con aletas de bandaje o plataformas de puntas. Al instalar los alabes, las aletas tocan unas con otras y en el proceso de trabajo amortiguan las oscilaciones de los alabes.

El rotor de la II Etapa de la Turbina se equilibra por pernos de equilibrio, y eje se somete a balanceo dinámico antes de ponerle en el disco. Durante el ensamblado las holguras del rotor de la II Etapa de la Turbina y las del rotor de la turbina se ajustan seleccionando las arandelas calibradas.

## 2. Característica general del objeto de investigación.

Con la finalidad de evitar y disminuir las oscilaciones y vibraciones entre los alabes la II etapa de la turbina del motor 55BC, los 88 alabes hacen contacto entre sí en la periferia a través de las plataformas de punta (Fig. 1.3), y (Fig.1.4).

Estas plataformas de punta de los alabes de turbina son superficies cuadrangulares de 3mm X 4mm según se aprecia en la vista A y por diseño desde su construcción se encuentran en el centro de pretensión negativa igual a -0.4 mm.

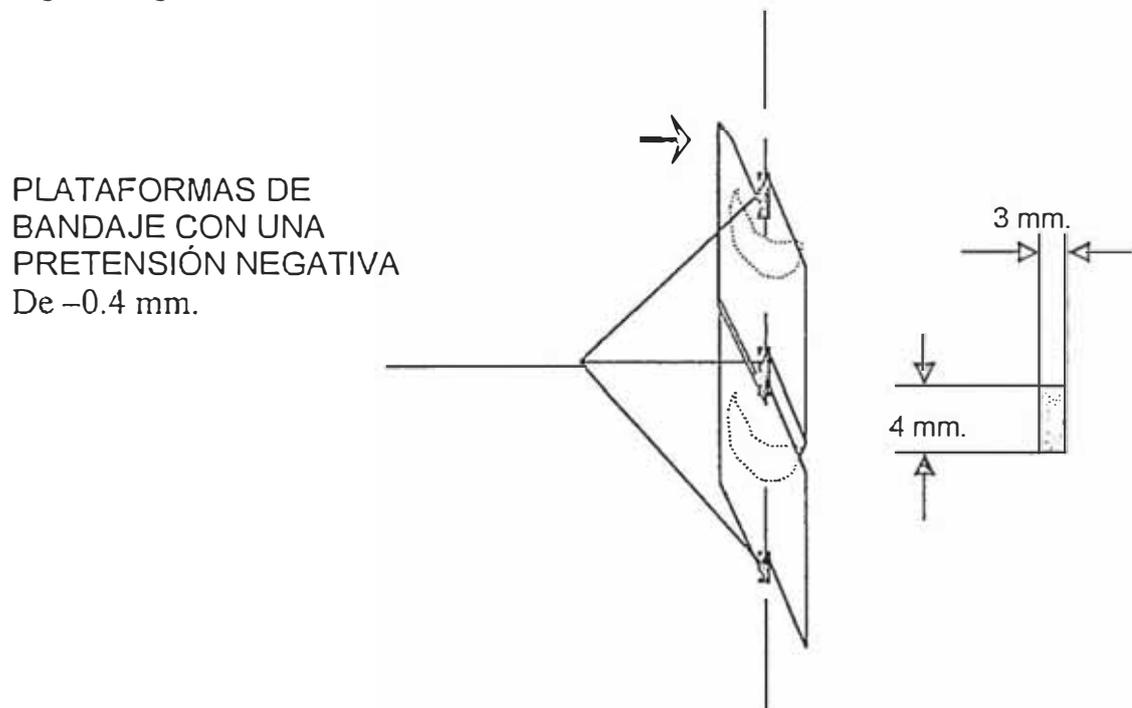


Fig.1.3  
Alabes de la II Etapa de la Turbina  
(Vista desde arriba)

### Características de Fábrica:

El material de los alabes -----	- En base a níquel
E tratamiento térmico -----	- normalizado
Recubrimiento -----	- Aluminizado

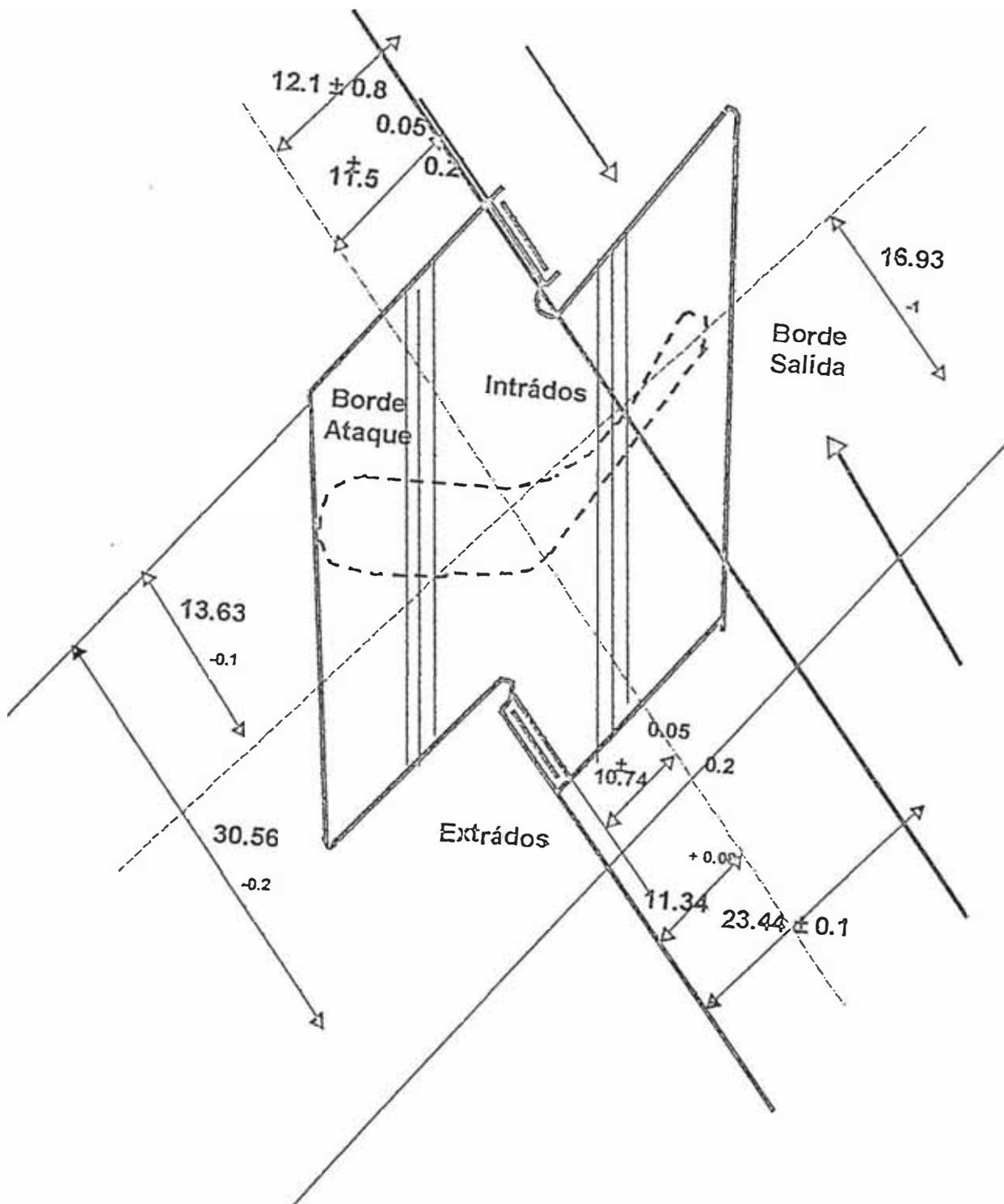


Fig. 1.4  
Plataforma de Punta de los Alabes

**3. Panorama de los materiales existentes de las plataformas de punta de los alabes de la turbina de otros motores y métodos de su reparación.**

En el motor Jt-3D, los alabes de la 1ra etapa de la turbina se confeccionan de material AMS5837

Las plataformas de punta son en forma de laminas rectangulares 2x3mm. Se confeccionan del mismo material que el alabe, que tiene características resistentes al desgaste superiores que el material de las plataformas de punta del alabe del motor 55BC.

En el motor 55BC, la experiencia de operación demuestra que el material de láminas no soporta la pretensión en las superficies de contacto de las plataformas de punta de la turbina. Las láminas se desgastan formando un juego total en la periferia que sobrepasa al permitido.

En el proceso de reparación, las superficies desgastadas de las laminas de BRR $\wedge$  se pulen hasta obtener un contorno correcto dentro de las tolerancias, y luego se sueldan nuevas laminas según la tecnología del fabricante.

#### **4. Determinación del tipo principal de Desgaste del Material de la plataforma de punta del Alabe de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC durante el proceso de operación.**

El rotor de la II Etapa de la Turbina es una de las unidades más cargada del motor. En su proceso de trabajo, esta sometido a la acción de grandes fuerzas estáticas y dinámicas (vibratorias), así como sufre la influencia de las vibraciones bruscas de altas temperaturas debido a los cambios de regímenes de trabajo del motor.

Son especialmente duras las condiciones de trabajo para los alabes del rotor, sobre ellos actúan grandes fuerzas centrífugas, así como fuerzas aerodinámicas debidos al flujo del gas. Son estas fuerzas las que originan los esfuerzos de tracción, flexión y de torsión en los alabes. Además de todo eso, también actúan sobre los alabes cargas dinámicas causadas por la rotación de los mismos en el campo de presión y temperatura variable de los gases, lo que origina oscilaciones forzadas.

Como parte de la estructura de los alabes las plataformas de punta también están sometidas a la acción de las mismas fuerzas y condiciones durante la operación del motor, siendo la parte mas afectada en ellos las superficies en contacto que existe entre cada una de las 88 plataformas.

Los factores que más afectan a las plataformas de punta durante la operación del motor son las vibraciones y el flujo gaseoso:

### **a) Vibraciones**

La vibración de las uniones fijas provoca desplazamientos tangenciales de las superficies de contacto, una con respecto a la otra con muy pequeñas frecuencias y amplitud. Estos micro desplazamientos de las superficies conllevan al desgastamiento de los volúmenes locales en el proceso de operación. Este tipo de desgastamiento de los materiales se denomina corrosión-Fretting.

### **b) Flujo gaseoso**

El flujo gaseoso que sale de la cámara de combustión con una temperatura de 550°C y una velocidad de  $V=200$  m/s pasando a través de la turbina, actúa sobre los alabes provocando la erosión gaseosa de las superficies.

La acción de la erosión gaseosa sobre las superficies de contacto de las plataformas de punta comienza a producirse cuando entre las superficies de contacto aparece un juego físico.

La erosión gaseosa también provoca el desgastamiento de las superficies de contacto de las plataformas de punta pero en menor grado en comparación con la corrosión-fretting. Partiendo de lo señalado arriba se deduce que el principal tipo de desgastamiento del material de las plataformas de punta de los alabes de II etapa de la turbina en el proceso de operación del motor 55BC es la corrosión-fretting.

5. Determinación de la magnitud cuantitativa del desgaste del material de la plataforma de punta.

Con la finalidad de determinar la magnitud cuantitativa del desgaste del material de la plataforma de punta del alabe de la turbina, se realiza la medición del juego total entre las superficies de contacto. (fig 1.5)

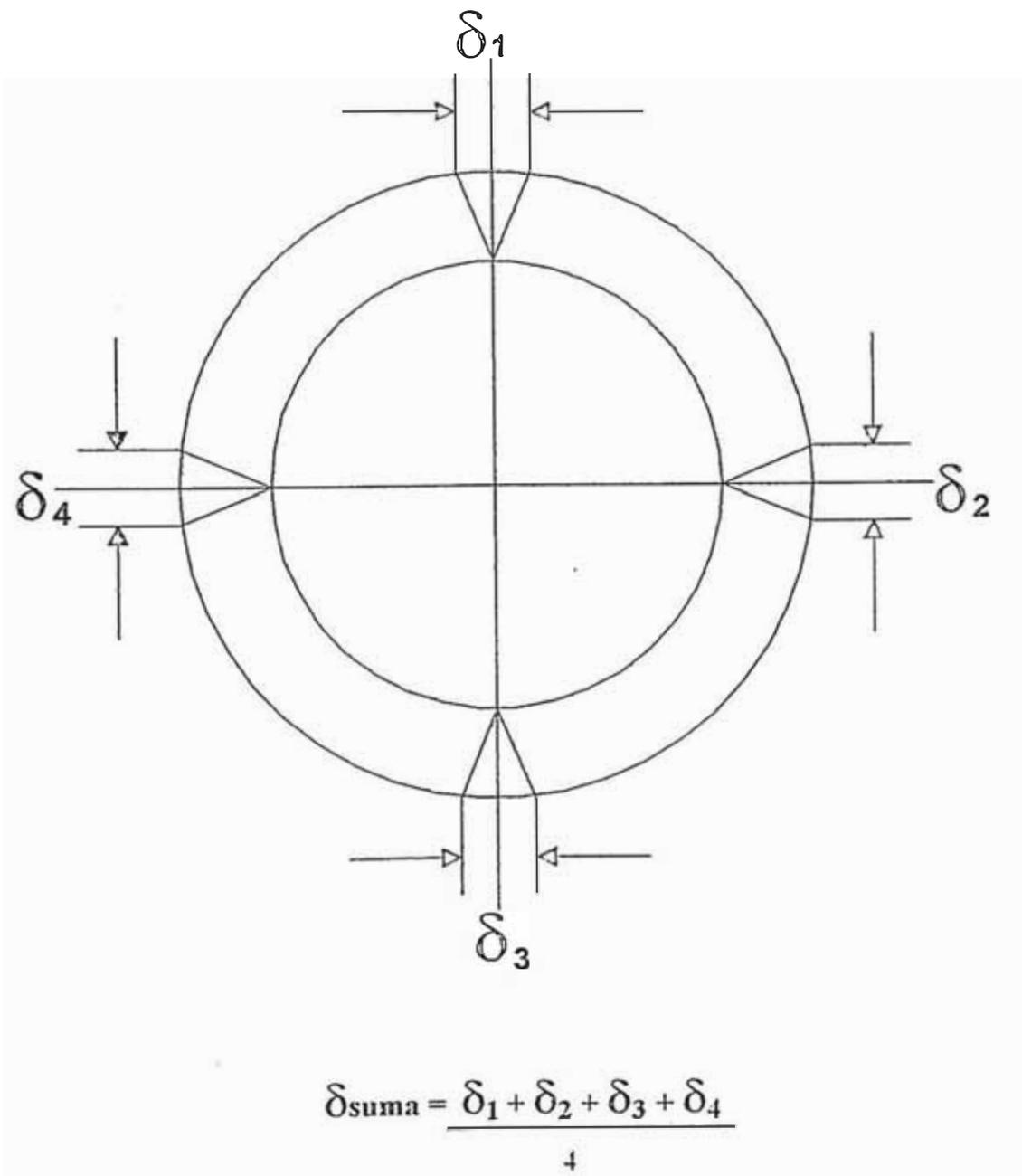


Fig. 1.5  
Esquema de Medición del Juego Total

Para determinar el desgaste del material del bandaje de los alabes, para cada tiempo de trabajo se utilizó como muestra de 45 a 50 motores 55BC.

Las mediciones se realizaron en motores que trabajaron un tiempo de operación de 50 hrs, 100 hrs, 150 hrs, 200 hrs y 300 hrs.

De cada grupo de motores, se efectuó la medición de 8 a 10 segundos etapas de la turbina.

El desgaste cuantitativo del material de la plataforma de punta de la II etapa de la turbina se determinó según las formulas:

$$(1) \quad \delta_{\text{Total}} = \delta_{\text{Suma}} + \delta_{\text{Pretensión}}$$

$$(2) \quad \delta_{\text{Desg}} = \frac{\delta_{\text{Total}}}{n} \cdot 100$$

Donde:

$\delta_{\text{Total}}$

- Es el juego total obtenido durante el desgaste.

—

$\delta$

- Es el desgaste relativo del material de la  
plataforma de punta expresado en porcentajes.

n = 176 es la cantidad de las superficies de contacto de  
las plataformas de punta en 88 alabes de la II etapa  
de la turbina.

Los resultados de las mediciones se muestran en la tabla No. 1.1

**Tabla 1.1**  
**Resultados de los Cálculos del Desgaste**

Tiempo hrs.	50	100	150	200	300
$\delta$ mm	0	1,12	1,57	2,07	2,58
$\delta$ Suma en mm	0	1,12	1,57	2,07	2,58
$\delta$ Pretensión mm.	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\delta$ Total en mm.	0,4	1,52	1,97	2,47	2,98
$\delta$ desgaste = $\frac{\delta_{Total} \cdot 100\%}{n}$	0,2	0,8	1,1	1,4	1,7

Según los resultados obtenidos graficamos la función del desgaste relativo del material de la plataforma de punta de la II etapa de la turbina respecto al tiempo operativo del motor 55BC en el proceso de operación (Fig.1.6).

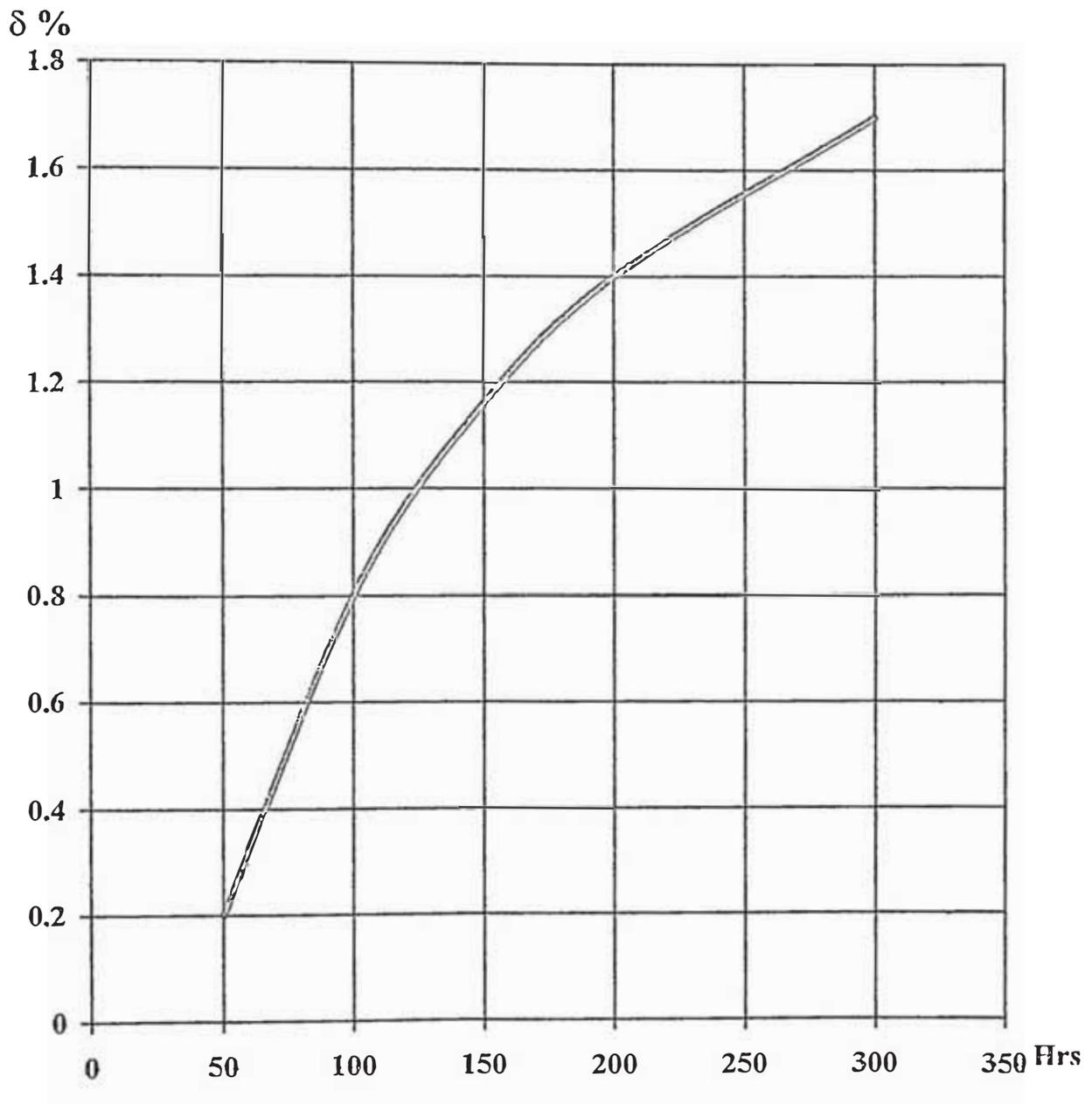


Fig.1. 6

Curva de variación del desgaste relativo del material de la plataforma de la II Etapa de la Turbina respecto al tiempo operacional del motor.

## **CAPITULO II ELABORACIÓN DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE RECUPERACION DE LAS PLATAFORMAS DE PUNTA DE LOS ALABES DE LA II ETAPA DE LA TURBINA DEL MOTOR 55BC, CON EL METODO DE ASPERSION POR DETONACION.**

### **2.1 Procesos Tecnológicos de Recuperación de piezas por los métodos de aspersion o rociados Térmicos**

El progreso técnico en la industria de los motores esta ligado ininterrumpidamente con la automatización de los procesos tecnológicos, con el aumento de las velocidades, de las potencias y de la productividad. Esto conlleva a que aumenten las temperaturas de trabajo, las presiones de trabajo, las velocidades de los flujos gaseosos, los cargas estructurales sobre los elementos constructivos de los conjuntos y de los accesorios de los motores de aviación. Por esta razón conjuntamente con la creación de nuevos materiales constructivos para garantizar una alta resistencia al desgaste, viscosidad al impacto, resistencia a la erosión, en los últimos años una gran importancia se le da a la protección de los materiales con recubrimientos.

Estas tecnologías mejoran sustancialmente las características del servicio de las piezas aplicando procesos de tratamiento de la superficie con recubrimientos tanto para establecer capas protectoras como para recuperar tamaños y propiedades iniciales.

Actualmente se conocen varios tipos de procesos de aplicación de recubrimientos, siendo los de recuperación de la pieza superficial por métodos mecánicos los que ocupan un lugar importante debido a la propiedad de recuperar las características iniciales de las piezas sin afectar las propiedades de las áreas adyacentes a la zona trabajada.

De la Fig. 1.6 se deduce, que el desgastamiento del material de la plataforma de punta de la etapa II de la turbina es directamente proporcional a la cantidad de tiempo de trabajo del motor en la operación.

Hasta 50hrs, el desgastamiento del material se produce debido a la corrosión-fretting.

Después de 50 hrs con la aparición del juego físico entre las superficies de contacto, el desgastamiento del material de la plataforma de punta se produce debido a la suma de acciones de la corrosión - fretting y de la erosión gaseosa, producto del flujo gaseoso que sale de la cámara de combustión con una  $T=550^{\circ}\text{C}$  y una velocidad  $V=200\text{ m/s}$ .

La aparición del juego físico entre las superficies de contacto de las plataformas de punta provoca un flujo anormal del caudal gaseoso a través de la etapa II de la turbina. Esto a su vez reduce el rendimiento de la turbina y la potencia del motor.

Con la finalidad de aumentar la resistencia al desgaste de las superficies de contacto de las plataformas de punta de los alabes de la etapa II de la turbina del motor 55BC en este trabajo se propone:

- a) Analizar entre los procesos de aspersion de recubrimientos, el procedimiento y material apropiado que permita obtener propiedades físico-mecánicas mas altos respecto a la resistencia al desgaste del material de diseño, a fin de aplicarlo en la reparación de las plataformas de punta.

- b) Recuperar las dimensiones de diseño y propiedades físico-mecánico de las plataformas de punta mediante el método de aspersion por detonación.

Dentro de esta variedad de procesos mecánicos el más importante es el de Aspersión o Rociado térmico.

Debido a los avances tecnológicos que permitan utilizar nuevos equipos con diversas aplicaciones, y el desarrollo de materiales de aporte en diversas formas (alambre, cordón, polvo), los métodos de aspersion de recubrimientos han alcanzado hoy en día el liderazgo para las diversas aplicaciones en la Ingeniería.

La aspersion es un grupo de procesos en los que los materiales de recubrimiento metálico o no metálicos se depositan fundidos o semifundidos sobre un metal base, para formar así un deposito aspersionado. El material del recubrimiento puede venir en forma de alambre, varilla, cordón o polvo. El material de aspersion se calienta hasta un estado plástico o derretido mediante una flama de gas oxicom bustible, arco eléctrico, plasma o detonación. Este material caliente es expulsado de la pistola de aspersion hacia el metal base mediante un chorro de gas. La mayor parte de los metales, no metales, compuestos metálicos, óxidos, cerámicos pueden ser aplicados, lo que es una gran ventaja respecto a otros métodos por el amplio rango de materiales para aspersionar. Esto facilita obtener la compatibilidad entre el material base con el del recubrimiento.

El material base por lo regular se hace mas áspero utilizando abrasivos, a fin de prepara una estructura apropiada para la adherencia del material de aporte.

Cuando las partículas fundidas chocan con el material de base, se aplanan y forman plaquetas delgadas que se ajustan a las irregularidades de su superficie y a la geometría de la pieza. Estas plaquetas se enfrían y solidifican con rapidez y las capas sucesivas se acumulan hasta el espesor deseado conforme las partículas inciden sobre el material base.

La adhesión entre el material base y el material de recubrimiento puede ser mecánica, metalúrgica, química o de naturaleza combinada, y la densidad del depósito del recubrimiento depende del tipo de material, del método de aspersión utilizado y de las condiciones en que se efectúe el proceso.

Tabla 2.1

Cuadro Comparativo de Aplicación de diferentes procedimientos de recubrimiento para proteger las piezas contra los diversos tipos de desgaste

TIPOS DE RECUBRIMIENTO	DESGASTE ABRASIVO	DESGASTE ADHESIVO	EROSIÓN	DESGASTE POR VIBRACIÓN
Galvánico y Químico	Con frecuencia	De preferencia	Rara vez	Rara vez
Por conversión	Rara vez	—	Posiblemente	Con frecuencia
Pulverización	De preferencia	—	Con frecuencia	De preferencia
PVD y CVD	—	Rara vez	De preferencia	Posiblemente
Por inmersión	—	—	—	—
Por difusión	De preferencia	De preferencia	Con frecuencia	Rara vez
Lubricantes sólidos	—	De preferencia	—	Con frecuencia

Los procesos más usados de aspersion son:

1. Aspersión por Llama de Gas
2. Aspersión por Arco Eléctrico
3. Aspersión por Llama
4. Aspersión por Detonación

### **2.1.1 Aspersión por Llama de Gas**

En este proceso, el material de aspersion se alimenta a una flama de gas oxicomustible, la cual lo funde. Ya sea que el material este en forma de alambre, varilla o polvo, la fuerza de la flama impulsa las partículas hacia la superficie a trabajar.

Es posible rociar una amplia variedad de materiales en estas formas. Los materiales que no pueden fundirse con una flama de gas oxicomustible, y los que se queman o se oxiden severamente en la flama oxicomustible no pueden utilizarse.

Se dispone de accesorios para la aspersion por flama de gas, como chorros de aire y capuchones de aire para modificar las características de la flama.

Los materiales se depositan en múltiples capas y el espesor total del material depositado depende de varios factores.

1. Tipo y propiedades del material de recubrimiento.
2. Condición del material de la pieza de trabajo, incluyendo la geometría.
3. Requisitos de servicio del producto recubierto.
4. Tratamiento posterior del producto recubierto.

Los gases combustibles de uso mas común son el acetileno, gas natural, gas propano, hidrógeno.

El acetileno combinado con el oxígeno produce temperaturas mas altas, las características de la flama con hidrogeno facilita el trabajo de la pieza por tener menor brillo, y el propano es recomendable usarlo para aspersir metales y aleaciones de bajo punto de fusión.

La aspersión por llama de gas con alambre consiste principalmente en alimentar en forma continua a la pistola de aplicación con el alambre metálico que se va a depositar.

La pistola consiste en una unidad impulsora que alimenta el alambre, y una cabeza de gas que controla y mezcla los fluidos de gas, combustible, oxigeno y aire comprimido. El alambre que ingresa a la boquilla es fundido por la acción de una llama coaxial. La llama esta rodeada por una corriente coaxial de gas comprimido generalmente aire que cizalla el material fundido formando gotas y lo impulsa hacia el área a aspersir. En aplicaciones especiales se puede usar gas inerte en vez de aire.

Se emplea boquillas y tazas de aire de diversos tamaños para manejar los alambres de distintos diámetros.

La aspersión por llama de gas de varillas es similar al de alambre, aunque se requiere un mayor cuidado cuando se aplican varillas cerámicas, debido a que cuentan con un punto de fusión elevado y conductividad térmica baja en comparación con los metales.

En la aspersion por llama de gas con polvo, el material a aspersir se alimenta a la pistola a través de una tolva. Esta puede estar lejos de la pistola o montada sobre ella. Este polvo puede aspirarse o transportarse a la llama por un sistema de alimentación de aire, mediante chorro de oxigeno o por gravedad.

La flama funde el polvo y lo proyecta a la zona a trabajarse por acción de un chorro de aire comprimido o por acción de los gases de la combustión.

Una unidad de aspersion por llama de gas puede ser pequeña y manipulable así como grande y manipulable mecánicamente para trabajar piezas en movimiento.

1. Pistola de aspersion
2. Material de Aspersion y equipo de alimentación
3. Sistema de oxigeno y controles
4. Sistema de gas combustible y controles
5. Fuente de aire comprimido o gas inerte y controles
6. Mecanismo para sujetar la pieza de trabajo
7. Dispositivos de manejo de la unidad, automático o semiautomático
8. Accesorios

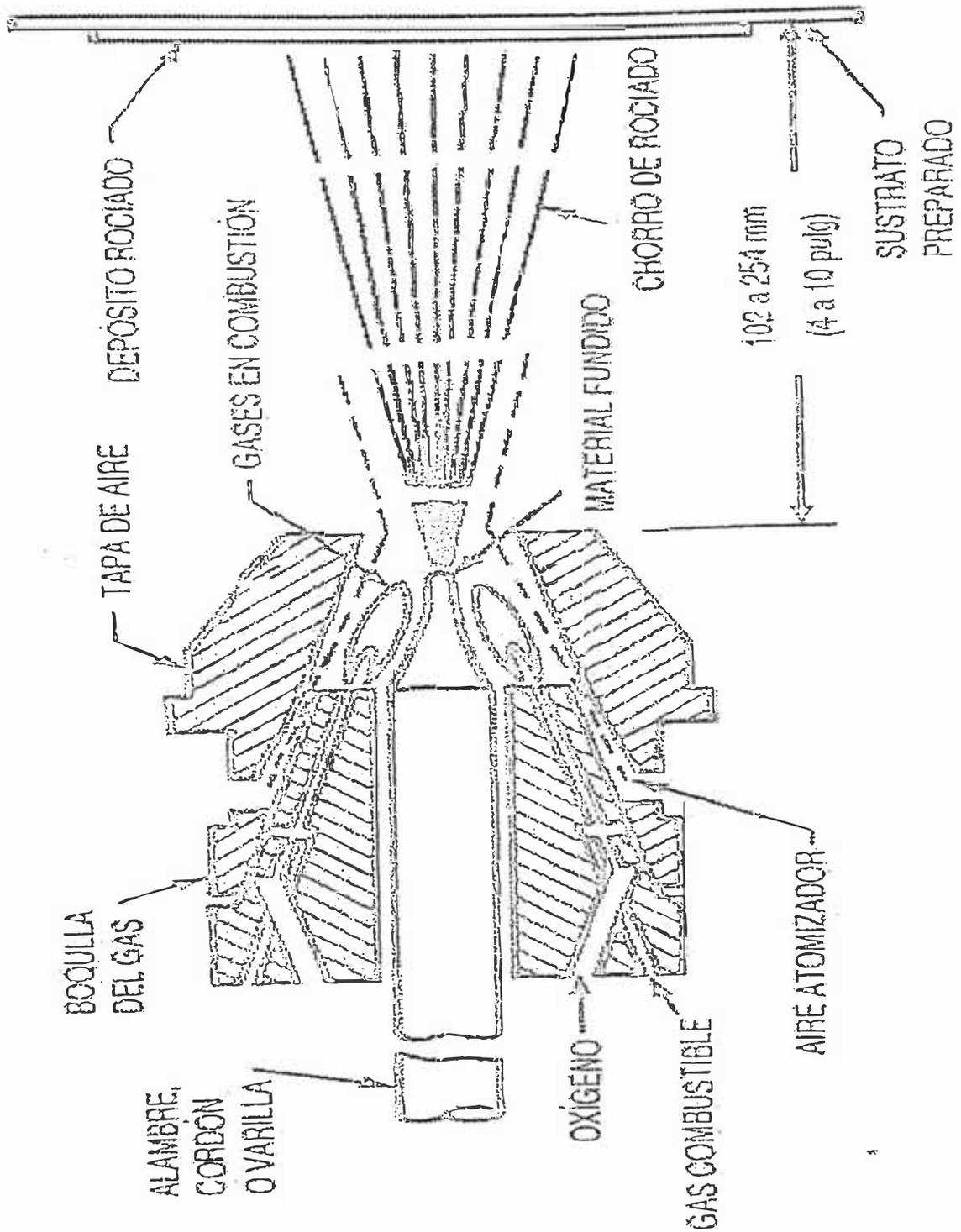


Fig. 2.1  
Esquema de un Aspesor por Llama de Gas

### 2.1.2 Aspersión por Arco Eléctrico

Este proceso de aspersión se vale de un arco entre dos alambres del material a aspersir, que se mantienen aislados uno del otro y avanzan automáticamente para encontrarse en cierto punto de un chorro de gas atomizador.

Una diferencia de potencial de 18 a 40 voltios aplicada entre los alambres conductores inicia un arco en el punto donde convergen, fundiendo las puntas de ambos alambres. Un gas atomizador, aire comprimido o gas inerte se dirige a la zona del arco, donde cizalla las gotas fundidas y forma una pulverización.

Normalmente se usan fuentes de potencia de corriente continua y potencial constante. La punta del alambre negativa (cátodo) alcanza una temperatura mayor que la del alambre positivo (ánodo) fundiéndose con mayor rapidez, en consecuencia las partículas atomizadas del cátodo son mas pequeñas que las del alambre del ánodo.

La brecha del arco y el tamaño de las partículas aspersidas aumenta con el voltaje, el cual debe mantenerse en el nivel mas bajo posible para que produzca un arco estable a fin de obtener recubrimientos uniformes.

## **Unidad de aspersion por arco eléctrico típico**

1. Una fuente de potencia de estado sólido de corriente continua, por lo regular del tipo de voltaje constante.
2. Un sistema a alimentación de doble alambre.
3. Un suministro de gas comprimido con reguladores y medidores de flujo integrados a la unidad de control.
4. Una pistola de aspersion con arco y los interruptores pertinentes.

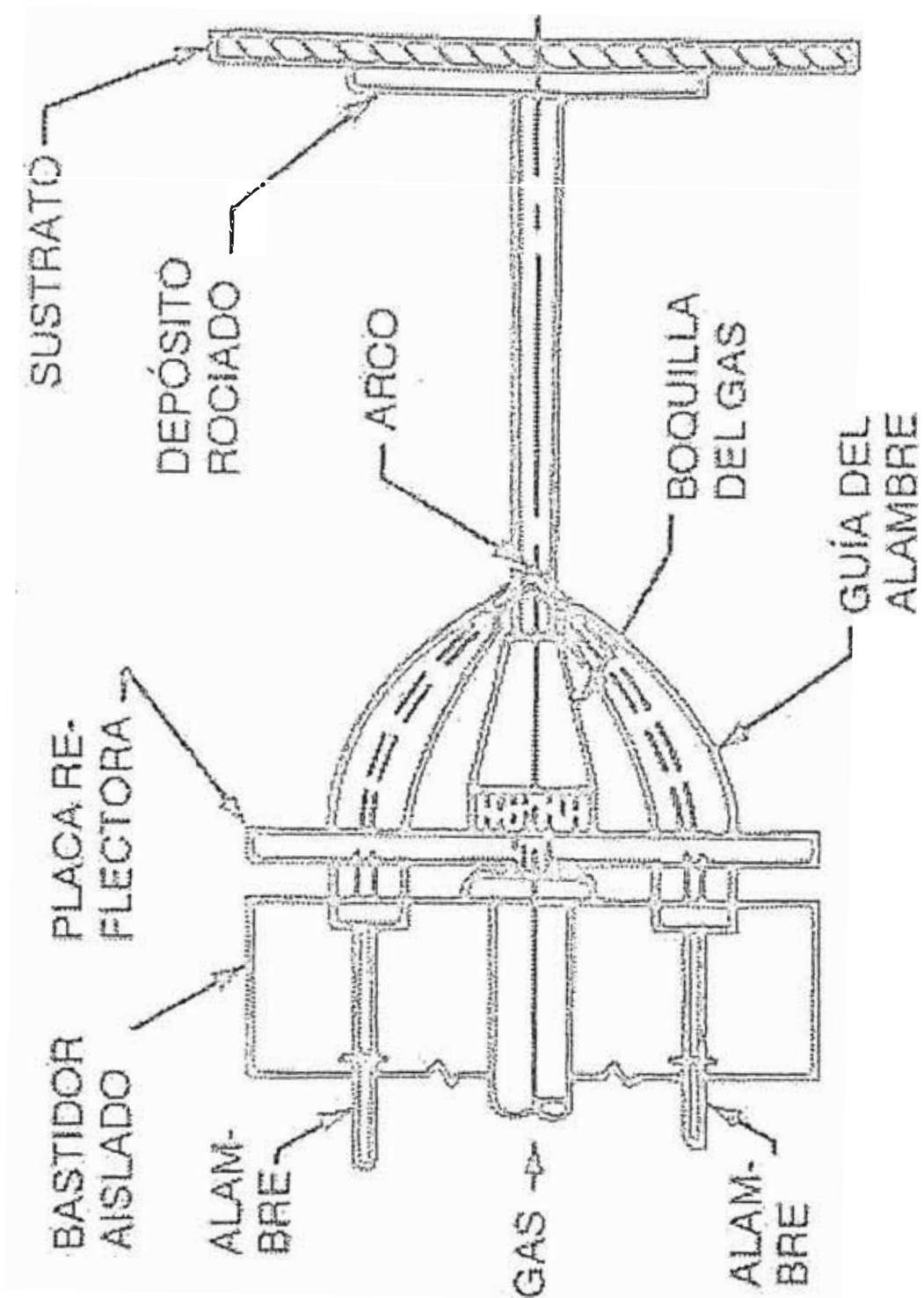


Fig. 2.2  
Esquema de un aspersor por arco eléctrico

### 2.1.3 Aspersión por Plasma

Plasma se denomina al gas en el cual una parte considerable de sus átomos o moléculas están ionizadas y la concentración de los electrones y de los iones negativos es igual a la concentración de los iones positivos.

Entre el cátodo y el ánodo se produce un arco eléctrico a través del cual se hace pasar un gas inerte. Atravesando el arco eléctrico el gas inerte se ioniza, convirtiéndose en un chorro de plasma . El propio chorro de plasma tiene alta temperatura, velocidad, conductividad eléctrica, es inerte y se puede controlar magnéticamente.

Para obtener depósitos de calidad es necesario introducir el polvo en el punto preciso del arco y con la tasa de alimentación correcta. Puesto que las partículas permanecen en el plasma un tiempo muy corto, variaciones pequeñas en la posición del punto de alimentación pueden alterar significativamente la cantidad de calor que se transmite al polvo.

Los mecanismos para alimentar polvos son de tres tipos : de aspirador, mecánicos y de lecho fluidizado localizado.

Los gases que se utilicen en este proceso deben tener calidad de soldadura, bajo contenido de humedad y de oxígeno. Los cuatro (04) gases de uso común utilizados son:

1. Nitrógeno Gas económico, diatómico que permite alcanzar tasas de aspersión de deposición elevadas.

2. Argón            Gas que produce plasmas de altas velocidades. Se utiliza para aspersir materiales que sufrirían efectos adversos si se usara hidrogeno o nitrógeno.
  
3. Hidrógeno :    Puede usarse hidrogeno en proporciones del 5 al 25% con nitrógeno o argón. La adicción del hidrogeno eleva el voltaje del arco y por lo tanto su contenido de calor. También puede tener un efecto perjudicial sobre ciertos metales que tienden a absorberlo cuando estén fundidos.
  
4. Helio           ·    Tiende a elevar el voltaje del arco y se usa mezclado con argón.

#### **Unidad de aspersión por plasma típico**

1. Fuente de Potencia
2. Alimentados de Polvo
3. Controles del Plasma y Gases
4. Sistemas de Gases del Plasma
5. Sistema de Refrigeración
6. Pistola de Aspersión

#### 2.1.4 Aspersión por Detonación

La aspersión consiste en la formación de un recubrimiento por medio de una precipitación dinámica sobre el material a trabajar o base.

Esta precipitación se logra a través de gotas derretidas o partículas fundidas del material de aporte que se forman durante el calentamiento del polvo, alambre o varilla y que son proyectadas por medio de la pistola de detonación.

Esta pistola de detonación es diferente a la de los métodos anteriormente expuestos, aprovecha la energía de las explosiones de las mezclas de oxígeno con gas combustible para lanzar las partículas pulverizadas hacia la superficie a tratar.

La mezcla del oxígeno con el gas combustible se enciende varias veces por segundo, mediante una chispa eléctrica creando una serie de ondas de detonación controladas, y que aceleran y calientan las partículas del polvo que avanzan con el gas transportador a través de la pistola de detonación.

Durante el movimiento hacia la pieza a aspersir, en un medio de alta temperatura las partículas se encuentran en estado líquido, lo que origina la formación de películas de óxido en su superficie.

Durante el impacto con la superficie del material, las partículas se desparrraman, formando una capa delgada que se adhiere mecánicamente con la superficie. La adhesión se produce mediante unión mecánica con las macro salientes de las superficies del material a aspersir lográndose una alta resistencia de adhesión.

La elevada velocidad de incidencia de las partículas produce una adhesión muy fuerte y de poca porosidad.

Con este procedimiento se alcanzaba temperaturas de más de 3315°C en la cámara, lo que se disminuye con un sistema de refrigeración.

La temperatura del material a aspersarse mantiene relativamente baja, excluyéndose de esta manera deformaciones y pérdidas de propiedades físico-mecánico.

### **Unidad de Aspersión por Detonación Típica**

1. Comportamiento Isonoro
2. Controles automáticos o semiautomáticos
3. Pistola o cañón de aspersión
4. Sistema de Refrigeración
5. Bujía
6. Sistema de Oxígeno
7. Sistema Gas Combustible
8. Sistema de Abastecimiento del Polvo
9. Sistema Gas de Aporte.

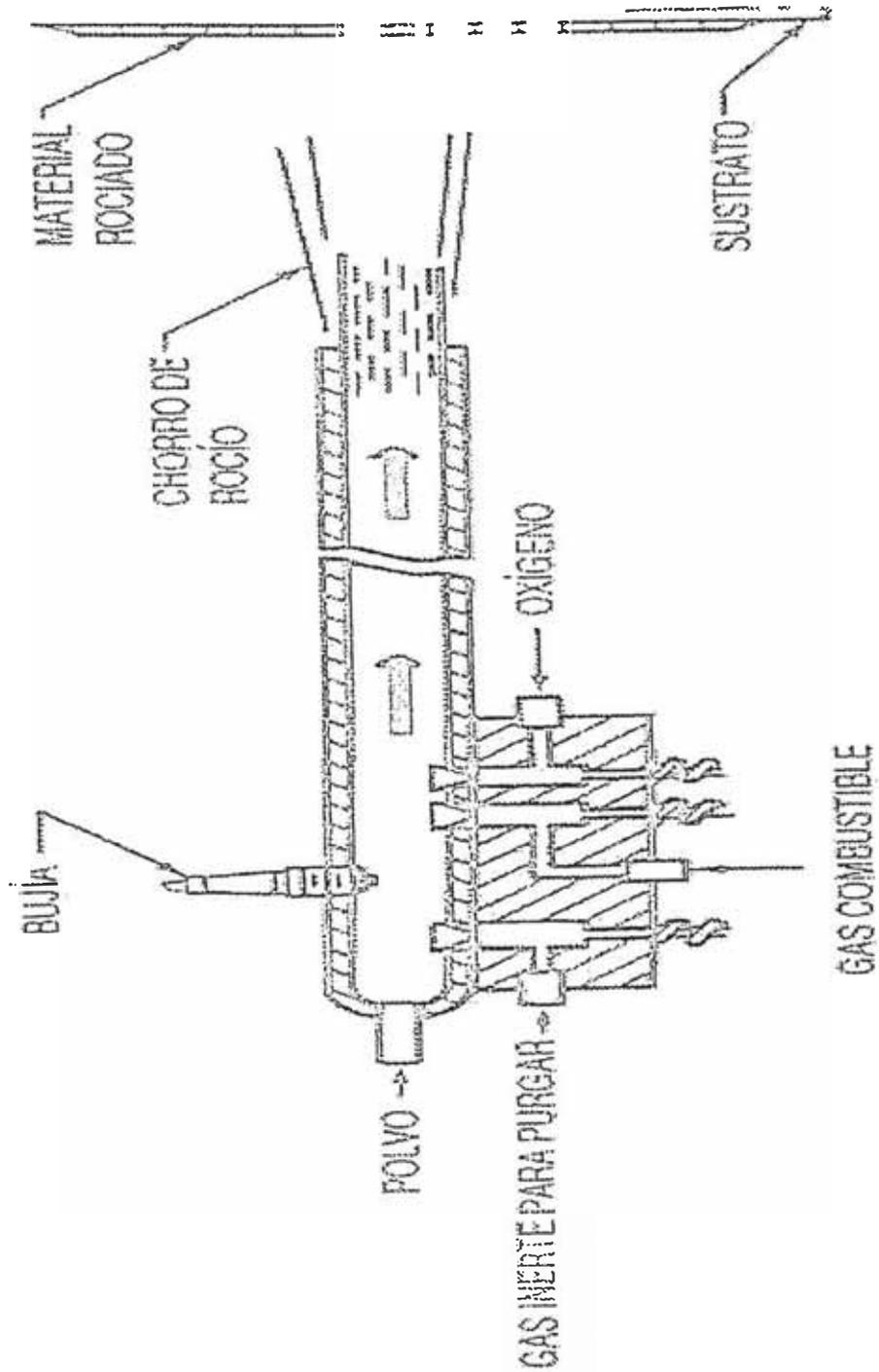


Fig. 2.4  
 Esquema de un Aspersor por Detonación

### 2.1.5 Método de Reparación de Fábrica de los alabes

Si es que en la unión de las plataformas existe un juego mayor de 1.5mm. los alabes deben ser recuperados por fusión.

Los alabes deberán de ser desmontados y llevados a taller. Se efectúa la limpieza química y se somete el alabe a control geométrico dimensional, control por aspectos y a tratamiento heat treat a 583°C a fin de determinar daños superficiales.

Una vez que se ha determinado la magnitud del desgaste, se pule la zona con esmeril neumático o con abrasivo, y de ser necesario se máquina. Posteriormente se desengrasa la zona con acetona, quedando el alabe listo para la recuperación.

El fabricante recomienda en la zona de contacto metálico soldar una lámina de material BRR $\Lambda$ , que se caracteriza por su alta dureza y resistencia a altas temperaturas.

El método de soldadura es el GTAW en impulsos, y protegido en argón.

El flujo de argón deberá ser de 15 Lts/min., el Electrodo de Tugteno Toreado al 2% y el rango de operación de la máquina de 70 a 80 voltios. Se deben programar los micro impulsos de 0.8 sg. a Arco abierto y 0.4 sg. en Inercia.

Luego del proceso de soldado se inicia el rectificado y maquinado, y se culmina con el tratamiento térmico para eliminar tensiones residuales.

## 2.2 Fundamentación para la aplicación del método de Aspersión por Detonación

Todos los procesos de aspersión se utilizan ampliamente tanto en la fabricación como en el mantenimiento,

En la fabricación se aplican en las industrias aeroespacial, marina, minera, automotriz, alimenticia, del petróleo, de energía eléctrica, de procesamiento térmico, de procesamiento químico y electrónico. Su aplicación en todos estos casos permite obtener resultados que ningún material por si solo puede ofrecer.

En mantenimiento, la industria se ahorra cientos de millones de dólares al año por la aplicación de métodos de aspersión en el mantenimiento preventivo y correctivo para estructuras y componentes de equipos y plantas.

La aplicación mundial de la aspersión en recuperación de piezas, en recubrimiento de protección, en acción selladora, en la prevención del desgaste y corrosión ahorra tiempo y aumenta los periodos de vida útil de las piezas.

Este amplio uso de la aspersión a lo largo de los años a estado siendo ejecutado con los métodos de aspersión por llama de gas, arco eléctrico y plasma. Sin embargo las exigencias tecnológicas se incrementan directamente proporcional al aumento de los requerimientos industriales.

Actualmente el nivel existente de la tecnologías de punta no permite que estos procedimientos de aspersión cumplan con satisfacer los requisitos requeridos de recubrimientos. Es necesario aumentar las propiedades

adherencia, resistencia a la corrosión, al desgaste, a la temperatura, y con marcada disminución de la porosidad.

Los métodos de llama de gas, arco eléctrico y plasma, debido a la resistencia relativamente baja de adherencia de sus recubrimientos, tienen un uso limitado en piezas de turbinas que trabajan en condiciones extremas de fatiga. A parte de esto la porosidad de sus recubrimientos que alcanza un 10% no permite que estos puedan operar en medios gaseosos agresivos.

Debido a esto con el desarrollo tecnológico e industrial, el método de aspersion por detonación a alcanzado gran importancia.

Como ventaja de este método tenemos la alta resistencia de adherencia del material aspersido con la superficie a tratar, la alta densidad del recubrimiento y la posibilidad de aplicar cualquier tipo de material sobre la superficie sin variar las propiedades físico – mecánicas de la pieza.

Las altas propiedades de los recubrimientos obtenidos con el método de detonación, permite aumentar bruscamente de 5 a 10 veces el tiempo de vida, la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y erosión, en las piezas y conjuntos de las turbinas y motores de aviación.

Tomando en cuenta todas estas consideraciones, este trabajo de tesis propone utilizar el método de aspersion por detonación para recuperar las superficies desgastadas de las plataformas de punta de los alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC.

## 2.3 Construcción del equipo de Detonación

En las figuras (2.5) y (2.6) se muestra el equipo de aspersión por detonación IDUS –1 con un control electrónico de suma.

La cámara de explosión (4), está hecha en forma tubular cerrada en un extremo final. Esta cámara de explosión esta unida desde el lado del tubo de protección (espiral 5) con el tubo de salida de la cámara mezcladora.

La cámara mezcladora es el componente del equipo en donde se prepara la mezcla explosiva. Esta cámara esta unida con los componentes de la mezcla a través de las válvulas electromagnéticas (16) y (18), y con la fuente de gas natural a través de la válvula electromagnética (15).

Con la finalidad de aumentar la confiabilidad y la secuencia del trabajo del equipo, entre el tubo protector (5) y el tubo de salida (21) de la cámara mezcladora, se ha colocado un dispositivo de obstáculo (6) que sirve para la extinción de la llama para posibles impactos inversos desde la cámara de explosión hacia el tubo protector.

Entre el dispositivo (6) y el tubo de salida de la cámara mezcladora se ubica una conexión en cruz (9), que mediante los tubos (7) y (13) esta unida con la fuente de gas neutral. Las válvulas electromagnéticas (8) y (12) en el proceso de trabajo del equipo, secuencialmente une la conexión en cruz y el tubo protector con la fuente de gas neutral.

Durante esto, a través de la válvula (8) y el tubo (10) este gas se envía bajo una presión suficiente para efectuar la limpieza previa del dispositivo (6) y del tapón. Esto permite conservar el salto de la llama después de la explosión de la mezcla dentro de la cámara de explosión. Al final del ciclo de trabajo del equipo; es decir después de que salga el material del

recubrimiento del equipo de aspersion, a través del tubo lateral (11) de la unión en cruz (9) se envía gas bajo presión suficiente para una completa limpieza por gas del tubo (5) y de la cámara de explosión.

La caída de la presión en las tuberías (7) y (13) se consigue por la fuente autónoma de gas neutral que tiene un dispositivo reductor de gas.

A parte de los órganos actuadores señalados, el equipo tiene un bloque de control electrónico sumador de conteo (22), un generador de impulsos de alta tensión (23) y la bujía de chispa (3), mediante la cual se produce el encendido de la mezcla explosiva. En el equipo en caso de necesidad pueden utilizarse cámaras de explosión reemplazables con diferentes formas de sección transversal, por ejemplo redondas, cuadradas, rectangulares o cualquier otra.

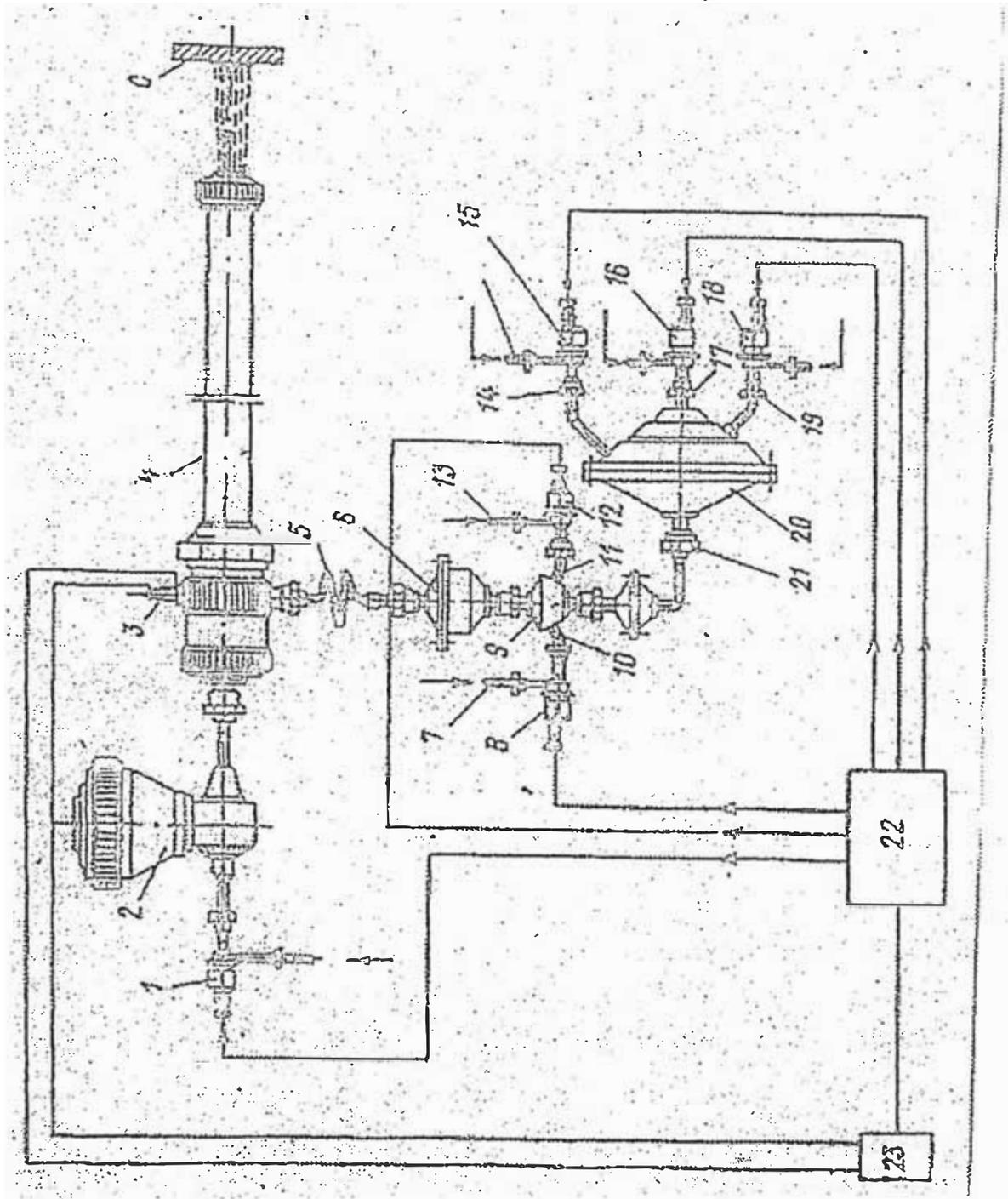


Fig. 2.6  
Diagrama Funcional del Equipo

El uso de escapes giratorios reemplazables, colocados en el final libre de la cámara de aspersión, permite aplicar recubrimientos sobre las superficies internas de las piezas cilíndricas de grandes dimensiones.

El ciclo operativo del equipo para la aplicación por detonación de los recubrimientos incluye las siguientes operaciones.

El bloque control 22 de acuerdo al ciclograma dado de control envía impulsos codificados a las válvulas electromagnéticas (18) y (16) y (15) y (1). El bloque de control envía una señal también al generador de impulsos de alta tensión (23), que envía la señal a la bujía de chispa 3 para el encendido de la mezcla explosiva en la cámara de explosión.

En el momento inicial según el mando del bloque de control 22 se abren las válvulas electromagnéticas 18, 16, 15 y 1, que alimenta el comburente, el oxidante y el gas neutral a las cavidades de sobrepresión de la cámara mezcladora (20). La válvula 15 para el gas neutral puede encontrarse en dos posiciones (abierto o cerrado) en función a que relación se necesita de los componentes de la mezcla explosiva.

Con ayuda de la válvula 15 mediante la adición de diferentes dosis de gas neutral a la mezcla explosiva se puede regular en grandes rangos la temperatura, la presión, la velocidad de la onda detonadora, y por consiguiente los productos de la explosión. De esta manera es posible seleccionar el régimen de funcionamiento necesario del equipo para los diferentes materiales de los recubrimientos.

A través de la válvula 1, unida mediante un tubo con la fuente ingresa el gas transportador (nitrógeno, aire), que sirve para inyectar neumáticamente el polvo aspersivo a la cámara de explosión 4.

La cantidad de polvo aspersidos se determina con el dosificador 2 dándole el gasto del gas transportador a través de la válvula 1.

Después de llenar la cámara (4) con mezcla explosiva y el material de aspersión, las válvulas (18), (16), (15), y (1) se cierran y simultáneamente. La válvula (8) que se abre envía gas neutral a la cruceta (9), y pasa a través del dispositivo 6 llenando el tubo protector (tapón 5). Luego todas las válvulas se cierran y el generador de impulsos de alta tensión (23) envía una señal a la bujía (3), entonces se produce la explosión de la mezcla explosiva en la cámara de explosión.

Los productos de la combustión formados durante la detonación expulsan el polvo del material aspersido a través del extremo abierto de la cámara sobre la pieza recuperada, formando la capa del recubrimiento. Al mismo tiempo entra en funcionamiento la válvula (12), el gas neutral (nitrógeno) a alta presión a través del tubo (11), y la cruceta (9), permitiendo el ingreso al dispositivo (6) luego al tubo protector y a la cámara de explosión. Esto genera la limpieza neumática de todos los productos de la combustión luego el ciclo descrito se repite.

El empleo en los equipos de detonación del dispositivo (6) para la extinción de la llama durante los posibles choques inversos y los dispositivos de limpieza neumática garantiza, un trabajo seguro y confiable de todos los accesorios y de la cámara de explosión. Esto permite tener un trabajo mas exacto y estable.

En adición otra ventaja de los equipos con programa de conteo de suma tiene la bondad de controlar a remoto desde el panel, las variaciones de los regímenes del programa de aplicación de los recubrimientos, que abarcan: aumento o disminución de la dosis de uno de los componentes de la mezcla explosiva, el aumento o la disminución del tiempo de limpiado neumático, el inicio y el final del ciclo de aplicación, la variación del tiempo de retardo de encendido de la mezcla, el aumento y la disminución de la velocidad de disparo.

La versatilidad del equipo, la alta confiabilidad, la seguridad en el trabajo y el control relativamente simple durante la variación de los regímenes del trabajo con los diferentes materiales, hacen de él un equipo moderno pero a su vez práctico en su operación.

#### **2.4 Trabajo de la cámara de combustión**

Uno de los elementos principales y más importantes de los equipos de detonación es la cámara de explosión, en la cual se efectúa el mezclado de los componentes de la combustión con el polvo del material a aspersar. En esta cámara se desarrolla el proceso de detonación, y se forma un flujo de alta velocidad de los productos de la explosión con las partículas suspendidas del material aspersado.

En la construcción de cada cámara de explosión se debe tener cañones reemplazables de diferentes longitud y sección interna, que permitan regular tanto la potencia de detonación como disminuir la parte de predetonación.

En la variante mas simple (ver Fig. 2.7) la cámara de explosión (cañón) es un tubo largo con orificios para introducir los gases, el polvo y el dispositivo de la bujía. Cuando trabaja el régimen automático se debe considerar obligatoriamente un enfriamiento doble del cañón.

De acuerdo al método de inyección del material aspersido al cañón, las cámaras de aspersion se dividen en: Cámaras con alimentación axial (central) y radial (transversal).

De acuerdo a la alimentación de la mezcla explosiva de combustión se divide en: cámaras de mezclado directo y previo.

De acuerdo al método de iniciación de la mezcla se dividen en Cámaras con encendido directo y precombustión.

Tanto durante la alimentación axial (central) como la radial (transversal), el flujo de doble fase, compuesto de la mezcla explosiva y de las partículas de polvo del material a aspersir, puede formarse gracias a la inyección (succión) del polvo de la mezcla explosiva. En este caso la mezcla explosiva como regla general es un gas activo que garantiza un campo homogéneo de velocidades de flujo en el cañón de la cámara.

La construcción de la cámara de explosión con un mezclado de inyección y un encendido de precombustión se muestra en la Fig. (2.7) La cámara de explosión (8) tiene un cañón (7) en forma de un tubo, cerrado por un lado. El cañón esta encerrado en una envuelta para el enfriamiento por agua (9).

Para la alimentación o retorno del agua sirven los tubos (17) y (12). A través del niple (1) a la cámara de explosión ingresa el polvo del material a aspersir y a través del niple (15) la mezcla explosiva. Entre el niple y el

cañón se ha colocado la cavidad de la cámara de precombustión anular que lo envuelve (16), y se comunica con la cavidad de sobrepresión (4) mediante los orificios hechos en sus paredes.

Al final del niple se ha colocado una tobera de chorro desmontable para el acceso libre a los orificios, con la finalidad de facilitar su inspección y realizar los trabajos de mantenimiento. La tobera se fija con tornillos al extremo de la cámara de explosión (8).

La hermeticidad de la unión se garantiza con la empaquetadura (2), ubicado en la ranura anular de la cámara.

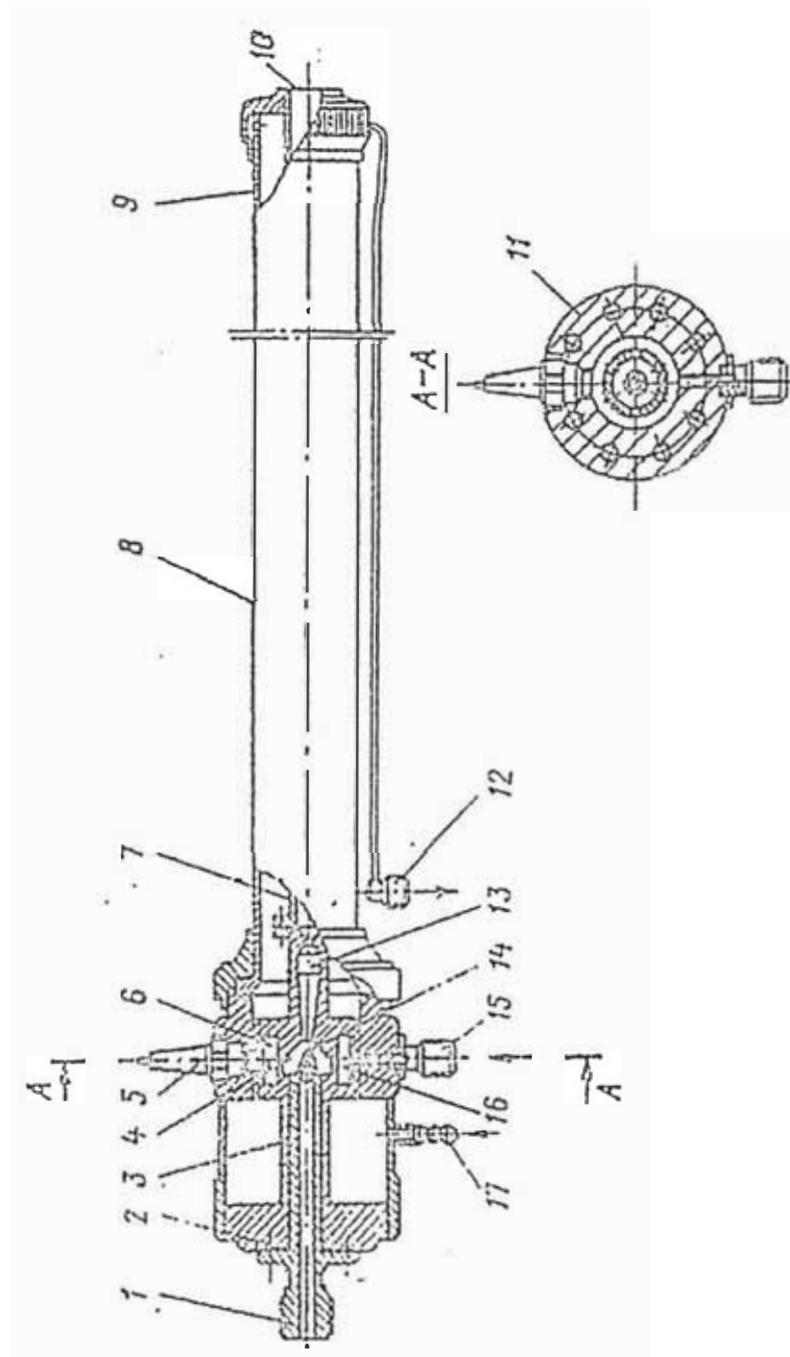


Fig. 2.7  
 Construcción de la Cámara de Explosión

La tobera de chorro se ha colocado axialmente en el extremo de la cámara de explosión, y la sección de salida (14) de esta tobera esta ubicada delante de los orificios con respecto al final abierto (10) de la cámara. Como resultado de esta solución en el proceso de descarga de la mezcla explosiva desde los orificios, a un rango de presión de 0.07-0.14 MN/m<sup>2</sup>, se produce la succión del polvo del material del recubrimiento desde la tobera, y su mezclado posterior en la cavidad (13).

Los orificios de la cámara de explosión están ubicados uniformemente en el perímetro de su sección transversal, mientras que los ejes de estos orificios están inclinados respecto al eje de la cámara, en sentido contrario al final abierto de la cámara.

La bujía de encendido (5) se ha colocado en la pared externa (11) de la cámara de pre combustión, y en el intermedio de los orificios en las paredes de la cámara de explosión.

El dispositivo de inyección o la cavidad de precombustión son los conjuntos más importantes. De ellos en gran medida dependen tanto la formación de la mezcla como la formación de la onda de detonación estacionaria, y por consiguiente el flujo de doble fase homogénea de alta velocidad de las partículas del material del recubrimiento. Como se sabe la onda de detonación formada en el proceso de explosión de la mezcla es heterogénea según su composición, compuesta de la zona de combustión, de la zona de acción de la onda de choque y de la zona de ondas inversas (de detonación).

Durante esto las ondas de detonación se propagan en dirección contraria al flujo principal de los gases. Es necesario tomar en cuenta el hecho que después de la explosión de la mezcla en la cámara aparece una depresión, gracias a la cual se produce la succión parcial del polvo hacia el final cerrado de la cámara de combustión.

Estos fenómenos son consecuencias de los procesos físicos durante la detonación y no son eliminables.

Las ondas de detonación y la depresión natural, posibilitan la penetración al final cerrado de la cámara de explosión de las partículas del polvo aspersado, que al ingresar al espacio entre electrodos de la bujía de encendido, provocan que se malogre antes de tiempo. Esto produce un trabajo inestable en todo el complejo, y empeora la calidad de los recubrimientos obtenidos.

La colocación de la cámara de precombustión confiable, protege el espacio entre los electrodos de la bujía de encendido de la posible caída del material del recubrimiento. Al mismo tiempo se crea las condiciones óptimas para la formación de la onda de detonación mediante el encendido previo.

## **2.5 Selección de los Materiales de Aspersión de polvo.**

Los materiales en polvo se utilizan durante la aspersión por plasma aspersión de llama de gas, y aspersión por detonación. Los materiales en polvo son más rentables económicamente, y en la actualidad en la industria existen una diversidad de ellos aplicables a estos procedimientos.

La forma, la composición granulométrica, la facilidad de ser aplicados de los materiales en polvo, ejercen influencia sobre los parámetros tecnológicos del proceso de aspersión y sobre las propiedades de los recubrimientos obtenidos. La medida de las partículas del polvo se debe elegir en función a las características de la fuente de energía calorífica y de las propiedades termo físicas del material aspersado. (temperatura de fusión, calor específico, densidad y otros parámetros).

El empleo del polvo finamente dispersado generalmente facilita el aumento de la densidad del recubrimiento aspersado. La desventaja de este recubrimiento se debe a que en él se encuentra una gran cantidad de óxidos formados como resultados del recalentamiento de las partículas durante el movimiento en un flujo de gas de alta temperatura.

Durante la aspersión del polvo compuesto de una mezcla de partícula de diferentes tamaños, la homogeneidad del recubrimiento se malogra debido a la gran diferencia entre las partículas grandes y pequeñas respecto al grado de fundición y a la velocidad de su movimiento en el chorro aspersado.

En los cuadros siguientes mostraremos ejemplos de algunos metales y aleaciones, que se utilizan para la aspersión por detonación y sus diversas aplicaciones, propiedades y características.

**Tabla 2.2**  
**Materiales para Recubrimiento por Aspersión**

MATERIALES	COMPOSICION QUÍMICA, PORCENTAJE
METALES	Al, Cr, Ni, Mo, Pb
ALEACIONES	Ni Al (95.5 y 80.20), Pb Sn (92.8) CoMoCr (52.28.17), NiCrAl(76.18.6), CuNiIn (58.36.5) CoCrAlY (63.2313.1), CoCrNiW (57.25.17.8), CoMcNiSi (44.28.20.8) NiCrAlY (63.23.13.1), AgCdSnCu (45.20.18.17) CoCrWNIv (46.28.20.5.1), NiCrSiBFe (80.11.3.2.4)
BORUROS	TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub>
CARBUROS	TiC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , NbC, TaC , WC Wc – TiC (70 – 30 y 50 –50)
ALEACIONES DURAS	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - NiCr (75 – 20.5), WC – Co (88 – 12)
OXIDOS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (98 – 2 ), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - MgO (70 – 30), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub> (97 – 3.87 – 13 y 60 – 40 ), Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub> (50 – 50 ), ZrO <sub>2</sub> - MgO (97 – 3,80 – 20 ), ZrO <sub>2</sub> - SiO <sub>2</sub> (65 – 35), ZrO <sub>2</sub> - CdO (95 – 5,92 – 8,90 – 10 y 70 – 30), ZrO <sub>2</sub> - Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (de 99 – 1 a 80 – 20 )
MATERIALES NO METALICOS SUPERFICIALES	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NiAl (66 – 24.6), Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NiAl (84 – 14.1) CoCrTaAlYC - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (45.25.17.1.2 – 10), CoCrWNIvC – Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (41.28.19.5.1.3 – 3)
OTROS	AlSi – polietero (52.7 – 40), Ni – grafito (85 – 15 y 75 – 25 ), NiCrFeAl – BN (63.14.8.3 – 6)

Tabla 2.3

Propiedades Funcionales de los Recubrimientos por Aspersión

PROPIEDADES FUNCIONALES DE LOS RECUBRIMIENTOS POR ASPERSION

Recubrimiento	Resistencia a la corrosión	Resistencia a la oxidación	Resistencia al desgaste		Propiedades antifriccionales	Adhesión	Influencia sobre la resistencia de la base	Dureza HV	Temperatura Máxima de funcionamiento °C
			Abrasivo	Adhesivo					
Aluminio	++ (3)					+	-		
Zinc	++ (3)					+	-		
Molideno	+	+	++	++	++	+	↕	1000	350
Acero	+					+	↕	250-500	(6)
McrAlY	+++	+++				+	-		1000
Aleaciones duras	+		++			+	↕	600	900
Triballoy (CoMoSi)			++		++	+	-	600	1000
WC + Co			++	+++	++	+	↕	1000	540
Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub> + NiCr			+++	+++	++	+	↕	800	1000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		+++	++	+++	+	+	-	2000	(6)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		+++	++	+++	++	+	↕	2300	(6)
ZnO <sub>3</sub>		+++	++	+++		+	-	1500	
Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub> + aleación de Co		+++	+++	+++		+	-	600	1000
Niquel + grafito			+++	+++	(9)	+	-	(8)	500

Notas:

- + Bajos valores
- ++ Valores medianos
- +++ Valores altos
- ++++ Valores superaltos
- No hay influencia

- (3) Protección Catódica
- (6) Depende del material de la base
- (8) Depende de la porosidad del recubrimiento
- (9) Pasando el periodo de ajuste

Tabla 2.4

Influencia del Recubrimiento sobre la Resistencia a la Fatiga

Tabla 5  
INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO SOBRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA

Material del Recubrimiento	Sensibilidad a las grietas		Tendencia a la Formación de Fisuras		Resistencia a la Fatiga
	Dureza	Fragilidad	Porosidad	Adhesión	
	Recubrimiento por Pulverización				
Aluminio	+	++	+	+	-
Zinc	+	++	+	+	-
Moibdeno	+++	+++	+	+	-
Acero	++	++	+	+	↓
McrAlY	+	++*2	++*3	+++*3	-
Aleaciones duras en base Metálica	+++	++	+	+	↓
Triballoy	+++	+	+	+	↓
Carburo de Tungsteno/cobalto	+++	++	+	+	↓
Carburo de Cromo/Niquel - Cromo	+++	++	+	+	-
Oxido de Aluminio	+++	+++	+	+	↓
Oxido de Cromo	+++	+++	+	+	↓
Oxido de Circonio	+++	+++	+	+	↓
Aleación de Cobalto + Oxido de Cromo	+++	+	+	+	-
Niquel+grafito	+	+	+	+	-

Notas:

- +
  - ++
  - +++
  - ++++
  - \*2
  - \*3
- Bajos valores  
Valores medianos  
Valores altos  
Valores superaltos  
No hay influencia  
Depende de la temperatura y el contenido de Al  
Luego de revenido de difusión

Como observaciones adicionales debemos considerar :

- (1) El aluminio se utiliza para proteger los metales ferrosos de la corrosión, durante el calentamiento debido a la difusión del aluminio en el metal base se forma una capa endurecida y resistente a la oxidación a alta temperatura.
- (2) El molibdeno se utiliza en calidad de sub capa antes de la aplicación posterior sobre ella del material deseado. Aparte de esto el molibdeno es útil para aumentar la resistencia al desgaste y a la corrosión.
- (3) El wolframio es el material más refractario. El recubrimiento de wolframio tiene buena adherencia con la superficie cerámica.
- (4) El recubrimiento de acero resistente a la corrosión, posee una alta resistencia al desgaste y buenas propiedades anticorrosivas.
- (5) La aleación de níquel con cromo (nicrom) en el recubrimiento, es resistente al desgaste, a la corrosión y a las altas temperaturas cuando se añaden elementos aleatorios.

Partiendo de toda la información anteriormente expuesta, para la recuperación de la plataforma de punta del alabe de la II etapa de la turbina del motor 55BC seleccionamos el polvo NHL con una composición granulométrica de 20 a 40.

El polvo NHL contiene :

- Ni - 80% de níquel
- Cr - 20% de cromo

Así mismo el polvo NHL tiene como elementos aleatorios al boro y al aluminio hasta en un 6 %.

La temperatura de fusión del NHL es 1500 °C.

Es resistente al desgaste hasta una  $T=1100$  a  $1200$  °C.

## **2.6 Aspersión**

El proceso de aspersión se debe realizar en los regímenes óptimos para el método seleccionado y para el tipo de equipo. En la práctica de la aspersión debemos guiarnos por las siguientes recomendaciones

### **1. El estado de la superficie del metal de la unidad (pieza).**

Deberá ser desengrasado y limpiado. Esta limpieza se efectúa con un equipo arenador. La aspersión sobre la superficie limpia debe realizarse en un tiempo no mayor a las 4 horas.

### **2. Distancia de la aspersión.**

La distancia óptima desde la salida de la tobera de la boquilla hasta la superficie de la aspersión generalmente se encuentra en el intervalo de 75 a 250mm.

A una pequeña distancia de aspersión, se crea el peligro de deformación del metal principal por influencia de las tensiones térmicas.

Cuando la distancia es muy grande, la temperatura y la velocidad de las partículas aspersadas se reducen. Esto provoca la formación de un recubrimiento frágil y disminuye la resistencia de adhesión con la base.

### **3. Angulo de aspersión.**

La mayor deformación de las partículas aspersadas cuando hace impacto con la superficie de la base se produce si es que el aplicador esta colocado perpendicularmente a su superficie, es decir el ángulo debe ser de 90°. Se permite variar el ángulo del chorro esparcido en no más de 45°.

### **4. La temperatura de la superficie del material base en el proceso de aspersión.**

El recalentamiento de la superficie del metal base en el proceso de aspersión, provoca la reducción de la resistencia de adherencia del recubrimiento. La temperatura no deberá superar los 260°C. Se recomienda calentar previamente la superficie aspersada hasta una temperatura de 120 a 150 °C.

### **5. Uniformidad del espesor del recubrimiento.**

Para obtener un recubrimiento de espesor uniforme, es necesario que el espesor de la capa aspersada del recubrimiento en una pasada no supere 0.25 mm. El recubrimiento del espesor requerido se debe aspersir en varias pasadas.

### **6. Espesor del recubrimiento aspersado.**

Cuando el espesor del recubrimiento es grande, la acción de las tensiones residuales que aparecen como resultado del asentamiento del material aspersado, produce la destrucción de la zona de contacto. Esto origina la separación del recubrimiento de la base.

El mínimo espesor del recubrimiento deberá incluir la tolerancia al mecanizado para la obtención de la medida dada.

## **7. Velocidad de alimentación del material aspersido.**

Se requiere seleccionar una velocidad optima y constante de alimentación del material aspersido. Para la velocidad óptima, el cono del material aspersido deberá tener la forma correcta.

## **2.7 Proceso Tecnológico de Restablecimiento del Bandaje de los Alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC.**

### **2.7.1 La recepción y detección de fallas de los alabes.**

- Tomar la medida de los alabes (88 piezas ) de las turbinas del motor 55BC de acuerdo a la documentación interna del taller.
- Realizar la detección de fallas de los anillos sujetadores de las puntas de alabes (diseño)

La dimensión L1 - desde el lado extradós (dorso)

La dimensión L2 - desde el lado intrádos

(Ver Fig. 1.4)

- Realizar las mediciones L1 y L2 con el dispositivo No. E6007-3785
  
- Colocar en el dispositivo ETALON (patrón), los alabes y sacar las lecturas de los indicadores desde los lados extrádos e intrádos en la posición cero.
  
- Retirar el patrón desde el dispositivo y realizar las mediciones L1 y L2 de los anillos sujetadores de las puntas de alabes.  
Anotar los resultados de las mediciones en la tabla.

NOTA : Después de cada veinte mediciones, verificar la posición cero de las agujas de los indicadores según el patrón.

Los alabes defectuosos según las dimensiones L1 y L2 separados colocando como observación la detección de fallas.

Escoger entre todos los alabes de la turbina la dotación de alabes a tratar.

NOTA : Los alabes defectuosos deberán ser completados con los de repuesto.

### **2.7.2 La Preparación de la Superficie**

La preparación de la superficie de los anillos sujetadores frente a la aspersion, considera la limpieza de las suciedades, óxidos y crea la rugosidad que asegure además la fuerza de cohesión del recubrimiento con la base.

- Limpiar la superficie de los anillos sujetadores de las diferentes suciedades secar y sacar la grasa con escobilla de cerda, gasolina, acetona o aire comprimido seco.
- Colocar la primera dotación de los alabes en el dispositivo para el tratamiento abrasivo y colocarlos en el compartimiento del equipo de chorro de perdigón.
- Rociar los anillos sujetadores de los alabes con el equipo de chorro por perdigón en el siguiente régimen

P = 4 a 5 atm (0.4 - 05 MPA) la presión del aire comprimido :  
A = 90 el ángulo de ataque de los chorros del aire comprimido para las superficies de tratamiento.  
H = 120 a 20mm (la distancia desde el corte de la tobera del aplicador hasta la superficie de tratamiento).  
T = 3 a 5 (el tiempo de tratamiento de una posición).

#### NOTAS :

Como material abrasivo se recomienda emplear el electroconindon de granulación de 50 a 120.

Antes del tratamiento, este material abrasivo deberá cernirse y secarse.

Se permite la utilización varias veces de los abrasivos, si es que garantizan la eliminación de las fracciones pequeñas.

Después del tratamiento de chorro por perdigón con abrasivo, las superficies de tratamiento de los anillos deberán pulverizarse con aire seco comprimido para eliminar los residuos de abrasivo polvos.

Inspeccionar la superficie que deberá presentar una rugosidad uniforme y de una coloración gris.

Entregar la pieza para iniciar el proceso de aspersión.

### **2.7.3 La preparación del material de polvo**

Con la finalidad de aumentar la calidad del recubrimiento de aspersión, es necesario secar el material de polvo a aspersir.

- Se utiliza el polvo de NHL (80% de Ni ; y 20%de Cr).
- Colocar 200 gramos del polvo por el cernidor al plato de acero inoxidable y colocarlo en el armario secador.
- La capa del polvo en el plato no deberá ser mayor 10 mm
- Secar el polvo a 80 °C durante 1.5 a 2 horas.
- Enfriar el polvo secado hasta la temperatura del aire de ambiente estando cerrado el armario secador.
- Llenar el polvo secado y enfriado a la tolva del cañon de polvo, para esto se debe secar la tapa superior y colocar el tapón inferior del dosificador.

## NOTAS:

Realizar el llenado de polvo secado y enfriado inmediatamente antes del proceso de aspersión por detonación.

Se permite el almacenamiento del polvo en el equipo por un periodo no mayor a un día.

A la extensión o ampliación del tiempo de almacenamiento, repetir el secado.

### 2.7.4 La aspersión de recubrimientos

- Después del tratamiento de chorro por perdigón realizar la medición de la dimensión L1 de los anillos sujetadores de la punta de alabes de la primera dotación.
- Anotar los resultados de las mediciones L1 en la tabla
- Agrupar los alabes con las dimensiones iguales L1 en forma de sucesión y anotar esta sucesión de los números de los alabes en el lado inverso de la tabla
- Colocar la primera dotación de los alabes en el dispositivo especial, previamente colocando la esquina de protección para el paso radial del anillo sujetador (desde el lado de intrádos).
- Asegurar con el destornillador los alabes de la turbina en el dispositivo especial con la tapa.

- Colocar la placa de control en el manipulador 25x150 x 2mm de acero al cromo níquel modificado en el equipo de chorro por perdigón junto con la dotación desde el lado "intrados".

## 2.8 Realizar la preparación del equipo de detonación para el trabajo :

Abrir la llave del reductor de oxígeno y verificar la presencia y la presión de oxígeno en el balón.

Abrir la llave del reductor de acetileno y verificar la presión de acetileno en el balón.

Abrir la llave del reductor de argón y verificar la presión de argón en el balón.

Conectar el interruptor basculante de calentamiento de agua en el depósito térmico, previamente colocando el regulador del sensor de temperatura en 70 a 80°C, conectando el sistema para la red eléctrica de 220v.

**NOTA :** Comenzar el control del funcionamiento del sistema de enfriamiento del equipo de detonación durante el calentamiento del agua en el tanque térmico.

Conectar el interruptor basculante de la bomba eléctrica y cerciorarse en el buen estado de funcionamiento del sistema de enfriamiento.

Desconectar el interruptor basculante.

Conectar el panel de mando para la red eléctrica de 220v en el panel de mando :

- a) Conectar el interruptor basculante "KED", deberá encenderse la lámpara verde y centellear el diodo luminoso.
- b) Conectar el interruptor basculante acetileno y por el rotámetro verificar la conexión de la válvula electromagnética.  
Desconectar el interruptor basculante.
- c) Conectar el interruptor basculante "oxígeno" y por el rotámetro verificar la conexión de la válvula electromagnética.  
Desconectar el interruptor basculante.
- d) Conectar el interruptor basculante "polvo" y por el rotámetro verificar la conexión de la válvula electromagnética de suministro de argón para la tolva de dosificador de polvo. Soplar el canal del tubo de cañón con argón desde los gases de acetileno y oxígeno. Desconectar el interruptor basculante :

#### NOTAS :

Realizar el soplado estando la tapa cerrado del dosificador de polvo.

Realizar el control de los sistemas de alimentación de gas estando conectado la ventilación equilibrada del comportamiento

- e) Conectar el interruptor basculante encendido y según el sonido cerciorarse en el funcionamiento normal de las bujías de encendido. Desconectar el interruptor basculante.
- f) Conectar el interruptor basculante vibrador y cerciorarse en el funcionamiento del vibrador. Desconectar el interruptor basculante.

g) El conmutador de frecuencia de los disparos colocar en "4".

## 2.9 Realizar la aspersión para la muestra de referencia.

Medir la muestra de referencia, preparada para la aspersión valiéndose del micrómetro para determinar el espesor. Anotar los resultados.

Colocar la muestra de referencia en el manipulador.

Colocar la muestra de referencia a una distancia de 100mm a 200mm desde el corte del cañón del equipo de detonación

Conectar el sistema de refrigeración de agua para la red eléctrica de 220v.

Conectar el panel electrónico de mando para la red de 220 v

Abrir la tapa de tolva de dosificador de polvo (de alimentación) y llenar 200 gramos del polvo secado, cerrar la tapa.

Conectar la bomba eléctrica de agua y cerciorarse en la presencia de la presión de agua en el sistema de enfriamiento.

Conectar el ventilador de enfriamiento del radiador.

Conectar el sistema de ventilación equilibrada.

Conectar en el panel de mando el interruptor basculante RED, deberá centellear el diodo luminoso.

Conectar el interruptor basculante "oxígeno" y por el rotámetro colocar el consumo de 50 a 70 unidades. Desconectar el interruptor basculante.

Conectar el interruptor basculante acetileno y por el rotámetro colocar el consumo de 20 a 40 unidades. Desconectar el interruptor basculante.

Conectar temporalmente los interruptores basculantes. "Acetileno", "oxígeno" en posición de encendido.

#### NOTAS :

- a) Según el sonido de los disparos, regular el cambio en consumo de acetileno bajo el consumo continuo del oxígeno.
- b) El color de llama pajiza corresponde a la llama restablecida.

Conectar el interruptor basculante "polvo" y colocar la presión del gas transportador " Argón" de  $0,2 \text{ kgf/cm}^2$ ; lográndose para esto el haz uniforme de pulverización del polvo derretido arrojable.

Conectar el interruptor basculante vibrador.

Realizar la aspersion para la muestra de diferencia durante 30 segundos.

Desconectar el interruptor basculante "Polvo".

Desconectar el interruptor basculante vibrador.

Desconectar temporalmente los interruptores basculantes "Acetileno" y "Oxigeno".

Desconectar el interruptor basculante "Encendido".

Sacar la muestra :

- a) Realizar la inspección exterior de recubrimiento, deberá estar uniforme por todo el punto y de color gris claro.
- b) Realizar la medición con micrómetro para determinar el espesor de la capa aspersada por 30 segundos.
- c) Encorvar el modelo en el lugar de la capa de aspersion para L60 (recubierto por exterior). Por eso el recubrimiento deberá sostenerse con la base. No debe tener grietas.

## **2.10 Realizar la aspersion para los anillos sujetadores de las puntas de alabes de las turbinas.**

Poner el dispositivo con los alabes asegurados de la primera detonación en el manipulador

Colocar la distancia adecuada entre la superficie de los anillos sujetadores y el corte del cañón del equipo de detonación

Poner contra el cañón el agujero del dispositivo con los alabes que tienen a dimensión máxima para la aspersion.

Determinar el tiempo de aspersion para cada par de alabes y anotar.

Realizar el proceso de aspersión según la tecnología de aspersión para el par de alabes .

Desconectar el equipo de detonación y colocar contra el corte de la tobera del cañón los siguientes alabes asegurados en el dispositivo.

Conectar al equipo de detonación y realizar la aspersión con el proceso prolongado (desde el momento de conexión del interruptor basculante “Polvo”) señalado en la carta.

Desconectar al equipo. Repetir las operaciones para las siguientes fases de los alabes.

Después del termino de aspersión :

- a) Desconectar al equipo
- b) Desconectar la ventilación equilibrada
- c) Sacar el dispositivo desde el manipuleo
- d) Desunir la fijación de los alabes
- e) Sacar la primera dotación de los alabes restablecidos desde el lado “Intrádos” y ponerlos en el seleccionador.

Colocar la dotación consiguiente de los alabes de las turbinas en el dispositivo luego del tratamiento de chorro por perdigón desde el lado “Intrádos”.

Asegurar el dispositivo en el manipulador y repetir el proceso de aspersión con la tecnología descrita anteriormente.

Repetir el proceso tecnológico de aspersión para los anillos sujetadores de las dotaciones principales desde el lado “Intrádos”

Repetir el proceso tecnológico de aspersión para los anillos sujetadores para las puntas de alabes de las turbinas desde el lado dorsal (extrádos) para toda la dotación.

### **2.11 El control de la calidad de recubrimiento por aspersión**

Los alabes de las turbinas recubiertas por aspersión, son sometidas al control visual con la ayuda de lupa de 4X a 10X.

El recubrimiento deberá ser de coloración gris sin las conexiones profundas visibles y uniforme por el área del anillo sujetador.

No son permitidos en el recubrimientos de aspersión, las grietas, rasguños, rupturas, abolladuras. De presentarse no deberán sobrepasar a las normas, establecidas para los alabes de las turbinas.

Se realiza el control de espesor de la capa de aspersión (teniendo en cuenta el tratamiento mecánico en el dispositivo especial).

Los alabes con los recubrimientos que tienen defectos no permisibles, serán separadas para una aspersión posterior.

### **2.12 El Tratamiento Mecánico**

Entregar la dotación de los alabes de las turbinas con la aspersión de los anillos sujetadores y la carta de mecanismos para su tratamiento mecánico según las reglas existentes.

Realizar el tratamiento mecánico de rectificado según la tecnología perfeccionada.

Realizar el restablecimiento repetido de la capa de aspersion de los anillos sujetadores durante el proceso de rectificado.

Realizar nuevamente el rectificado de la capa de aspersion para los anillos sujetadores segun la tecnologia.

Completar la dotacion de los alabes ( en el caso de presencia de defectuosos) desde otra dotacion (repuesto) y realizar la anotacion respectivo en la carta.

Entregar la dotacion restablecido de los alabes de turbinas a la seccion de armado segun las normas existentes.

### CAPITULO III. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS ASPERSIDOS SOBRE LAS PLATAFORMAS DE PUNTA DE LOS ALABES DE LA II ETAPA DE LA TURBINA DEL MOTOR 55BC.

#### 3.1 Formación de los recubrimientos

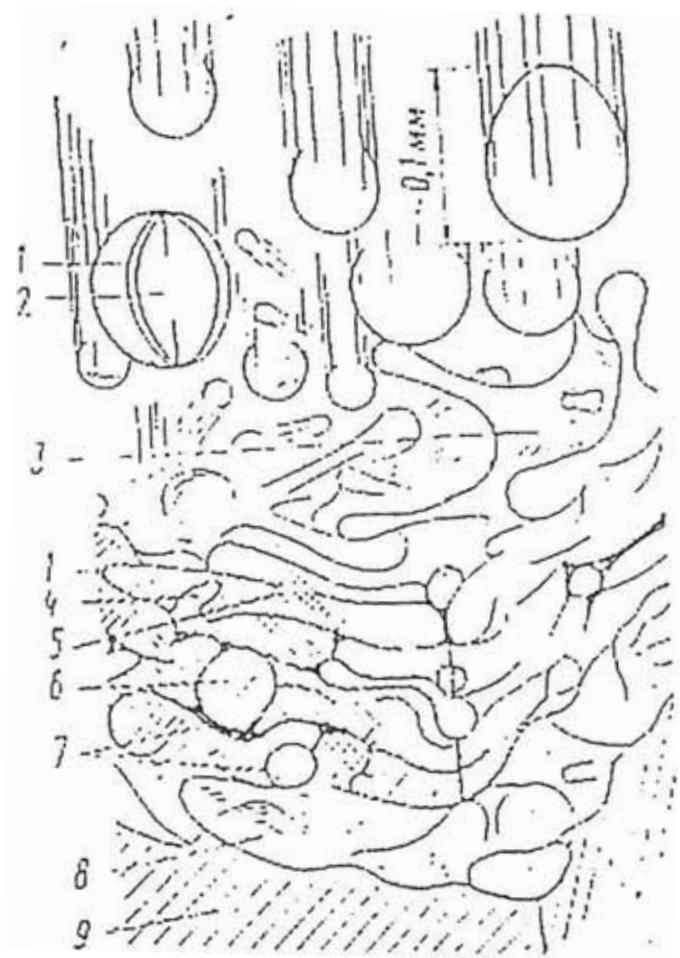
El recubrimiento se forma de partículas individuales fundidas o próximas a este estado, que con una alta velocidad hacen impacto y forma capas en la superficie del metal base.

En la fig. (3.1) se muestra el esquema de formación del recubrimiento durante la aspersion.

Durante el movimiento al material base, el vehículo es un medio gaseoso de alta temperatura, en donde las partículas se encuentran en un estado de fundición y sus superficies se cubren con una película de oxido.

Durante el impacto con la superficie del material base o con la superficie del recubrimiento anteriormente formada, las partículas se aplastan, formando una capa delgada y mecánicamente unida con la superficie del material base o del recubrimiento.

El pegamento de las partículas se efectúa mediante su adherencia mecánica con las macro salientes de la superficie de la base y a través de los sitios de rotura del oxido de la base.



**Fig. 3.1**  
**Esquema de la Formación del Revestimiento durante la Aspersión**

1. Película oxidante
2. Partícula del material de pulverización de aspersión
3. Partícula para el contacto con la superficie
4. Sector de engranaje mecánico
5. Sector de aleación local
6. Pulverización incompleto de la partícula de aleación
7. Poros
8. Superficie del material base
9. Material base

En los sitios de rotura de las películas de óxido se produce la fundición (soldadura) de las partículas metálicas con la base asegurando una alta resistencia de unión del recubrimiento con la base.

En el proceso de unión al pegarse una partícula con la otra, partículas fundidas llegan a encontrarse con partículas no fundidas completamente. A partir de esto, dentro del recubrimiento aparecen piezas y vacíos llenos de gases, cuya cantidad determina la porosidad del recubrimiento.

En todo método de aspersión, se presenta el movimiento de partículas calentadas hasta un estado líquido en un chorro gaseoso, desde la salida de la tobera de la boquilla hasta la superficie del material base.

### **3.2 Resistencia de adherencia del recubrimiento con el material base.**

La unión del recubrimiento aspersado con la base se efectúa principalmente gracias a la adherencia mecánica de las partículas aspersadas con las salientes y hendiduras en la superficie de la base, que se obtiene cuando se prepara la superficie en el equipo arenador. Este mecanismo de adherencia se denomina efecto de anclaje.

A parte de la adherencia mecánica, la resistencia de adhesión se consigue gracias a otros mecanismos, incluyendo la difusión de los componentes del recubrimiento en el material base, la fundición (soldadura) y la interacción química.

El aumento de la resistencia de adherencia del recubrimiento se consigue también, gracias a las uniones físicas por acción de las fuerzas de Van der Waals. Estas fuerzas como fuerzas de atracción interatómica aparecen durante el acercamiento de las partículas del recubrimiento con la

superficie del metal a una distancia próxima al parámetro de la red cristalina.

En la Fig. (3.2) se muestra la micro estructura de la zona de transición entre el material de la plataforma de punta del alabe de la II etapa de la turbina del motor 55BC y el recubrimiento del material NHL. En la micro estructura se ven zonas de soldadura local del recubrimiento con el material base.

Durante la adhesión de las partículas entre si dentro del recubrimiento actúan los mismos mecanismos que durante la interacción del recubrimiento con la superficie del material base. Sin embargo gracias a la fundición y fusión de las partículas aspersadas, en el recubrimiento predomina la unión metalúrgica entre las partículas (es decir la soldadura).

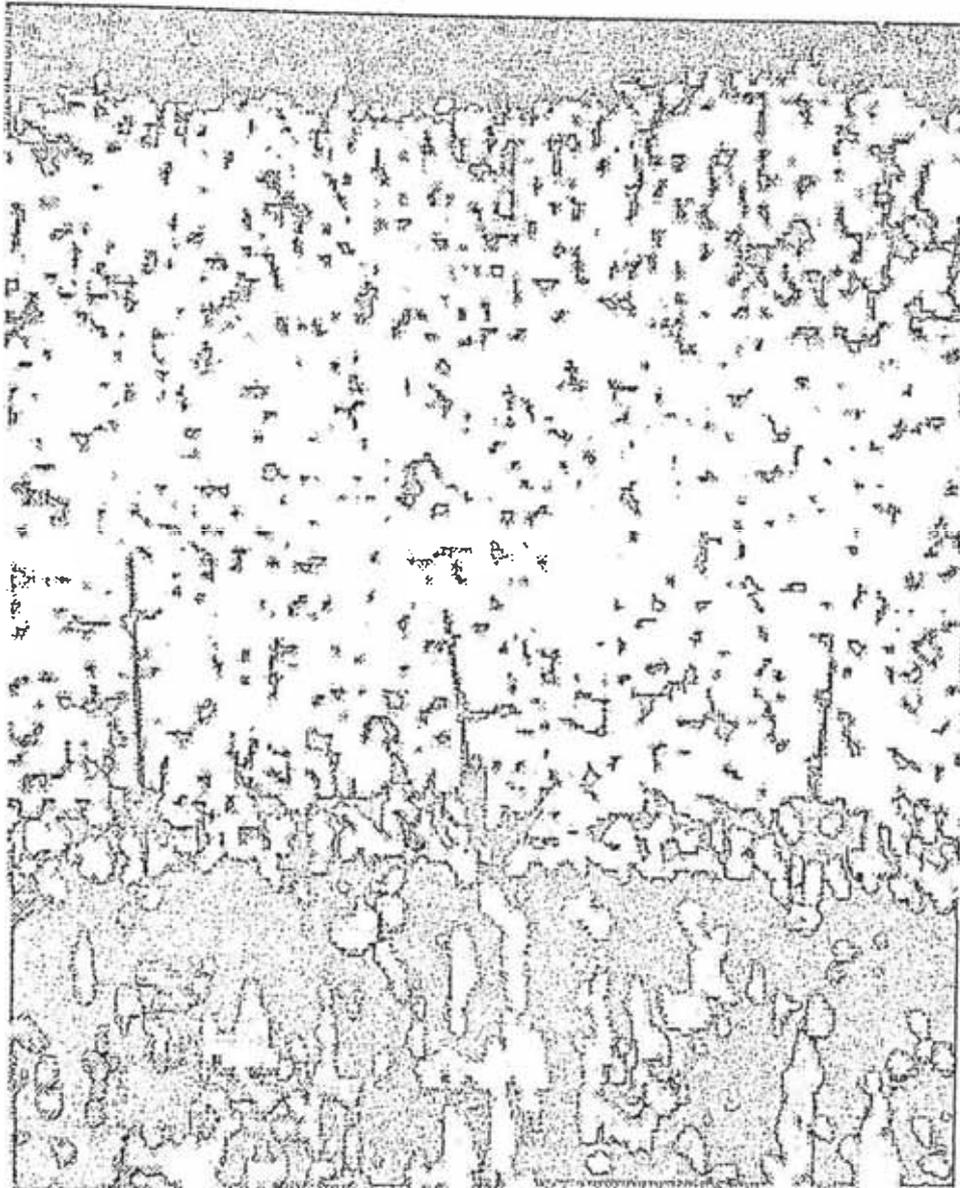


Fig. 3.2  
Micro estructura de la Zona de Adherencia del Recubrimiento Níquel-Cromo con el Material Base

### **3.3 Prueba de los recubrimientos de detonación de material NHL a la resistencia de adhesión.**

Los recubrimientos aspersados deberán poseer una resistencia de adhesión necesaria con la base, una resistencia al desgaste y a las altas temperaturas.

La adhesión del recubrimiento con el material base se consigue básicamente por la unión mecánica, mientras que la fundición, la difusión métrica y la unión física por las fuerzas de Vander Waals, son adicionales a la adherencia mecánica. Esto significa que la resistencia de adherencia del recubrimiento con la base se determina por la magnitud y el carácter de rugosidad de la superficie del metal base.

La resistencia de adhesión del material aspersado NHL en las plataformas de punta de los alabes de la II etapa de la turbina se determina según la siguiente metodología.

La prueba a la resistencia de adhesión por la tracción del pin se efectuó según el esquema de la fig (3.3)

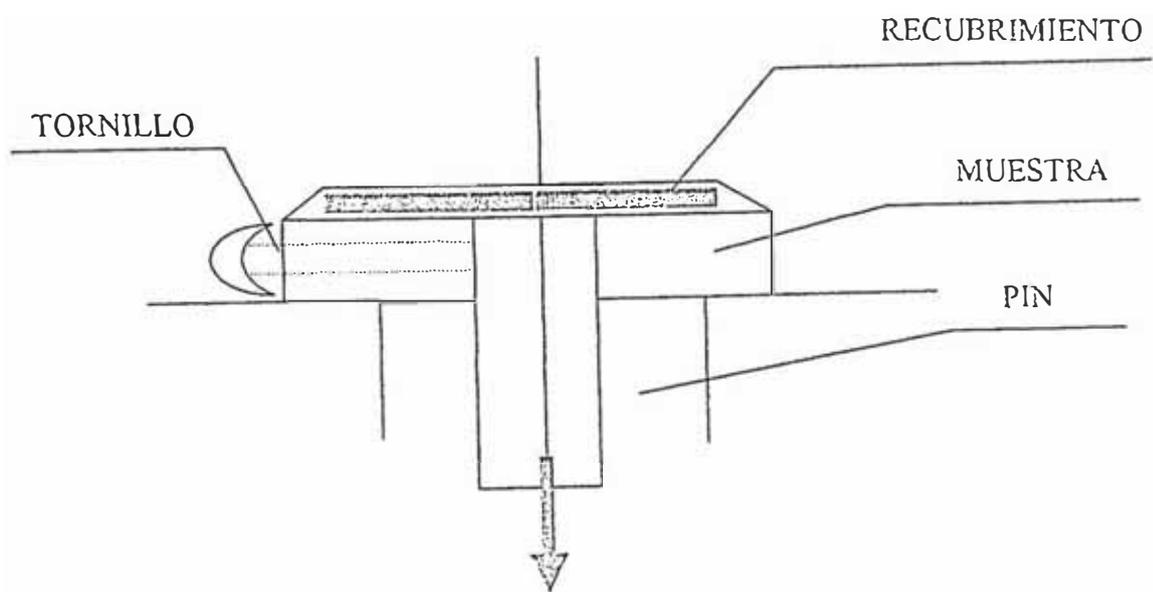


Fig. 3.3  
Modelo de Prueba

Las muestras con orificios cilíndricos se confeccionaron de un material, utilizado para la fabricación de los alabes.

Así mismo Los pines también se fabricaron de este mismo material.

El pin se coloca en la muestra de tal manera que coincidan las superficies y se fija con un tomillo especial. Las muestras armadas se colocaron en un dispositivo especial para 5 muestras y se fijan.

Como la resistencia de adhesión depende de la preparación de la superficie, es decir de la rugosidad y de los regímenes de la aspersion por detonación, era necesario determinar la rugosidad optima de la superficie y el régimen optimo de la aspersion para obtener una máxima resistencia de adhesión.

a) Rugosidad de la Superficie.

De las fuentes bibliográficos se sabe que para unas mismas condiciones, la máxima resistencia de adhesión tiene lugar cuando coinciden las magnitudes del valor medio del diámetro del polvo aspersido y el valor de las hendiduras de la rugosidad de la superficie. Como la composición granulométrica del polvo utilizado NHL era de 20 a 40  $\mu\text{m}$  , entonces era necesario obtener un valor de la rugosidad de las hendiduras durante un proceso por chorro de perdigones en un intervalo de 30 $\mu\text{m}$ .

La magnitud comparable señalada se evalúa según la expresión :

$$H_{\max} = 0,75d$$

Donde :

$H_{max}$  - es la máxima altura de las igualdades  $\mu m$ .

$d$  = el diámetro medio del polvo aspersido  $\mu m$ .

De la expresión se deduce que la máxima rugosidad de las plataformas de punta deberá encontrarse en los límites de 20 a 25  $\mu m$ .

Para obtener la rugosidad dada de la superficie se necesita conocer el régimen de tratamiento con chorro de perdigones, tenemos aquellas parámetros como :

$L$  mm = Es la distancia desde la salida de la tobera de la pistola de chorro de perdigones hasta la superficie tratada.

$P$  Kg / Cm<sup>2</sup> = Es la presión del aire comprimido del equipo.

$T$  seg. = Es el tiempo del tratamiento de chorro de perdigones.

$\alpha$  = Es el ángulo del chorro del aire comprimido respecto a la superficie tratada.

Como se considera 90° al ángulo y la distancia optima 100mm, entonces vamos a utilizar las funciones de la microrugosidad respecto a la presión del aire comprimido y al tiempo del tratamiento.

Para nuestro caso ( $H_{max}=20$  a  $25 \mu m$ ) el régimen de tratamiento de chorro de perdigones será :

$$L = 100mn$$

$$T = 10s$$

$$P = 5kg/cm^2$$

$$\alpha = 90^\circ$$

b) Régimen de la aspersión de detonación.

Al régimen de la aspersión de detonación relacionaremos aquellos parámetros, como :

Velocidad de disparo de 4 disparos en un segundo

$H, mm$  - distancia desde la salida del tubo del cañón hasta la superficie aspersada.

$T$  = Es el tiempo de la aspersión en segundos.

Oxígeno  $m^3/h$  = Es el caudal del oxidante.

A acetileno  $m^3/h$  = Es el caudal de la sustancia de trabajo.

$Q$  argón  $m^3/h$  = Es el caudal del gas transportador.

$P, Mpa$  = Es la presión del agua.

Con el caudal del gas de trabajo y del oxidante, se selecciona el contenido de calor de la onda explosiva que se necesita para fundir y

fusionar las partículas del polvo de NHL, que tienen una temperatura de fusión de 1500°C.

Con el caudal del gas transportador se regula el cono de pulverización del polvo aspersado.

La velocidad de disparo y la presión en el sistema de enfriamiento son magnitudes constantes.

El tiempo de aspersión influye en el espesor de la capa aspersada.

Para todas las condiciones iguales, sobre la resistencia de adhesión ejerce influencia la distancia de la aspersión.

Para determinar la distancia de la aspersión por detonación, durante la cual la resistencia de adhesión tiene un máximo valor, la investigación se realizó para tres distancias

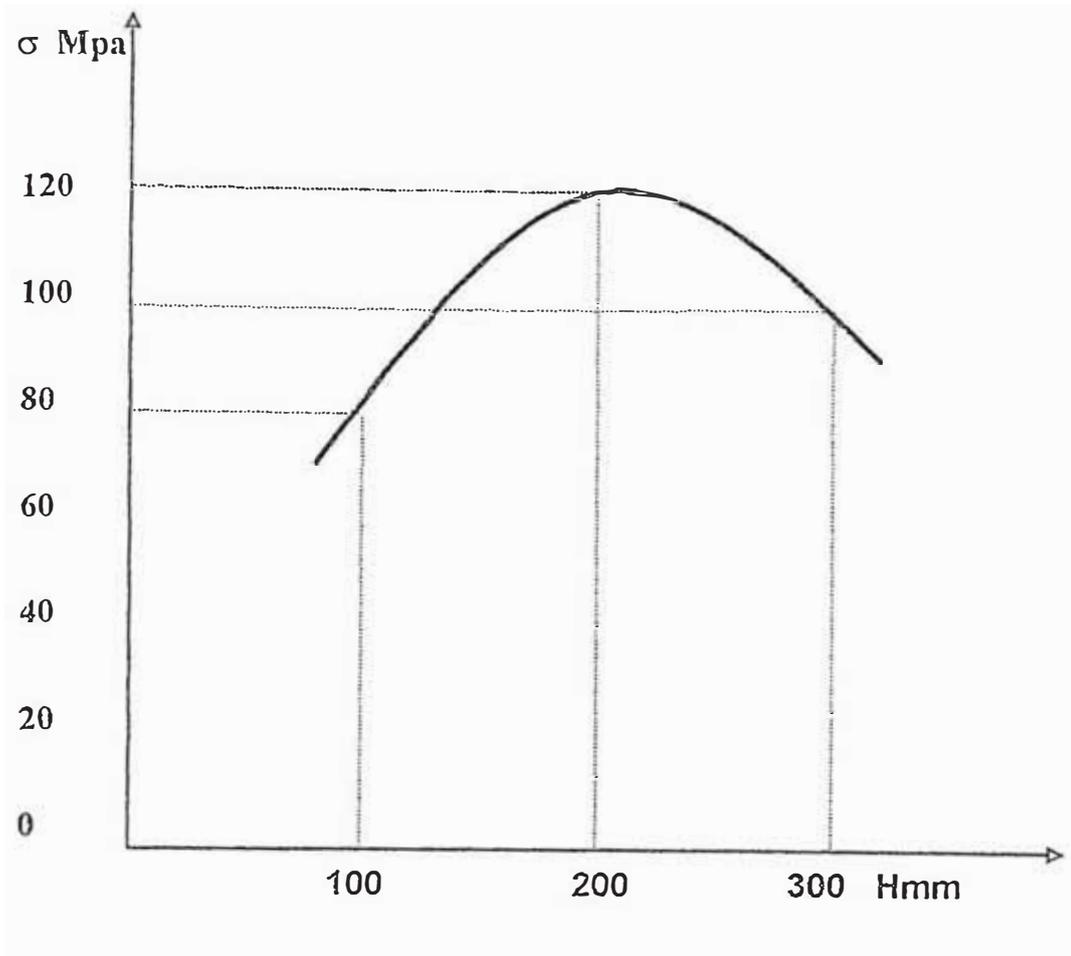
$$H = 100\text{mm} ; 200\text{mm} ; 300\text{mm}$$

El régimen del equipo de detonación se eligió el siguiente :

n	= 4 disparos / segundo - velocidad de disparo
Oxígeno	= 1,5 m <sup>3</sup> /h - cantidad del oxidante
Acetileno	= 0,06 m <sup>3</sup> /h - cantidad del gas de trabajo
Argón	= 0,02 m <sup>3</sup> /h - cantidad del gas transportador
Presión de agua	= 0,2 Mpa - es la presión en el sistema de enfriamiento
Tiempo	= 30 segundos

Para cada distancia se utilizó las muestras (ver fig. 3.3) en una cantidad de 10 unidades.

La preparación de la superficie de las muestras se efectúa en el régimen del equipo de chorro de perdigones, descrito arriba.



**Fig. 3.4**  
**Curva de Variación de la Resistencia de Adherencia en Función de la**  
**Distancia de Aspersión**

La rotura del pin desde la capa aspersada se realizo en una maquina de rotura donde se determina la fuerza con la que material del pin se rompe del material de la capa aspersada (en kg).

Los resultados de la prueba se muestran en la tabla 3.1

**Tabla 3.1**

H mm.	100	200	300
P Kgf	32	48	40
Kgf/mm <sup>2</sup>	8	12	10
MPA	80	120	100

La resistencia de adhesión se determino según la formula :

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

Donde :

P = es la fuerza de rotura del pin en kgf.

F = es el área del pin en mm<sup>2</sup> =  $\pi R^2 = 4\text{mm}^2$

Según los resultados de los datos tabulados, graficamos la función de la resistencia de adhesión respecto a la distancia de la aspersion.

Como se deduce de la curva, la máxima resistencia de adhesión del material del polvo de NHL con el material de la plataforma de punta de los alabes de la II etapa de la turbina del motor 55BC, tiene lugar a una distancia de aspersión de  $H=200\text{mm}$ .

Esta distancia se deberá anotar en el régimen de aspersión de detonación durante la recuperación de las plataformas de punta.

Sobre la resistencia de adhesión de los recubrimientos por detonación ejercen influencia otros factores:

- En la curva (Fig.3.5) se muestra la función de la resistencia de adhesión del material Ni Cr respecto a la velocidad de vuelo de las partículas aspersadas.

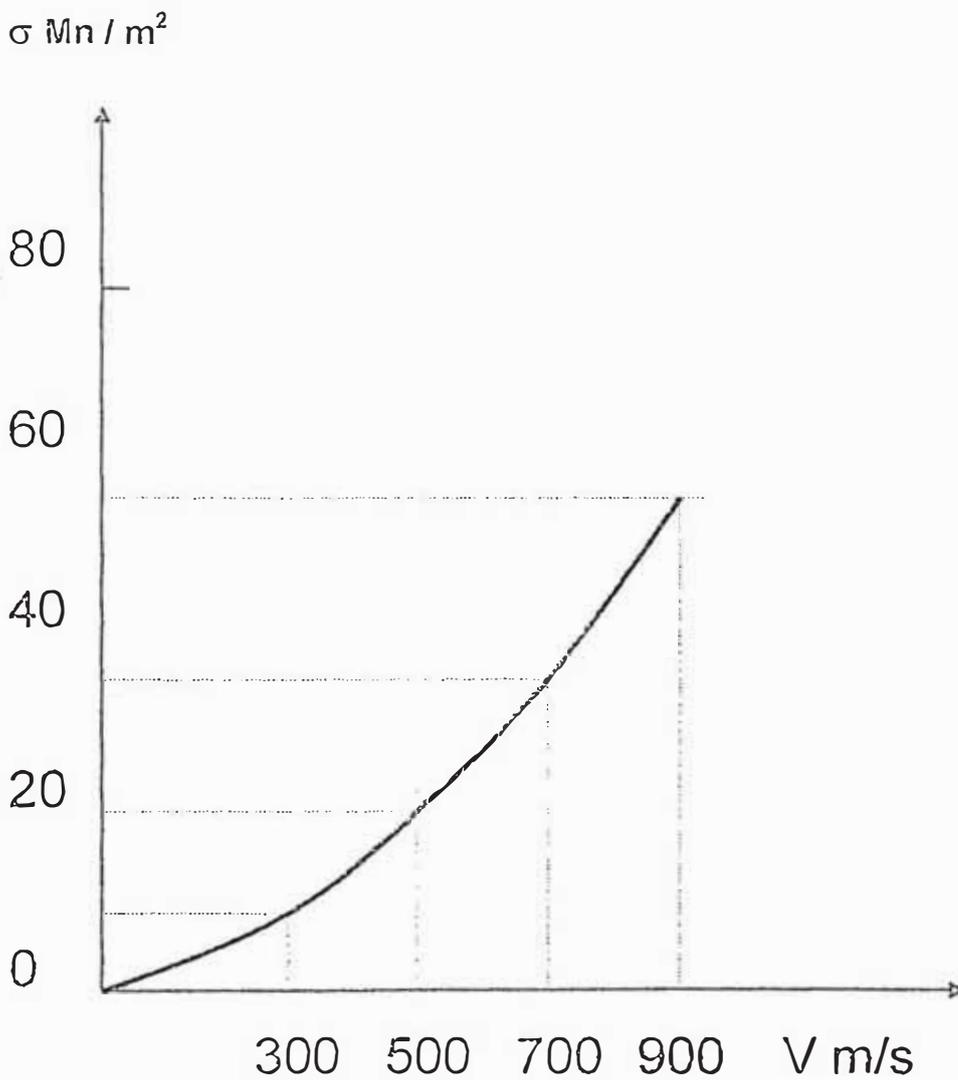
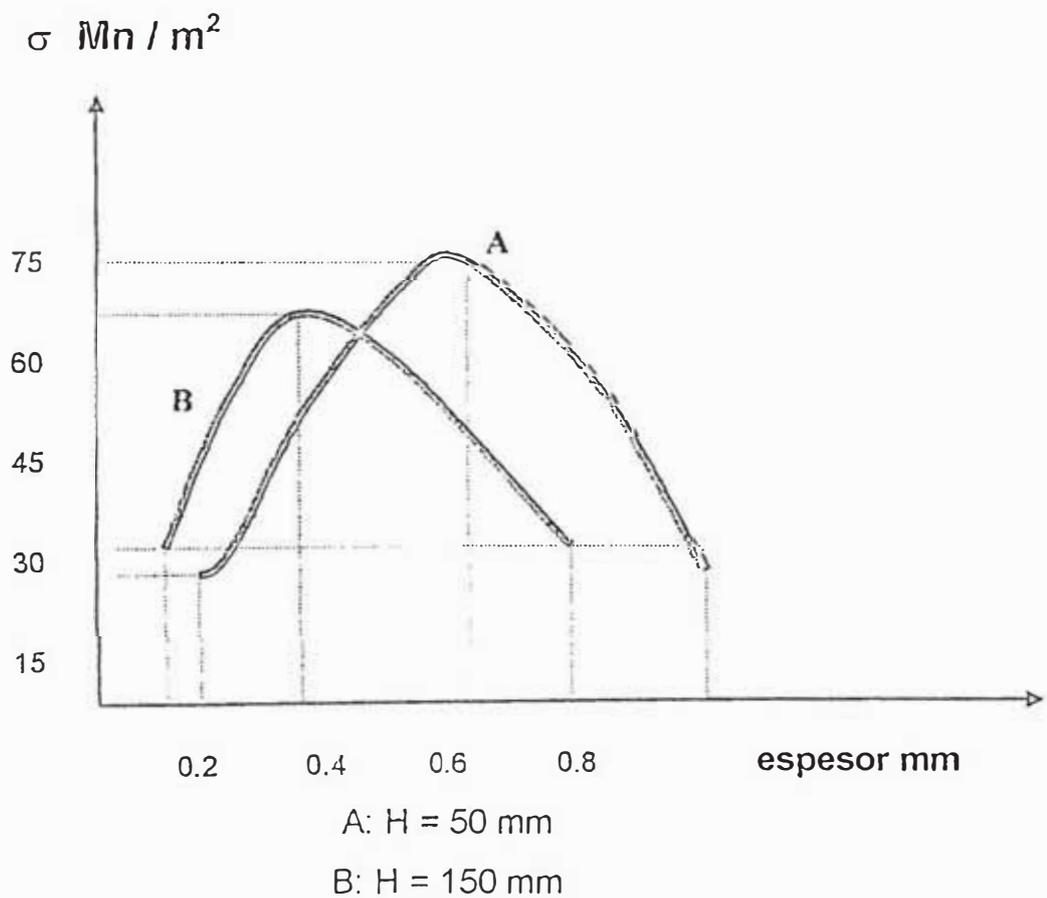


Fig. 3.5  
Curva de la Resistencia de Adhesión del Níquel – Cromo respecto a la velocidad de vuelo de las partículas.

Con el aumento de la velocidad de nudo de los partículas aumenta su energía y por consiguiente la resistencia de adhesión.

- En las curvas (Fig. 3.6) se muestra la función de la resistencia de adhesión de los polvos aspersados (Ni Cr) respecto al espesor de la resistencia aspersada.



**Fig. 3.6**  
**Curva de la resistencia de Adhesión del Níquel – Cromo respecto al espesor del recubrimiento.**

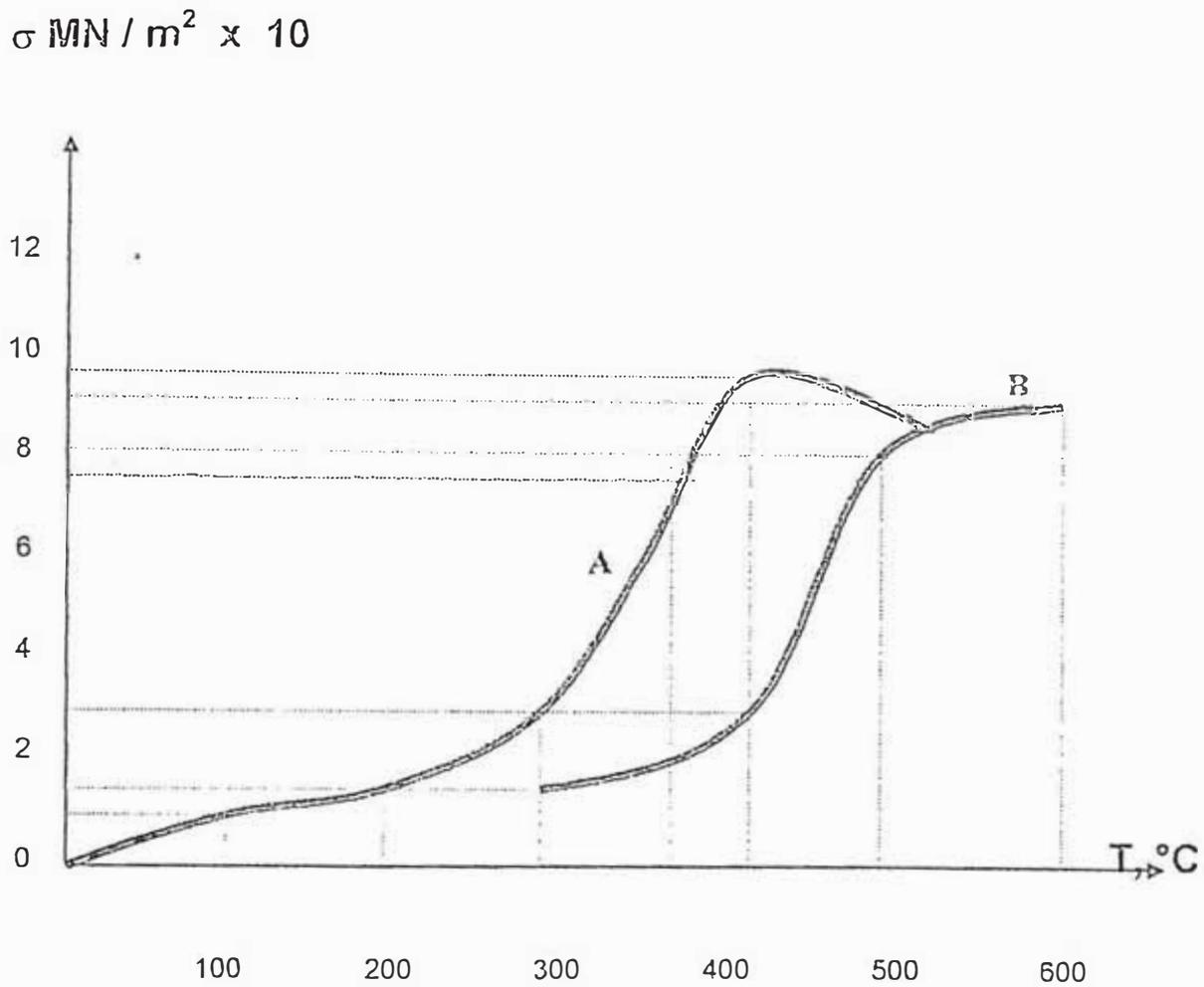
De la figura se deduce que la máxima resistencia del recubrimiento se observa un espesor de la capa de 0,3 a 0,6 mm. Esto se aplica por el hecho de que en la región de pequeños espesores tiene lugar la rotura cohesional del recubrimiento y también la rotura de propio recubrimiento cuando se rompe el pin.

Cuando se aumenta el espesor hasta 0,3 mm, no se observa una ruptura, pero la rigidez del recubrimiento no es suficiente, es decir durante las pruebas de rotura del pin, tiene lugar la deformación de la capa aspersada sobre el pin, su flexión y su agrietamiento, lo que provoca la reducción del esfuerzo necesario para su rotura.

Debido al incremento del espesor del recubrimiento desde 0,3 mm hasta 0,6 mm se produce la extracción de estos fenómenos, lo que se expresa en el aumento de la resistencia de adhesión hasta  $75 \text{ mn} / \text{m}^2$

Al mismo tiempo el aumento del espesor del recubrimiento hasta 0,8 mm se acompaña por un incremento de las tensiones internas en el sistema de recubrimiento – base, lo que provoca la reducción de la resistencia de adhesión.

- En las curvas (fig 3.7) se muestra la función de la resistencia de adhesión del material aspersado (Ni Cr) respecto a la temperatura del material base.



A:  $V = 800 \text{ m/s}$

B:  $V = 400 \text{ m/s}$

Fig. 3.7  
Curva de la resistencia de Adhesión del Níquel – Cromo respecto a la temperatura de Calentamiento de la Base.

Cuando hay un calentamiento previo de la superficie aspersada se produce una activación del proceso de interacción, por esta razón debido al impacto a alta velocidad se observa el aumento de la resistencia de adhesión.

Las características enumeradas anteriormente de la resistencia de adhesión se deben tomar en cuenta cuando se elige los régimen de aspersión por detonación.

### **Estructura, Dureza y Densidad del Recubrimiento de Ni Cr**

Como se señala anteriormente, el recubrimiento aspersado es un material obtenido como resultado de la aspersión continua de los partículas pequeñas deformadas. Todos los tipos de límites entre la base y el recubrimiento se forman como resultado de la interacción de fase salida. Como regla general, el contacto del recubrimiento con la base es lo suficientemente compacto, el recubrimiento en su totalidad copia el relieve de la superficie de la pieza cubierta.

El límite de recubrimiento con la base durante la aspersión por detonación se caracteriza por la presencia de una zona de mezcla de los materiales.

En La (Fig 3.8) se muestra la estructura del recubrimiento de Ni Cr , de la plataforma principal de punta del alabe de la turbina del motor 55BC para las regímenes de aspersión por detonación descritos anteriormente.

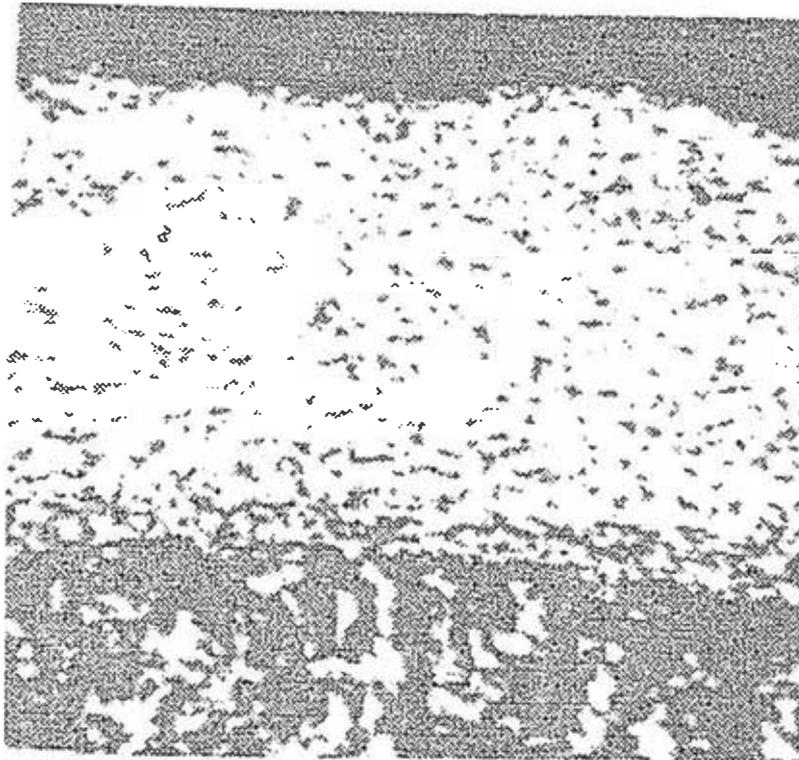


Fig. 3.8  
Micro estructura de la zona de adherencia del Recubrimiento Aspersado  
de Níquel – Cromo con el material del Alabe

El recubrimiento cromo – níquel de detonación es laminar. No hay películas de los óxidos y de otras suciedades en las partículas deformadas.

La dureza del recubrimiento obtenido se midió para un espesor de la capa aspersada de 0,6 mm con el equipo Vickers para una carga de 50N. Y fue de  $1300 \pm 80 \text{ mn} / \text{m}^2$ .

La microdureza del recubrimiento obtenido cromo - -níquel (medida con el equipo PMT-3 para una cargas de 0,20 N ) fue de  $2500 \pm 50 \text{ mn} / \text{m}^2$  en la región que hace contacto directo con el límite recubrimiento – base.

Cuando se aproxima a la superficie libre del recubrimiento su microdureza se reduce hasta  $2100 \pm 100 \text{ mn} / \text{m}^2$

Este endurecimiento de las primeras capas del recubrimiento se puede explicar por la acción de impacto durante la aplicación de las subsiguientes capas; que se acompañan por un endurecimiento por deformación.

La densidad de los recubrimientos por detonación es suficientemente alta. De las fuentes bibliográficas se deduce que la porosidad de los recubrimientos de cromo – níquel es igual a 1%.

Los datos enumerados anteriormente evidencian que la formación estructural durante la aspersión por detonación se sujetan a las leyes generales, típicos para los recubrimientos aspersados.

#### CAPITULO IV ANÁLISIS COMPARATIVO RESPECTO A LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y A LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL PROPUESTO NHL Y DEL MATERIAL DEL SERIE AMS 5837

Partiendo de las características físico-mecánica del material NHL, como son la alta resistencia al desgaste y a las altas temperaturas, y también de los datos bibliográficos de que en recubrimientos, este material supera a otras aleaciones de alta calidad en resistencia al desgaste en 5 a 10 veces, podemos realizar un análisis comparativo de estos materiales de acuerdo a la curva de función del desgaste relativo de los materiales de serie de la plataforma de punta del alabe con el material NHL (Fig.4.1).

De la figura se deduce que la resistencia al desgaste del recubrimiento cromo - níquel de las plataformas de punta de los alabes de la turbina es 3 veces superior a la resistencia al desgaste del material de BRR $\wedge$ .

Este fenómeno se explica por la presencia del cromo (25%) en el recubrimiento, que según sus características físico - mecánicas superan a la aleación BRR $\wedge$ .

Cuando el desgaste del recubrimiento de cromo - níquel es de  $\sigma = 0.6 \%$  el motor expira su tiempo de vida igual a 300 horas sin que se produzca el desmontaje del motor.

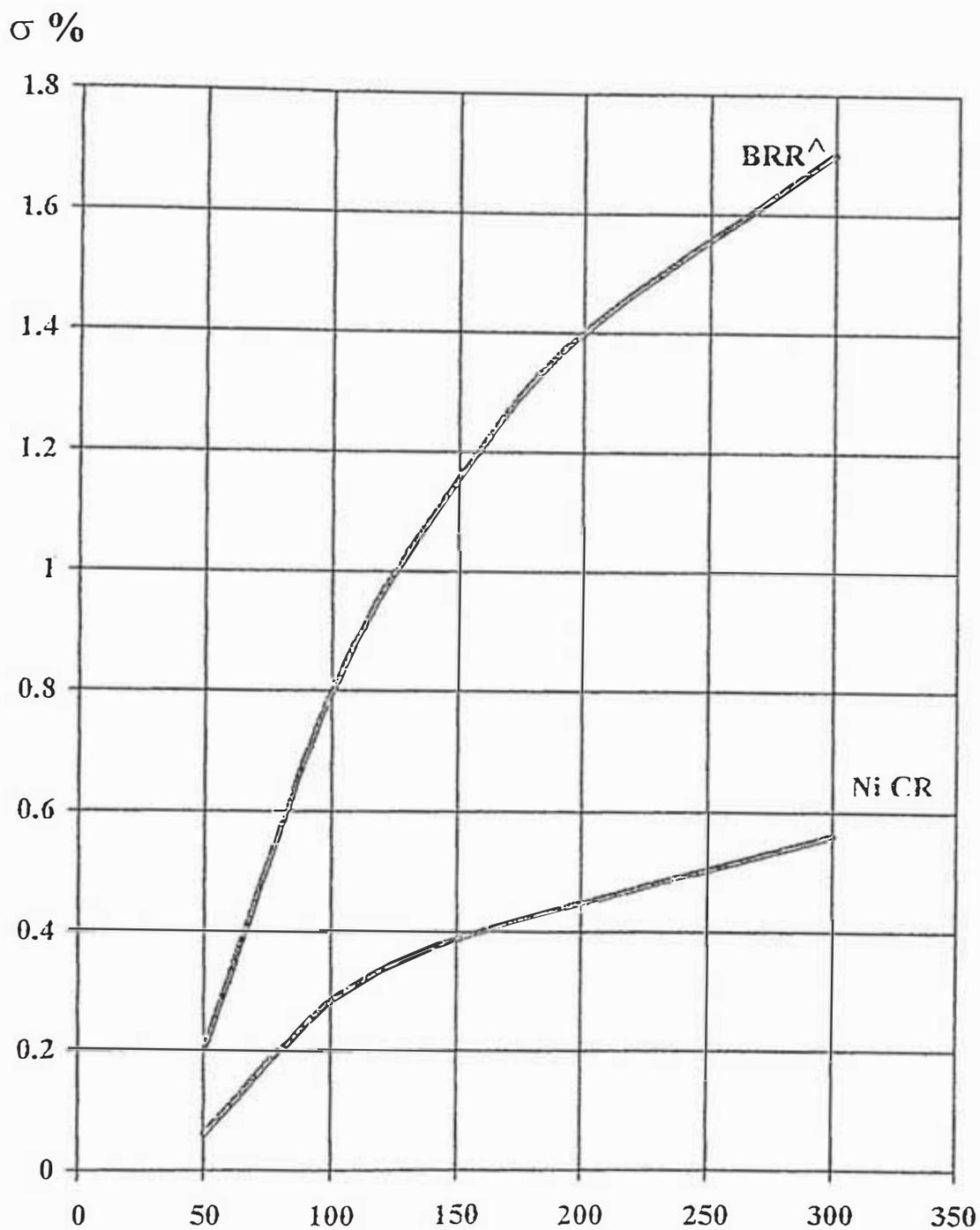


Fig. 4.1

Curvas de Variación del Desgaste Relativo de los Materiales de las Plataformas de Punta de los Alabes de la II Etapa de la Turbina Respecto al Tiempo Operacional

## Características Comparativas de las Propiedades de los Recubrimientos Aspersidos

Tabla 4.1

METODO DE ASPERSIÓN Y MATERIALES	RESISTENCIA DE ADHERENCIA M Pa.	POROSIDAD %	MICRODUREZA Gpa
DE LLAMA DE GAS	16 A 20	2 A 4	2 A 8,15
DE PLASMA	33 A 37	2.4 a 10	2.4 A 10
DE DETONACION	110 A 130	1.5 A 2	11.7 A 12.1

De los datos, mostrados en la tabla, se deduce que según las características de resistencia, el método de la aspersión de detonación, ventajosamente se diferencia del de plasma y de llama de gas.

Tomando en cuenta las características positivas de las propiedades de los recubrimientos aspersidos en este trabajo de tesis se propone para la recuperación de las plataformas de punta de los alabes de la II etapa de la turbina del motor 55BC, utilizar el método de aspersión de detonación.

## CAPITULO V

## ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO

### 5.1 Costo de recuperación de la operatividad del motor colocando alabes nuevos

Adquisición de 88 alabes nuevos.

Precio unitario	\$ 1,000
Mano de obra	\$ 2,000
Costo de 88 alabes	\$ 88,000
<b>Costo total</b>	<b>\$ 91,000</b>

Tiempo de ejecución de los trabajos : Supeditado a la llegada de los repuestos. (1 año).

### 5.2 Costo de Recuperación de los 88 alabes por el Método de Aspersión por Arco Eléctrico

Costo del equipo	\$ 15,000
Costo del material de aporte	\$ 35,200 (\$ 400 / por alabe)
Argón	\$ 300
Electrodo	\$ 20
Electricidad	\$ 70
Tratamiento Térmico de Revenido	\$ 200
Mano de obra	\$ 2,880
<b>Costo total</b>	<b>\$ 53,670</b>

Tiempo de ejecución de los trabajos: 72 horas

### 5.3 Costo de Recuperación de los 88 alabes por el Método de fusión recomendado por el Fabricante

Costo del equipo	\$ 50,000	
Argón	\$ 300	
Hidrógeno	\$ 300	
Nitrógeno	\$ 180	
Material de aporte ( 2 Lbs)	\$ 5,808	(\$ 66 / alabe)
Tratamiento térmico	\$ 200	
Mano de obra	\$ 3,840	
<b>Costo total</b>	<b>\$ 60,628</b>	

Tiempo de ejecución de los trabajos: 48 horas

### 5.4 Costo de Recuperación de los 88 Alabes por el Método de Aspersión por Detonación

Costo del equipo	\$ 15,000	
Acetileno	\$ 50	
Oxígeno	\$ 100	
Argón	\$ 300	
Material de Aporte Aluminizado	\$ 5,808	( \$ 66 / Alabe)
Energía Eléctrica	\$ 200	
Mano de Obra	\$ 1,920	
<b>Costo Total</b>	<b>\$ 24,378</b>	

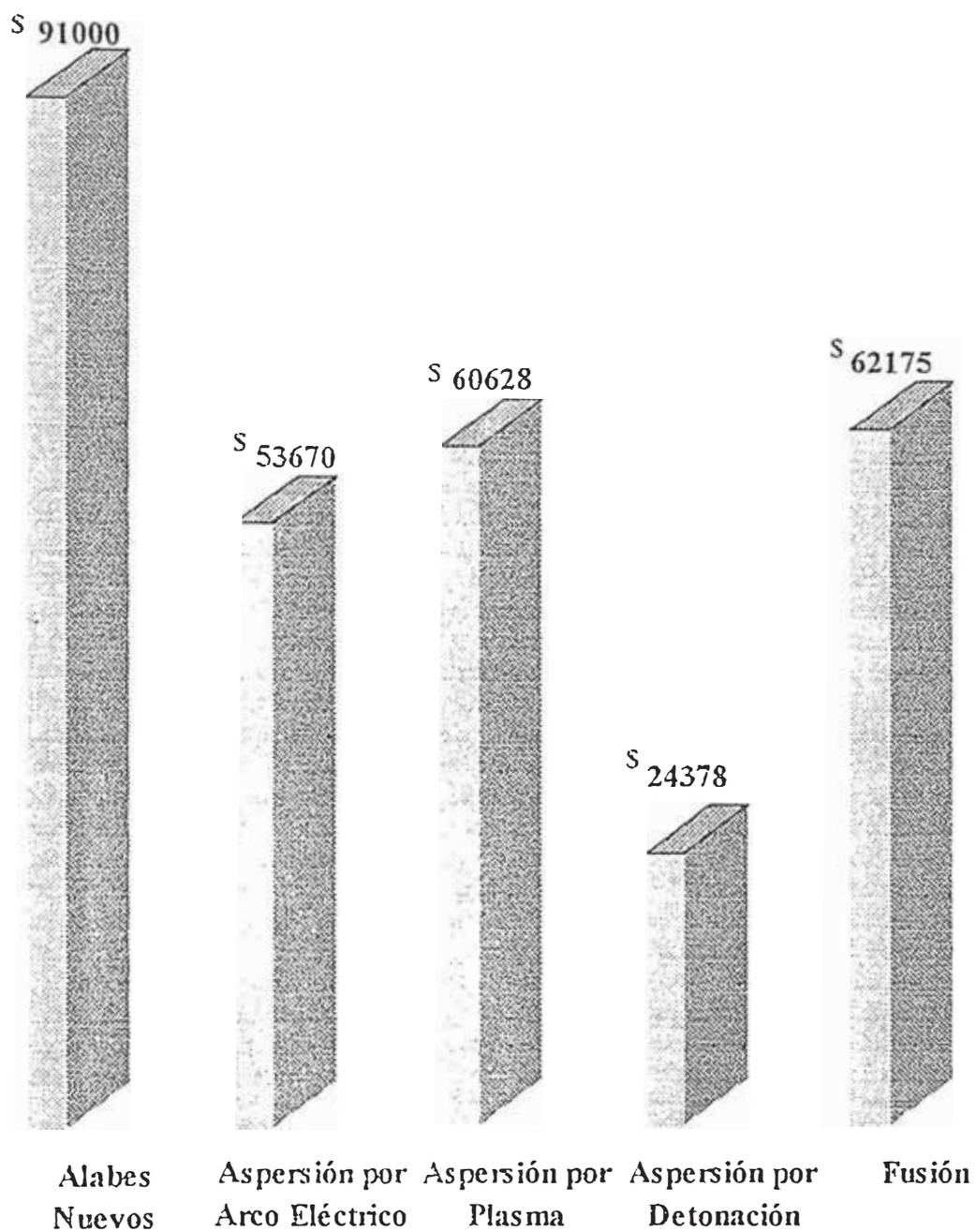
Tiempo de ejecución de los trabajos: 48 horas

### 5.5 Costo de Recuperación de los 88 alabes por el método de fusión recomendado por el Fabricante

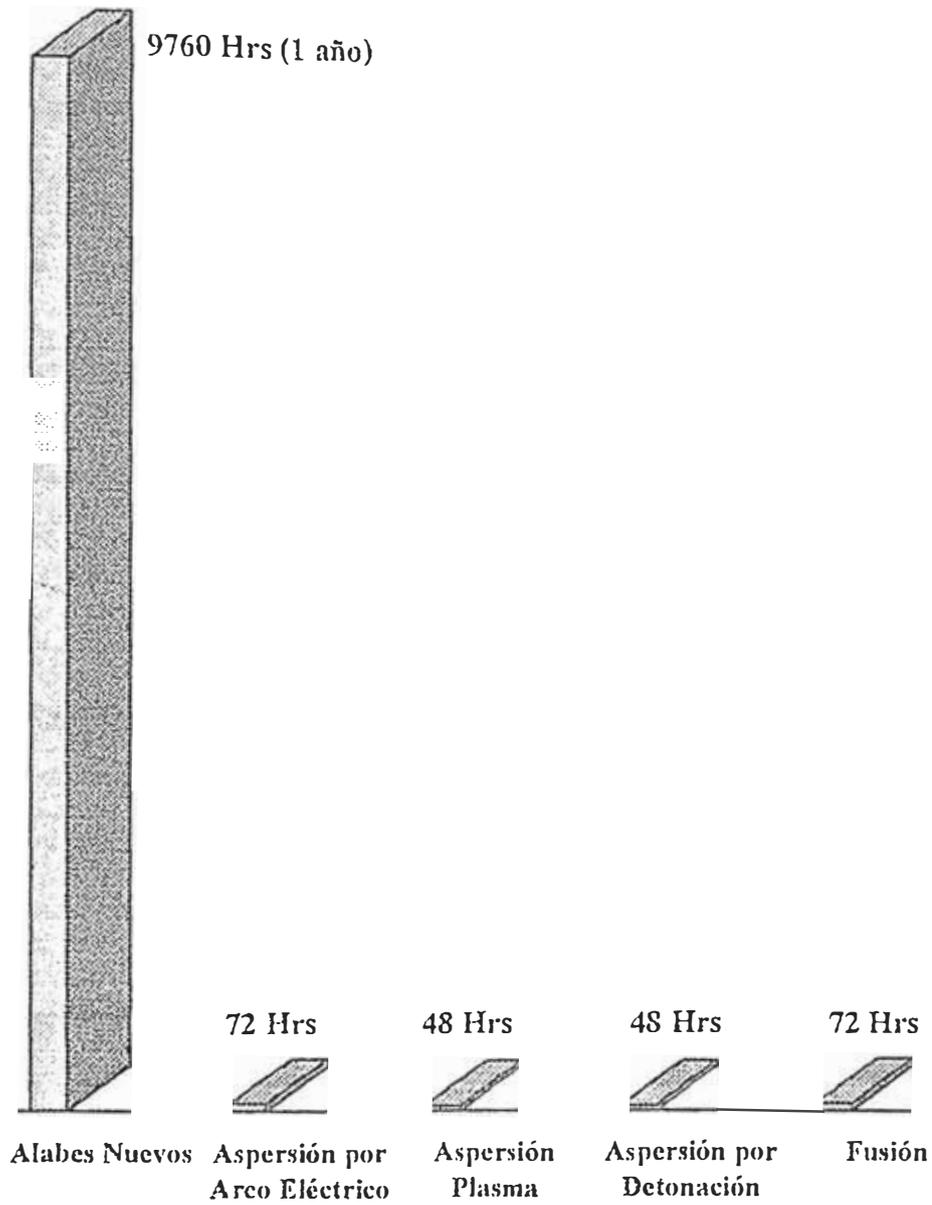
Costo del Equipo	\$ 15,000
Costo del Material de apote	\$ 44,000
Argón	\$ 300
Electrodo	\$ 25
Electricidad	\$ 70
Tratamiento Térmico	\$ 200
Mano de Obra	\$ 2,880

**Costo Total** **\$ 62,175**

Tiempo de ejecución de los trabajos 72 horas



**Fig 5.1**  
**Cuadro Comparativo de Costos para Recuperar los Alabes**



**Fig 5.2**  
**Cuadro Comparativo de Tiempo para Recuperar los Alabes**

## CONCLUSIONES

1. La investigación del desgastamiento del material de serie de las plataforma de punta de los alabes de la etapa II de la turbina del motor 55BC, ha mostrado que el principal tipo de desgastamiento es la corrosión-fretting y los desgastes que lo acompañan producto de la erosión gaseosa y desgaste abrasivo.
2. Dentro de los métodos aplicados en la recuperación de piezas de ingeniería y de aplicación de recubrimientos, la aspersion ha alcanzado el liderazgo por la calidad de las propiedades físico mecánicas de las áreas trabajadas, que en muchos casos supera a la de los materiales.
3. Entre los métodos de aspersion de materiales, el de aspersion por detonación permite obtener una mejor cohesión molecular, menor porosidad y no ocasiona pérdidas de propiedades físico mecánicas de las zonas adyacentes al área trabajada.
4. Se ha desarrollado el proceso tecnológico de recuperación de las plataformas de punta de los alabes de la etapa II de la turbina del motor 55BC por el método de aspersion de detonación.
5. Se ha desarrollado el método para determinar la resistencia de adhesión de los recubrimientos de detonación, lo que dio la posibilidad de determinar los régimen de preparación de la superficie y también el régimen de la aspersion de detonación.
6. Se mostraron las características comparativas del material NHL y del de serie respecto a la resistencia al desgaste a la resistencia de adhesión, a la porosidad y a otras características, de los cuales se deduce, que el

material NHL según todas las características en muchas veces supera el material de serie.

7. Se ha desarrollado una metodología, que permite evaluar las propiedades físico mecánicas y la resistencia al desgaste del material NHL.
8. Se mostró, que la resistencia al desgaste de la plataforma de punta del material NHL asegura una operatividad de la turbina en el régimen de diseño durante todo el tiempo de vida entre overhauls.

## RECOMENDACIONES

1. En base a los resultados de la investigación del presente trabajo de tesis, se propone utilizar el material NHL para la recuperación de las plataformas de punta de alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC.
2. Debido a las limitaciones presupuestales establecidas para el rublo de reparación, el análisis de costo beneficio nos permite recomendar la aplicación del método de aspersion por detonación para la recuperación de los alabes por el bajo costo que implica el trabajo.

La adquisición e instalación de alabes nuevos lo supera en costos en un 300%.

El método de aspersion por plasma en costos también es más caro en un 200%.

La aspersion por arco eléctrico también amerita una inversión mayor.

3. Considerando que una unidad de combate debe recuperar su operatividad en el menor tiempo posible, es recomendable aplicar la aspersion por detonación en la recuperación de las plataformas de punta de los alabes de la II Etapa de la Turbina del Motor 55BC, por el corto tiempo que se utiliza en su recuperación en relación a los demás procedimientos
4. Por la alta calidad y propiedades de las áreas trabajadas, se recomienda la aplicación de este método en las siguientes áreas de la industria para la recuperación y aplicación de piezas y máquinas en general.

**a) Industria Aeronáutica**

Toberas de los motores de reacción, partes de los motores de reacción, alabes de las turbinas, adaptadores, terminales y láminas para el revestimiento del fuselaje.

**b) Industria Automovilística**

Cigüeñales, ejes de distribución, ejes de las bombas de agua, pivotes, levas de apriete de los frenos, cabezales de los pistones, cilindros, anillos de pistón, discos de frenos, y válvulas de escape.

**c) Industria Electrotécnica**

Condensadores y superficies reflectoras de las antenas de los sistemas de comunicaciones.

**d) Industria Química**

Válvulas y asientos de las válvulas, ejes y bombas centrífugas, cuerpos de las bombas de los sistemas químicos, émbolos, cilindros y anillos.

**e) Utilización de la aspersion por detonación en los campos que**

requieran recubrimientos resistentes a la corrosión y a la oxidación a altas temperaturas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Construcción del motor 55BC.
2. Manual del mecánico de Fuerzas Aéreas.
3. Manual del Motor 55BC Vol. 1
4. Manual del Motor 55BC Vol. 2
5. R.L.O ' Brien American Welding Society Hispano América Vol 1.
6. R.L.O ' Brien American Welding Society Hispano América Vol 2.
7. R.L.O ' Brien American Welding Society Hispano América Vol 3.
8. Manual del reparación mayor del 55BC.
9. Panamarchuck V.G. "Mecánica físico-química" N°6 Lvou, 1974-sobre la influencia de lamicrorugosidad del material en la resistencia de adhesión de los recubrimiento".
10. Panamarchuck V.G. "Mecánica físico-química de la interacción de los procesos de fricción y del desgastamiento de los materiales del recubrimiento.
11. Jasui A, Morigaki O. - Fusión y aspersion, Mosui Mashino Estroyenie 1985.
12. A.I. Zuierier y otros- Aspersion por detonación de los recubrimientos. Sudo estroyence. Leningrado, 1979.

13. E. Krechmar- Aspersión de los metales. Moshimoestroyeme 1966.

14. T. Jicks. Principales principios de planificación de un experimento. Mir, 1967.