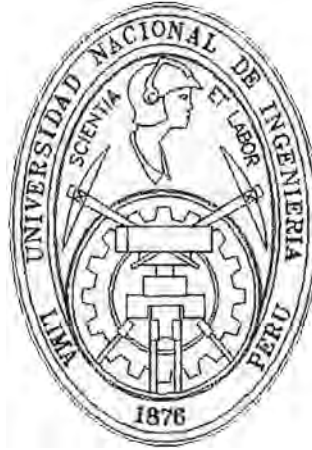


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

COMITE POST GRADO



**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO DE INGENIERIA AERONAUTICA
MENCION MOTORES DE TURBINA A GAS**

*Desarrollo de la Metodología para evaluar el valor máximo permitido de
los daños operacionales de los alabes móviles del compresor
del motor de Turbina de Gas.*

PRESENTADO POR:

LORENZO ALBERTO FLORIAN AYLLON

1998

INDICE

	Pag.
CAPITULO I INTRODUCCION.	
CAPITULO II ANALISIS DE LOS DAÑOS OPERATIVOS DE LOS ALABES MOVILES DE LOS COMPRESORES DE LOS MTG.	
2.1 Influencia de los Factores operativos y Constructivos en la Intensidad del daño de los Motores Producto de Objetos Extraños.	5
2.2 Generalización de los datos estadísticos sobre los daños de los Alabes durante la Operación.	8
2.3 Análisis de las normas temporales de los daños operativos permitidos de los Alabes problemas de investigación.	14
CAPITULO III ELABORACION DE LA METODOLOGIA PARA DETERMINAR LA MAGNITUD PERMITIDA DE COMPRESORES.	
3.1 Determinación de los Espectros de los modos y frecuencias naturales de los Alabes. Detección de los modos de las oscilaciones, potencialmente peligrosas.	18
3.2 Metodología de la determinación del valor tolerando de los daños de los Alabes durante las oscilaciones según los modos potencialmente peligrosos.	22
3.3 Evaluación de la Influencia del campo de las fuerzas centrífugas en las distribuciones de las tensiones vibratoriales durante las oscilaciones de los Alabes.	24

CAPITULO IV		INVESTIGACION EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA DINAMICA DE LOS ALABES CON DAÑOS.	
4.1	Equipamiento y Metodología de los Ensayos de fatiga de Alta Frecuencia.		35
4.2	Resistencia a la Fatiga de los Alabes durante las oscilaciones según los modos de Alta Frecuencia.		38
4.3	Determinación del valor tolerado de los daños de los Alabes durante las oscilaciones según los modos potenciales peligrosos.		42
4.4	Resistencia a la Fatiga de los Alabes reparados.		45
CAPITULO V		PARTICULARIDADES DE LA ROTURA DE LOS ALABES DE LOS COMPRESORES DURANTE LAS OSCILACIONES DE ALTA FRECUENCIA.	
5.1	Influencia de los Modos de las Oscilaciones en el Proceso de la Rotura de los Alabes.		46
5.2	Influencia de los Daños y sus ubicaciones en el proceso de rotura.		48
5.3	Influencia del nivel de las tensiones en la rotura por fatiga de los Alabes.		51
5.4	Análisis de la rotura vibracional de los Alabes durante la operación.		53
CAPITULO VI			
6.0	Resultados y Conclusiones		55
CAPITULO VII			
6.0	Bibliografía		57

APENDICE

TABLAS - ESQUEMA - FIGURAS

TABLAS

- TABLA 3.1 Resultados de la prueba de fatiga de Alabes nuevos según el modo 3 x 2.
- TABLA 3.3 Resultados de las pruebas de fatiga de Alabes que tenían un trabajo operacional.
- TABLA 3.5 Resultados de las pruebas de fatiga de Alabes con un trabajo operacional según el modo 4 x 2.
- TABLA 3.6 Resultados de las pruebas de los Alabes según el Método de Roturas.
- TABLA 3.7 Determinación del valor medio y de la desviación media cuadrática de la profundidad tolerada del daño.

ESQUEMA:

"Esquema del Banco para la prueba de Alabes".

FIGURAS:

- Fig. (1.1): Relación entre la velocidad del flujo en la entrada de la toma de aire (Vent.) y del componente lateral de la velocidad del viento W_{\parallel} .
- Fig. (1.2): Tipos de abolladuras y su medición.
- Fig. (1.3): Daños de los compresores MTG de tipos diferentes por etapas.
- Fig. (1.4): Distribución de las abolladuras según la profundidad en función del número de la etapa.
- Fig. (1.5): Distribución de las abolladuras operacionales a lo largo de la altura del Alabe.
- Fig. (1.6): Histogramas de las distribuciones de la longitud de las abolladuras.
- Fig. (1.7): Zonas en las paletas de los álabes en los cuales las abolladuras no se permiten.
- Fig. (1.8): Distribución de las medidas "l" y "b" de los daños operativos del AI-25.
- Fig. (2.1): Espectro de los modos y de las frecuencias naturales del álabe.
- Fig. (2.2): Esquema de preparación del álabe con transistores.
- Fig. (2.3): Según el modo "1 x 1".
- Fig. (2.4): Según el modo "2 x 1".
- Fig. (2.5): Según el modo "3 x 1".
- Fig. (2.6): Según el modo "4 x 1".

- Fig. (2.7): Según el modo "5 x 1".
- Fig. (2.8): Según el modo "1 x 2".
- Fig. (2.9): Según el modo "3 x 2".
- Fig. (2.10): Según el modo "4 x 2".
- Fig. (2.11): Según el modo "1 x 3".
- Fig. (2.12): Niveles de las tensiones que actúan en el álabe y los factores de seguridad.
- Fig. (2.13): Zonas permitidas en la paleta del álabe para daños con diferente concentración de tensiones.
- Fig. (2.14): Zonas permitidas para daños con concentración.
- Fig. (2.15): Evaluación del nivel de peligrosidad de los daños.
- Fig. (2.16): Modelo de confección de las abolladuras en el álabe.
- Fig. (2.17): Modelo de la prueba de los álabes con abolladuras según el "Método de Roturas".
- Fig. (2.18): Profundidad de los daños permitidos.
- Fig. (2.19): Modelo de ubicación de los cortes en el álabe.
- Fig. (2.20): Distribución de tensiones durante las oscilaciones del álabe según el modo 2 x 2.
- Fig. (2.21): Distribución del álabe según el modo flexural (2 x 1).

- Fig. (3.1): Curvas de resonancia de los álabes.
- Fig. (3.2): Curvas de fatiga de los álabes ensayados según el modo 3 x 2.
- Fig. (3.3): Curvas de fatiga de los álabes durante las oscilaciones según modos distintos.
- Fig. (3.4): Secuencia de las pruebas de los álabes según el Método de las Roturas.
- Fig. (3.5): Distribución de la profundidad permitida de los daños.
- Fig. (3.6): Distribución de las rajaduras de fatiga en los álabes con daños operacionales.
- Fig. (4.1): Zonas de rotura local de los álabes de los compresores durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia.
- Fig. (4.2): Ubicación de la rajadura por fatiga en los álabes durante las oscilaciones según los primeros modos.
- Fig. (4.3): Distribución de las máximas tensiones durante las oscilaciones de los álabes de un mismo tipo.
- Fig. (4.4): Diferencia en las condiciones del desarrollo de las rajaduras en los álabes de los compresores.
- Fig. (4.5): Rajaduras de fatiga obtenidas en un álabe.
- Fig. (4.6): Influencia de los modos de las oscilaciones en la dirección de las rajaduras de fatiga.
- Fig. (4.7): Rotura de los álabes en diferentes zonas debido a las abolladuras permitidas límites.

- Fig. (4.8): Rotura de los álabes con abolladuras ubicadas cerca a los bordes o de la punta.
- Fig. (4.9): Rotura de los álabes debido a la deformación de los bordes.
- Fig. (4.10): Curvas de la variación de la frecuencia de oscilaciones naturales de los álabes.
- Fig. (4.11): Curvas de la variación de la frecuencia de las oscilaciones naturales de los álabes.
- Fig. (4.12): Influencia del nivel de tensiones en el nivel de peligrosidad de las abolladuras.
- Fig. (4.13): Modelo que explica el mecanismo de formación de las rajaduras en la paleta del álabe en función del nivel de tensiones.
- Fig. (4.14): Rotura por fatiga de álabes diferentes durante unas oscilaciones de modos iguales.
- Fig. (4.15): Zonas de rotura de los álabes durante la operación.

RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo analizar los daños operacionales de los álabes del compresor de los motores de turbina a gas, para generalizar los datos estadísticos se ha efectuado en los operadores del motor el siguiente análisis:

1. Se investigó la distribución de los álabes en función a las etapas del compresor.
2. Se evaluó la distribución de los daños en función a la altura y el perfil de los álabes.
3. Se determinó el número máximo de abolladuras en un álabe.
4. Se determinó el número máximo de los daños de los álabes en el motor.
5. Se determinaron las máximas medidas de los defectos que obtienen los álabes durante la operación del compresor.
6. Se evaluó el carácter y el tipo de los daños operacionales.

Todas las abolladuras se encuentran en el borde de ataque, intrados y borde de salida, las abolladuras en los extrados son muy raros.

Por esta razón durante la elaboración de la metodología para evaluar la peligrosidad de los daños y durante la determinación de su magnitud tolerada estos se basan a los resultados de las pruebas de ALTA FRECUENCIA.

Durante el tensómetrado se ha determinado:

La máxima amplitud de las tensiones cíclicas σ_v

Se evaluó la distribución de los factores de seguridad locales en el álabe según la fórmula:

$$K_{vm} = \frac{\sigma_a}{\sigma_v}$$

Se evaluó la permeabilidad de las abolladuras y se determinaron las tensiones relativas $\bar{\sigma}$.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_m}{\sigma_n}$$

Para detectar los modos potencialmente peligrosos de las oscilaciones se realizó un análisis de las investigaciones publicadas en el MATI, se hizo referencia al espectro de las frecuencias y de los modos de las oscilaciones naturales de los álabes del compresor.

Para determinar la magnitud permitida de los daños para un tipo dado de álabes se utilizó el método experimental de las "roturas".

La magnitud permitida de las abolladuras se determinó en los límites de las tres zonas. La profundidad de las abolladuras varió desde 0.5 mm. hasta 2.5 mm. para un ángulo de abertura de $\alpha = 60^\circ$ y un radio de redondeo de $r = 0, 1\text{mm}$.

Estos resultados se comprobaron en el Banco de Pruebas de álabes "Vibro Banco".

CAPITULO I

INTRODUCCION

Actualidad del Trabajo

En la actualidad en el Perú se opera un parque de motores de turbina de gas de aviación relativamente grande, aquí tenemos motores de diferentes configuraciones estructurales y objetivos, ósea turbohélices, turbofans, turborreactores y turboejes. Estos se utilizan en la aviación militar y civil además en la energética y en el bombeo de gas. La principal tendencia mas moderna de mantenimiento de estos tipos de motores, es el mantenimiento por condición en lugar del utilizado en la actualidad mantenimiento según tiempo de vida.

Esta Transición permite ahorrar al estado grandes sumas de dinero, ya que aumenta el tiempo de vida, se reduce el numero necesario de repuestos, se eliminan las fallas debido al asentamiento, que son inevitables después de los trabajos de reparación- revisión, cuyo numero se reduce.

Se debe señalar que las compañías proveedoras extranjeras de los motores prácticamente realizan un mantenimiento de los motores por condición, permitiendo al personal de mantenimiento peruano solamente a la recopilación de información inicial. Mientras que el procesamiento de datos y la conclusión sobre la posibilidad de alargamiento del tiempo de vida se realiza por los representantes de estas compañías y además por sumas considerables.

Si embargo, para pasar el sistema de mantenimiento del motor por condición es indispensable cumplir las siguientes condiciones

Primeramente una parte inseparable del sistema de mantenimiento del motor por condición son los métodos y los medios confiables para evaluar no solamente los parámetros de salida del motor, sino también la capacidad operativa y el estado de sus accesorios, conjuntos y de sus piezas mas importantes.

La segunda condición importante para garantizar una alta confiabilidad del motor de turbina de gas es el establecimiento de las limitaciones fundamentales de los tiempos de servicios de las partes mas importantes de la construcción, en las cuales se tiene en primer lugar al compresor (discos y los alabes) y a la turbina.

El análisis del cuadro típico de las fallas de los motores de turbina de gas y de las diferentes configuraciones nos muestra. Que en primer lugar de acuerdo a las fallas, que provocan una salida del servicio antes de tiempo del motor (sea cuando las consecuencias de la falla no puedan ser eliminados en las condiciones de operaciones y como regla general el motor debe ser enviado a la fabrica reparadora) esta el compresor, cuyas fallas es del orden de hasta el 60 % del numero total de fallas. Durante esto en primer lugar se encuentra las fallas relacionadas con los daños de los alabes.

La mayor cantidad de roturas de los alabes de compresor tienen un carácter de fatiga Estas roturas son provocadas por las tensiones indicadas, que aparecen en los alabes durante sus oscilaciones. La mayor parte de los casos de rotura de los alabes están relacionadas con sus oscilaciones de resonancia.

Teóricamente evaluar el tiempo medio operacional hasta la falla de estos alabes inclusive conociendo el aspecto de los modos y de las frecuencias naturales prácticamente es imposible. Este problema se complica aun mas ante la presencia de daños mecánicos en los alabes, que provoca la variación del espectro de los modos y de las frecuencias de las oscilaciones.

El requisito de alta confiabilidad de los motores determina la necesidad de fundamentar científicamente la resistencia a la fatiga de los alabes con daños mecánicos de las compresoras. Ya que por un lado las dadas de baja de todos los alabes con daños carecen de mantenimiento del motor debido a la no utilización de la capacidad operativa.

Però por otro lado la operaci3n de los alabes con da±os mecánicos sin una evaluaci3n científicamente fundamentada de la reserva de su capacidad operativa puede conllevar a fallas peligrosas en vuelo.

Como los métodos analíticos existentes no poseen la suficiente exactitud para evaluar los coeficientes efectivos de la concentraci3n de las abolladuras que se encuentran durante la operaci3n entonces para determinar de manera fidedigna los factores de seguridad mínimo se requiere una nueva metodología que tiene en cuenta la carga real de los alabes durante las oscilaciones según los modos potencialmente peligrosos.

El desarrollo de esta metodología y el análisis del deterioro de los alabes del compresor y también la investigaci3n de la influencia de los da±os de la capacidad operativa de los alabes del compresor es el objetivo de esta tesis.

Durante el cumplimiento del objetivo trazado se resolverá las siguientes tareas.

Se efectuó un análisis de los da±os típicos y una generalizaci3n de los datos estadísticos sobre los deterioros de los alabes durante la operaci3n. En base al análisis de las normas temporales de los da±os operacionales de los alabes se desarrollaron los criterios para evaluar los factores de seguridad estructurales locales, la concentraciones de las tensiones, la tensiones relativas en el alabe durante las oscilaciones según el modo dado.

En base a la determinaci3n de los espectros de los modos y de las frecuencias naturales de las oscilaciones de los alabes se desarrolló una metodología para determinar la magnitud permitida de sus da±os.

Se realizó una evaluaci3n de la influencia del campo de las fuerzas centrífugas sobre la distribuci3n de las tensiones vibraciones durante las oscilaciones de los alabes.

Se elaboro la tarea y se realizo el análisis de los resultados de las pruebas (ensayos) sobre las resistencias dinámica de los alabes con daños, en base del cual se determina la magnitud permitida de los daños de los alabes del compresor durante las oscilaciones según los modos potencialmente peligrosos.

Se investigo las particularidades de las roturas de los alabes dañados de los compresores durante las oscilaciones de alta frecuencia.

Particularidades del Cumplimiento del Trabajo

El presente trabajo se basa en los resultados de los datos experimentales, cuya obtención ha sido posible gracias al establecimiento de acuerdos en el campo de formación y de actividad científica entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Universidad RUSA de Tecnología "Mati" de nombre "tscolkovsky" que ha ofrecido su laboratorio y su base de pruebas y ensayos necesarios para la realización de las investigaciones que interesaban al autor, y también los trabajos publicados por esta Universidad.

Utilidad Practica del Trabajo

La metodología desarrollada y los resultados de generalización de los datos experimentales sobre la influencia de los daños mecánicos de los alabes del compresor y de las condiciones operacionales sobre las reservas de su capacidad operativa, pueden ser utilizado tanto durante el desarrollo de los medios y de los métodos de control del estado del compresor de un motor de turbina de gas, como durante la fijación de limitaciones fundamentados de los tiempos de servicios de los alabes de los compresores ya que durante la realización de las pruebas (ensayos) y la evaluación de las reservas de capacidad operativas de los alabes del compresor de otros motores según la metodología elaborada pueden ser utilizados la características patrones de la resistencia, que permiten efectuar una evaluación fidedigna de la admisibilidad de uno u otro tipo de daño del alabe, detectados durante las inspecciones de revición del motor según el modelo de su mantenimiento por condición técnica.

CAPÍTULO II: Análisis de los daños operativos de los alabes móviles de los compresores de los MTG

2.1 Influencia de los factores operativos y constructivos en la intensidad del daño de los motores producto de objetos extraños.

En el proceso de operación los objetos extraños ingresan al ducto de gas de los motores tanto durante el movimiento de los aviones en la pista de aterrizaje como en vuelo. El vuelo del avión sobre todo a bajas altitudes es posible el daño de los alabes debido a la absorción de aves en el ducto del compresor.

De acuerdo a los datos estadísticos el porcentaje de motores del total dados de baja producto de a las golpeaduras es del orden del 40%.

Debido a la considerable pérdida económica debido al daño de los motores por las aves, la compañía Pratt & Whithney introdujo pruebas especiales a sus motores de estabilidad a la absorción de aves. Por ejemplo las pruebas de certificación según las normas de la FAR, al motor TD-70 deberán ser lanzados a su entrada hasta unos cientos de bolas de hielo de diámetro de 25 a 50 mm; pedazo de hielo, algunas cuantas aves en una masa de aproximadamente 0.7 kg. simultáneamente y un ave con una masa de cera de 2kg.

Durante el diseño, se consideran más peligrosos dos casos: el doblamiento o la rotura del borde de ataque y la rotura del alabe por efecto de los momentos de flexión.

Para la punta del alabe, que trabaja en un flujo supersónico, según los requisitos aerodinámicos es indispensable, que la paleta sea delgada, mientras que los bordes de ataque tengan pequeños radios de redondeo. Para obtener una mínima masa del motor los álabes, deberán ser hechos con una mínima masa del motor, los álabes deberán ser hechos con una mínima cuerda.

Estos mismos parámetros determinan el deterioro por objetos extraños. El uso de alabes con cuerdas pequeñas conllevan al aumento del número de alabes, dañados por un ave o por un objeto grande. En los motores de grandes dimensiones cuando son absorbidas las aves se dañan los bordes de ataque de 3 a 4 alabes, en las de pequeñas dimensiones los bordes de ataque de 8 a 9 alabes.

La investigación de la cinética de la absorción de objetos extraños en el ducto de los compresores y el análisis de algunos factores operativos y de diseño de construcción que influyen en el deterioro de los alabes, se han hecho en los trabajos [2, 3].

El autor asevera, que la absorción de las partículas mecánicas desde la superficie del aeródromo está condicionado por la aparición de los haces vorticiales que terminan en el suelo debajo de la toma de aire la probabilidad de absorción de las partículas dependen de sus dimensiones de la intensidad de los haces vorticiales, del carácter de agarre de las partículas por el núcleo del haz. El agarre de objetos extraños son facilitados por las rajaduras, orificios, la diferencia de las alturas de las lozas del concreto. Las dimensiones de la zona de agarre dependen del gasto de aire a través de la toma de entrada, de la dirección y de la velocidad del viento respecto al avión en movimiento.

En los trabajos señalados se hace hincapié en el viento, como factor determinante (durante su ausencia las partículas prácticamente no se absorben), además los más peligrosos son los vientos laterales y de cola-lateral respecto a la dirección del movimiento del avión.

Entre la velocidad del flujo en la entrada de la toma de aire y la componente lateral de la velocidad del viento existe una relación funcional, en la cual se forman haces vorticiales intensos.

Experimentalmente se ha establecido que la absorción vertical se produce solamente durante el funcionamiento del motor en sitio o durante el movimiento del avión, que no supere a la velocidad crítica para dicho avión.

Como principales factores de construcción, que influyen en la intensidad del daño de los alabes de los compresores, se consideran al tipo de la toma de aire, sus dimensiones geométricas y su ubicación en el avión. Esta determina la relación que existe entre el diámetro de la toma de entrada y la distancia del suelo. Si la relación del diámetro de la toma de admisión y la distancia desde su línea axial hasta la superficie del suelo menor a $1/3$ entonces la probabilidad de la formación de torbellinos (vórtices) es muy pequeña [3].

Por esta razón una ubicación racional de los motores en el avión puede considerablemente reducir el daño de los alabes del compresor una sustancial influencia sobre la estabilidad al daño de los alabes influye el material del cual ellos están fabricados. Desde este punto de vista es preferible utilizar las aleaciones de aluminio.

Fig. 1.1

La aparición de aviones con motores de baja ubicación, que tienen gran índice de derivación y correspondientemente gran gasto de aire que facilitan una intensa absorción vorticial de objetos extraños, crean condiciones para el incremento de la inoperatividad prematura de los motores por causa de las golpeaduras o abolladuras en los alabes del compresor. Todo lo indicado arriba mencionado determina y aumenta la actualidad de las investigaciones.

2.2 Generalización de los datos estadísticos sobre los daños de los alabes durante la operación.

Durante el tiempo de utilización de los MTG se ha recopilado un gran volumen de información sobre los daños operativos de los alabes de los compresores de los diferentes tipos de motores, que se utilizan en los holiductos y aviones de la aviación civil.

En base a la información obtenida se han desarrollado documentos oficiales que reglamentan la evaluación el deterioro de los alabes móviles de los compresores de los MTG. Estos documentos han permitido unificar las metodológicas de inspección de los alabes del compresor y los métodos de conteo de los daños con el objeto de reunir datos estadísticos.

De acuerdo a estos documentos en las fábricas y en los centros de investigación científica se han hecho los siguientes análisis.

Determinación de la distribución de los daños según las etapas del compresor.

Evidencia de la distribución de los daños a lo largo de la altura y alrededor del perfil de los alabes.

Establecimiento de la máxima cantidad de golpeaduras o abolladuras en un alabe.

Establecimiento de la máxima cantidad de alabes dañados en la rueda móvil.

Obtención de las máximas medidas de los defectos producidos en los alabes durante la operación.

Evidencia del carácter del tipo de los daños operativos.

Analicemos los principales resultados de las investigaciones anteriormente llevadas a cabo. Las investigaciones anteriormente efectuadas muestran que la distribución de las abolladuras según las etapas tiene un complejo carácter y una única función generalizada para todos los tipos de motores no se tiene.

Por esta razón para cada caso concreto se debe detectar las etapas, más deterioradas por golpeaduras para dicho motor.

Para la mayoría de los tipos de motores, sin embargo es característico un deterioro incrementado de las etapas medias. Por ejemplo las 4-6 etapas de los motores RD-3M-500, AI-20 las distribuciones más típicas que caracterizan el deterioro de los compresores de algunos tipos de motores según las etapas se muestran en la fig. 1.3.

Para el motor D-30 y AI-25 [1] la mayor cantidad de abolladuras se detectan en las 2-4 etapas del CBP y en las etapas medias sobre todo en la segunda respectivamente.

El análisis de los datos estadísticos sobre el deterioro de los alabes del compresor muestran que con mayor frecuencia los alabes tienen una más rara vez dos – tres golpeaduras. Una gran cantidad de abolladuras en un alabe se halla muy raramente y se observa en el caso de la absorción por el compresor de un gran objeto o de aves de dimensiones relativamente grandes. El número máximo de alabes dañados en la rueda móvil rara vez supera las 8-10 en una etapa. Los daños son la más diferentes según su geometría, sin embargo en los manuales de inspección de los alabes móviles se señalan tres tipos principales de abolladuras. Fig. 12

- a. En el borde de ataque “frente de B” sin protuberancias atravesada.
- b. En el borde de ataque en la tangente sin protuberancia atravesada.
- c. En el borde de ataque con una protuberancia atravesada.

La profundidad del daño se mide según la cuerda (Fig 1,2a), y en una dirección perpendicular de la superficie del alabe (Fig 1.2b y

El análisis de los datos obtenidos anteriormente nos permiten hacer una conclusión, que la máxima profundidad de las golpeaduras para los motores RD-3M-500 y AI-20 es del orden de cerca de los 8-10mm. Las hendiduras de este tamaño se encuentran rara vez.

Fig. 1.2

Como muestra la experiencia de la operación a parte de los tipos de daños señalados se encuentran y otros - los rasguños el doblamiento de los extremos de la paleta del alabe en los bordes de ataque y de salida, golpeadores con rotura del material, arrancamientos del material del alabe (Fig. 1.4).

Los daños de estos tipos tienen generalmente unas medidas geométricas relativamente grandes (hasta 8 mm y más a lo largo de la cuerda del alabe).

Examinaremos más adelante la distribución de los daños operativos a lo largo de la altura del alabe y alrededor de su perfil. Esta pregunta es central en el análisis del deterioro de los alabes móviles de los compresores de los MTG de aviación ya que el determina la metodología de los ensayos dinámicos de los alabes con la finalidad de evaluar su resistencia a la fatiga ante la presencia de daños operativos de la paleta del alabe.

Fig. 1.3 y 1.4

El análisis de los datos estadísticos, efectuado para muchos tipos de motores muestra que los daños operativos se ubican en la parte superior en la tercera parte de la paleta de los alabes móviles de los compresores y prácticamente están ausentes en la zona cerca a la raíz.

En la Fig. 1.5 muestran las distribuciones de los daños operativos a lo largo de la altura del alabe para diferentes tipos de motores y etapas.

En las figuras se ve, que la mayoría de las golpeaduras se ubican en las secciones periféricas de los alabes y en la parte superior se acumula hasta el 80- 90% de todos los daños. Todas las golpeaduras se encuentran en el intrados de los bordes de ataque y de salida, mientras que en el estrados de los alabes son demasiados raros. Según los datos estadísticos al borde de ataque le corresponde del 22 al 55%, al borde de salida el 7-14%, al intrado —el 34 -68%. Haciendo notar que cerca al 70% son golpeaduras suaves sin desgarramientos y protuberancias atravesadas. En las últimas etapas de altura relativamente pequeños las hendiduras y golpeaduras se encuentran y en la zona de raíz, sin embargo la tendencia del deterioro de la parte de los alabes se mantiene.

La ubicación de los daños operativos en la tercera parte superior de la paleta de los alabes móviles de los compresores los hacen potencialmente peligrosos durante las oscilaciones de los alabes según los modos de alta frecuencia ya que el máximo de las tensiones en ellos se ubican también en la tercera parte superior de la paleta. De aquí se deduce que la metodología de la evaluación del nivel de peligrosidad de los daños y la normatividad de su magnitud permitida se deben basar en la realización de ensayos de alta frecuencia.

Con la finalidad de fundamentar algunas posiciones principistas, indispensables durante la elaboración de la metodología de la evaluación del grado de peligrosidad de las abolladuras de los alabes, más abajo se da un análisis corto del deterioro de los alabes móviles de los compresores de los motores AI-25 y D-30.

En los trabajos [4-7] se muestran los datos estadísticos de 71 motores de AI-25, en los cuales dañados habían sido dañado 342 alabes de la primera etapa del CBP que tenían 387 golpeaduras.

Según este experimento se obtuvo que la mayoría de los alabes tenían un daño y solamente el 13% de los alabes tenían 2 golpeaduras. Los daños más frecuentemente encontrados son:

- Abolladura con rotura de material en el borde de ataque – 17%
- Doblez de la punta del alabe en el borde de fuga – 27.6%
- Dobles de la punta del alabe en el borde de ataque *- 11.3%
- Dobles en el borde de ataque- 9%
- Arrancamiento del material en el borde de ataque – 16%
- Arrancamiento del material en el borde de salida – 11%

Esto consiste cerca del 92% de todo el número de daños. Cerca al 8% de los daños llegan a tener roturas de material en la plataforma de apoyo y dobles de la plataforma del alabe y por consiguiente estos daños se pueden considerar que muy poco influyen en la resistencia dinámica de los alabes, que oscilan según los diferentes modos. Por esta razón los principales tipos de daños mecánicos de los alabes de los compresores se deben considerar a:

- La dobles de la punta del alabe en los bordes de ataque y de salida.
- Golpeaduras o abolladuras con rotura del material en los bordes.
- Arrancaduras del material en los bordes.
- Abolladuras suaves en los bordes del alabe.

En la Fig. 1.6a se muestran los histogramas de distribución de las abolladuras de dichos tipos según la longitud de las golpeaduras “l” a lo largo de los bordes y según la profundidad “b” de los defectos en función a la cuerda, contruidos según los datos de los trabajos arriba señalados. En los gráficos se ve, que la máxima medida de los defectos del tipo “dobles” esta en el orden de 15 mm para el defecto “abolladura en el borde de ataque”. Es de hasta 10 mm de longitud “l” y de hasta 6 mm de profundidad “b”, para las

golpeaduras "Arrancamiento de material " de hasta 10mm respectivamente. Durante esto $l \geq b$.

En los trabajos [8-11] se han llevado a cabo estudios sobre el deterioro de los alabes móviles de los compresores del motor D-30. Durante estos estudios 48 motores D-30 han sido inspeccionados de ellos 8 motores fueron desmontados después de terminar su tiempo de vida entre reparaciones. Para los alabes móviles la 1ra etapa del CBP, fabricado de aleación de titanio, son característicos el sobrelape, rotura y el desgaste de las plataformas autovibratoriales, más rara son los arrancamientos del material, los doblados de las esquinas y las golpeaduras con protuberancia. En los alabes de las II y IV etapas de aleación de aluminio se observarán golpeaduras con protuberancia del material, dobleces de las esquinas, etc.

Fig. 1.5 y Fig. 1.6

Para este motor como para los otros motores, se nota la tendencia al deterioro de la parte superior de la paleta de los alabes móviles del CBP para el CAP esta relación es menos evidente.

Los daños en todos los motores demontados antes de tiempo debido a las golpeaduras considerablemente superan a las dimensiones permitidas por las normas. En algunos alabes los defectos alcanzan las siguientes medidas:

- Arrancaduras del material en los bordes de hasta 20 x 20 mm
- Rasguños de hasta 0.1 x 0.5 x 60 mm.

En los alabes de los motores, que han trabajado su tiempo de vida entre reparaciones, también se observan daños que en su tamaño superan las normas.

- Dobleces de las esquinas de la paleta de hasta 15 -10 mm.
- Arrancamientos de material de hasta 6 x4 mm.
- Abolladuras con protuberancia del material en los bordes de hasta 10 x 5 mm.

Los alabes de los motores desmontados antes de tiempo debido a la presencia de golpeaduras tienen desde 3 hasta 6 daños en un solo alabe, las normas permiten en un alabe ≤ 2 golpeaduras.

Prácticamente estos datos demuestran que en operación se encuentra una determinada cantidad de motores con daños que superan las normas regulares y que han finalizado su tiempo de vida entre reparaciones con estos tipos de golpeaduras. Estos hechos demuestran la posibilidad de ampliar las normas existentes y sustancialmente reducir los motores desmontados antes de tiempo.

2.3 Análisis de las normas temporales de los daños operativos permitidos de los alabes problemas de investigación.

De acuerdo a [12-13] durante la normalización de los daños se utilizan resultados del tenso medrado de los alabes en el diapazón de trabajo de las RPM del rotor y los resultados de los ensayos de fatiga de los alabes en condiciones de laboratorio. Mediante el tenso medrado se determina la máxima amplitud de las tensiones cíclicas σ_v del ciclo en la sección examinada en los bordes que corresponde a los regímenes más tensos de trabajo de alabe. Según los resultados de los ensayos de fatiga de los alabes sin haber trabajado se determina el límite de fatiga. σ_a .

Fig. 1.7 y Fig 1.8

Más adelante se determina la distribución de los factores de seguridad locales en el alabe según la formula.

$$K_{vii} = \frac{\sigma_a}{\sigma_v}$$

La normalización de la magnitud permitida de los daños se efectúa en función a los coeficientes de seguridad locales obtenidos tomando en cuenta los casos de destrucción de los alabes en la operación o el carácter de los daños.

Se permiten daños de los alabes, que reduzcan el límite de fatiga de los alabes dañados no más de lo señalado en las normas. Caso contrario se propone la eliminación de los daños con la finalidad de la reducción del coeficiente de concentración efectiva ($K\sigma$) hasta $\leq 1,2 \sigma$ el reemplazo de los alabes dañados.

El coeficiente de concentración efectiva de las tensiones $K\sigma$ se determina como la relación de las tensiones que provocan la destrucción del alabe sin abolladuras (σ) y del alabe con abolladura (σ_0) en un mismo número de ciclos.

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

Para determinar las abolladuras permitidas se analizan las tensiones relativas en el alabe durante las oscilaciones según dicho modo ($\bar{\sigma}$):

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_M}{\sigma_H}$$

Las abolladuras son permitidas en la zonas donde $\bar{\sigma} < \frac{1}{k\sigma}$, que prácticamente determina el cumplimiento de las condiciones de resistencia a la fatiga de los alabes.

Según las normas existentes se permite el daño de los alabes de los compresores (abolladuras) de tales medidas, para que los motores desmontados antes de tiempo (MDA) por esta causa sean mínimos. Lo común en las normas para todos los motores es la intolerancia de los daños mecánicos en la zona de raíz de los alabes con una extensión del 10% de la longitud del alabe (Fig. 1.7). Si los alabes tienen plataformas antivibratoriales, entonces en su zona tampoco se permiten daños.

En la parte superior de la paleta en cada borde se permite solamente una abolladura, mientras el número total puede ser no más de 2 haciendo notar que para tipo del motor se reglamenta una magnitud límite igual del daño.

En una serie de motores se reglamenta el carácter de los daños y sus medidas permitidas (NK-8-4, NK-8-2, AI-25).

En la mayoría de los tipos de motores no se permiten abolladuras con protuberancias en la parte contraria de la paleta (D-30, D-30KV, D-30KP) y con rotura del material.

El número de alabes con daños en todo el conjunto se limita hasta 7.

En la figura 1.8b se muestran las distribuciones de las medidas de los daños operacionales "I" y "b" de los alabes móviles de la II - etapa del CBP del motor D-30, Su comparación con las normas para dicho tipo de motor demuestra que gran parte de los daños producidos en los alabes considerablemente superan los tolerados según sus dimensiones. Si además tomamos en cuenta el pequeño tamaño de la zona donde según las normas se permiten los daños en los alabes (ver Fig. 1.7) y también el carácter de los daños permitidos, entonces estas normas se deben considerar muy rígidas desde el punto de vista de los requisitos.

Como en la actualidad según los motivos señalados arriba no existe la posibilidad de reducir el número de abolladuras operativos, sus medidas entonces los MDA se pueden disminuir solamente con una considerablemente extensión de las normas en todos los parámetros de los daños. Sin embargo durante esto es indispensable garantizar los mínimos factores de seguridad Kvm, reglamentados por las normas de resistencia. La operación de los motores con abolladuras relativamente grandes es posible para bajos niveles de tensiones dinámicas en los alabes en los modos de oscilación de resonancia.

De esta manera, para una corrección fundamentada de las normas es indispensable un análisis de la estadística del deterioro de los tipos específicos de motores, la tipificación de estos daños y la evaluación experimental de la influencia de las abolladuras de los alabes en su tiempo de vida y en su seguridad operacional. Estas normas están determinadas por la resistencia dinámica real de los alabes dañados. Teniendo en cuenta la distribución real de los daños a lo largo de la longitud de los alabes, se puede afirmar que la tensión vibracional de los alabes del compresor (nivel de las tensiones durante las oscilaciones de los alabes según uno y otro modo, el número de modos en los cuales se observa las resonancias en el diapasón de trabajo de los RPM del rotor) determina las zonas en el alabe, donde se permite la presencia de las abolladuras de unas u otras medidas.

En la actualidad se considera metodología universalmente admitida la realización de los ensayos de fatiga de los alabes con abolladuras artificiales en la zona de raíz durante las oscilaciones según el primer modo flexural. El coeficiente efectivo de concentración de las abolladuras se halla como:

$$K_{\sigma(1x1)} = \frac{\sigma_{-1a}(1x1)}{\sigma_{-1a}k(1x1)}$$

Donde, $\sigma_{-1}(1x1)$ es el límite a la fatiga de los alabes no deteriorados durante sus oscilaciones según el primer modo.

$\sigma_{-1}k(1x1)$ es el límite a la fatiga de los alabes con abolladuras (concertadores) de determinada profundidad "h".

Las desventajas de esta metodología consisten en la no correspondencia del sitio de ubicación de las abolladuras artificiales al sitio de las abolladuras operacionales. Por consiguiente el cálculo de "K_{vm}" durante sus oscilaciones según los modos de alta frecuencia efectuado con el uso de estos datos puede originar errores incluyendo y las medidas de los daños permitidos.

CAPITULO III: Elaboración de la metodología para determinar la magnitud permitida de los daños de los alabes de los compresores.

3.1 Determinación de los espectros de los modos y de las frecuencias naturales de los alabes. Detección de los nodos de las oscilaciones potencialmente peligrosos.

El análisis de las causas de la aparición de las roturas vibraciones de los alabes de los compresores, sobre todo ante la presencia en ellos de daños mecánicos, esta relacionado con la necesidad de una orientación clara en sus espectros de los nodos y frecuencias naturales. Para determinar los espectros de los nodos y frecuencias naturales de los objetos elegidos para los ensayos se utilizó la metodología descrita en [1.4, 1.5]. Los resultados del experimento se muestran en la Fig. 21. Con la evaluación del grado de plenitud del espectro determinado en el diapasón dado de frecuencia. La Excitación del Alabe se realizo extrapolación de las curvas frecuenciales se efectuó mediante un pequeño vibrado de contacto piesométrico, mientras que la detección de los dibujos de las líneas nodales – con ayuda de figuras de arena. Para determinar la distribución de las tensiones en la paleta del alabe se efectuó un experimento especial en un banco vibracional de aire. Durante esto los alabes se prepararon con 63 tensometros de papel de estaño con una base de 5 mm y ubicados en los bordes de ataque y de salida, desde el lado del estrado, intrados y en la punta (Fig. 2..2). En la Fig. 2.3 – Se muestran las curvas de distribución de las tensiones durante las oscilaciones del alabe según los modos flexurales, torsionales y laminares. La determinación de la distribución de las tensiones en el alabe permitió detectar aquellas zonas, donde se debe esperar la aparición de rajaduras de fatiga durante las resonancias.

La ubicación de las fisuras en la paleta del alabe durante las oscilaciones según los nodos, que interesan fue precisado con la realización de ensayos de fatiga de algunos cuantos alabes. Los datos obtenidos se han utilizado más adelante para determinar los sitios de adhesión de los principales tensoresistencias en un lote de alabes, destinados para la evaluación de su resistencias a la fatiga durante las oscilaciones según los nodos de alta frecuencia. A parte de esto, según las curvas de distribución de las tensiones en el nodo específico de oscilación se eligieron los sitios de adhesión de las tensoresistencias de control, según las cuales se mantuvo el régimen dado de ensayos en caso de que se malogre las tensoresistencias principales.

En los gráficos mostrados los máximos de las tensiones durante las oscilaciones de los alabes según los nodos de alta frecuencia se encuentran en la parte superior de la paleta y por condiciona la aparición de las rajaduras por fatiga también en la parte superior de la paleta del alabe. Esto es un fenómeno común para todo los alabes de los compresores independientemente a sus medidas y la construcción del soporte de fijación.

Por esta razón, sabiendo el nodo de las oscilaciones, se puede con una exactitud suficiente señalar el sitio de la rotura por fatiga del alabe sin efectuar ensayos de fatiga. Sin embargo para ciertos nodos de oscilación de alta frecuencia, que tienen dos o más máximos nominales de las tensiones (Fig. 27) la fisura por fatiga durante la resonancia puede desarrollarse en cualquiera de los dos sitios, donde tiene las máximas tensiones.

El grado de peligrosidad de las oscilaciones según los diferentes nodos depende de una serie de factores:

- Del nivel absoluto de las tensiones máximas de resonancia en uno u otro nodo, que se consigue durante el funcionamiento del motor en el disipador de los regímenes operacionales.

- De la orientación mutua y de las medidas de los daños operacionales y de la distribución de las tensiones en los nodos de resonancia de las oscilaciones.
- De la resistencia local a la fatiga de los alabes, que depende del tipo y de la ubicación de los daños.

Como las abolladuras operacionales se ubican en la parte superior de los alabes de los compresores entonces ellos son más peligrosos justamente durante las oscilaciones según los nodos de alta frecuencia

En relación con lo expuesto se introduce el término de nodos potencialmente peligrosos de las oscilaciones de resonancia que se tiene para un tipo específico de motor y para unas etapas elegidas de los compresores, tiene sus propios modos. Potencialmente peligrosos son aquellas modos de oscilaciones de los alabes de los compresores en los cuales en el caso más desfavorable de ubicación del daño se produce una reducción local de los factores de seguridad K_{vm} tomando en cuenta el concertador, inferior a los reglamentado por las normas de resistencias [12,13].

Las evidencias necesarias de los nodos potencialmente peligrosos pueden ser obtenidos de los resultados de los ensayos de pruebas a punto y de homologación de los motores ya que obtienen estas evidencias en obtienen motores operando es muy difícil.

Examinaremos en un ejemplo específico la utilización de los resultados del tensometrado según datos proporcionados por la compañía fabricante productora [16] para detectar los nodos potencialmente peligrosos de oscilaciones de las alabes en el diapasón el trabajo de las revoluciones del motor D-30.

El diagrama de resonancia de los alabes móviles de la segunda etapa del CBP según los nodos de oscilaciones de alta frecuencia se muestra en la fig. 2.3, mientras que el nivel de las tensiones en el diapason de trabajo de las velocidades del motor para estos alabes se muestran en la figura 2.14. En los dibujos señalados se ve, que el un nivel incrementado de las tensiones dinámicas con respecto al fono se observó en los nodos 3x2 ($f_p = 2750$ Hertz), 4x2 ($f_p = 380$ H₂) y 1x3 ($f_p = 4500$ Hz). El máximo valor de las tensiones en todos los nodos, medidos con tensómetros en el extremo, fue de cerca de 20 MPa. Si tomamos en cuenta los $\bar{\sigma}$ obtenidos durante las os

cilaciones de los alabes según dichos nodos (Fig. 2.10 - 2.12 entonces el valor real de las tensiones en la zona de los máximos normales es para los nodos 3x2 - de 40 MPa para el 4x2 - de 22 MPa y para el 1x3 - de 20 MPa.

Por consiguiente según el modo potencialmente peligroso determinado (dado) se le debe añadir el modo 3x2 ya que la presencia de los daños operacionales en la zona del máximo nominal de la tensiones (MNT) reducirá K_{vm} hasta el valor de

$$K_{vm} = \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_v} < 2$$

que según las normas de resistencias no es permitido. También los nodos de oscilaciones 4x2 y 1x3 se debe considerar potencialmente peligrosos ya que en los alabes pueden producirse daños y $k\sigma = 3$.

Este tipo de enfoque para detectar los nodos potencialmente peligrosos que toman en cuenta la ubicación real del MNT, su valor absoluto σ durante las oscilaciones según cualquier nodo y la concentración de tensiones, provocado por los daños es más conveniente en comparación con lo adoptado.

3.2 Metodología de la determinación del valor tolerado de los daños de los alabes durante las oscilaciones según los modos potencialmente peligrosos.

Las exigencias de alta contabilidad de los motores están condicionados a su vez por un valor más exacto de la resistencia a la fatiga de los alabes de los compresores con daños mecánicos como los métodos analíticos existentes, no poseen la suficiente exactitud en la evaluación de los coeficientes efectivos de concentración para la abolladura que aparecen durante la operación, entonces para una determinación segura de los mínimos factores de seguridad K_{vm} es indispensable una evaluación experimental de las resistencias dinámicas de alabes dañados de compresor sobre todo durante las oscilaciones según, los nodos de alta frecuencia.

Examinemos una metodología desarrollada para determinar la peligrosidad de las abolladuras y su valor permisible, que toma en cuenta la carga real de los alabes durante las oscilaciones según los nodos potencialmente peligrosos.

La metodología propone un enfoque diferencial al objetivo de las normas en el valor permitido de los daños a diferencia del existente para cada sitio en el borde del alabe, excluyendo la zona de máximo nominal durante las oscilaciones según el nodo dado le corresponde un daño determinado que caracteriza por la profundidad "h" en dirección de la cuerda. Para un valor crítico del radio y en el vértice. Durante esto se deberá cumplir la condición que estos daños no reducen la resistencia a la fatiga del alabe durante sus oscilaciones según el modo potencialmente peligroso. Entonces la resistencia del alabe con daños según las tensiones cíclicas se determina solamente por la resistencia local en la zona de la paleta, donde actúan las tensiones máximas, condicionadas por el nodo potencialmente peligroso.

En la práctica aparecen dos casos característicos cuando es indispensable determinar el valor tolerado de los daños en los alabes de los compresores.

1. Mínimo factor k_{vm} en el alabe sin daños en la zona MNT durante las oscilaciones según el nodo dado en el intervalo de trabajo de las revoluciones del motor se encuentra dentro de las normas de resistencia ($K_{vm} = [k_{vm}]$). Durante la presencia las zonas señaladas $K_{vm} < [K_v]$ el modo de la oscilaciones es potencialmente peligrosa (fig:2.15a) y por consiguiente no se toleran abolladuras ya que reducirá el factor local de seguridad mientras que en otras zonas en los bordes del alabe durante las oscilaciones según el modo de alta frecuencia es sustancialmente inferior y por esta razón en estas zonas los daños son tolerados para la condición del cumplimiento de $K_{vm} \geq [K_{vm}]$ tomando en cuenta la presencia del concentrador.
2. El mínimo factor en la zona del MNT $K_{vm} > [K_{vm}]$, que permite según los documentos reguladores (normas) haber abolladuras en esta zona que reduzcan el límite a la fatiga de los alabes, pero no más de lo reglamentado de (Fig. 12.12b). Durante la oscilación de los alabes según el nodo de alta frecuencia de (Fig. 2.3 – 2.12) destacan tres zonas:

- 1) Zona de acción de las máximas tensiones o zonas de máximo nominal (σ_H)
- 2) Zona, donde el nivel de las tensiones es de $0 < \sigma_M < (0.2 - 0.8)$
 σ_M
- 3) Zonas donde el nivel de las tensiones esta cerca de cero
Osea $\sigma_M \cong 0$.

De esto se deduce que el nivel de peligrosidad obtenido por el alabe de daño operacional, que se caracteriza en general por el coeficiente de concentración $K\sigma$ va depender sustancialmente de la zona en donde este se concentre caiga. Si el daño se encuentra en la primera zona, entonces durante las oscilaciones del alabe según el nodo potencialmente peligroso,

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_M K \sigma} < [kvm], \text{ que no es permitido según las normas de}$$

resistencia. En la segunda zona la presencia de daños no es permisible. Durante esto sin reducir la resistencia vibracional de los alabes durante las oscilaciones según el nodo potencialmente peligroso, el diagrama de la concentración permitida de las tensiones se determina por la expresión.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_M K \sigma} \geq [kvm], \quad K\sigma \leq \frac{\sigma_a}{\sigma_M [Kvm]} \quad (2.1)$$

La tercera zona en la paleta del alabe es la zona donde el valor permitido de la concentración de las tensiones en ellas no esta limitado, ya que aquí siempre se cumple la condición.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_M K \sigma} \gg [kvm]$$

Las limitaciones en el valor tolerado de los daños en la tercera zona pueden obtenerse de la condición de resistencia estática de los alabes σ del empeoramiento de los parámetros gasodinámicos del compresor.

Tomando en cuenta los datos sobre el deterioro de los alabes de los compresores en operación y también sobre las máximas dimensiones de las abolladuras obtenidas, la profundidad limite (h) de los daños en dirección de la cuerda se limita hasta 5-8 mm. Más exacta esta medida puede ser determinada del análisis de la estadística sobre los daños para un tipo específico de motor.

De lo señalado se deduce que para dicho daño (se conocen sus parámetros $h, \gamma, k\sigma$) para cada modo de oscilación se puede señalar las zonas en la paleta del alabe, cuando estos daños no van a reducir su resistencia a la fatiga. Correspondiente durante el aumento y su reducción de $k\sigma$ de cierto defecto, la dimensión de estas zonas va a reducir o aumentar (Fig. 2.13).

Examinaremos los casos más frecuentemente encontrados en la práctica cuando el factor local de seguridad en la zona del máximo nominal durante las oscilaciones según el modo dado

$\frac{\sigma_a}{\sigma_M} > [k_{vm}]$. Entonces en la zona de máximo de las tensiones es

permisible los daños del alabe, que reducen el límite a la fatiga, pero no más de los determinados por las normas de resistencia de los alabes del tipo dado. La consideración de este factor permite aumentar las medidas de las zonas en la paleta de concentración en comparación con los casos anteriormente analizados.

En la fig. 2.17 se muestran las zonas en los bordes del alabe, en las cuales la presencia de los daños que provocan la concentración señalada de las tensiones, no conllevará a la reducción del límite a la fatiga del alabe durante sus oscilaciones según dicho modo a valores inferiores a los condicionados por las normas de resistencia.

Para determinar experimentalmente el valor tolerado de los daños se utiliza el denominado método de rotura [14]. La esencia del método consiste en la determinación de la oscilación natural del alabe de los compresores que le corresponde una determinada distribución de tensiones en toda la paleta [17].

A parte de esto, el nodo de las oscilaciones determina la ubicación de uno o algunos MNT, que pueden encontrarse en el estrados, en los bordes de ataque, de salida o en la punta. A su vez la ubicación de los máximos nominales determina para el alabe dañado las zonas de desarrollo de las rajaduras por fatiga en la paleta. De esta manera el nodo de las oscilaciones determina el sitio de la rotura del alabe y viceversa, según el sitio de desarrollo de las rajaduras por fatiga se puede juzgar sobre el modo, responsable de esta rotura.

Lo dicho arriba está relacionado a los alabes sin daños. Ante la presencia de daños, la rotura del alabe puede comenzar ya sea en la zona de NNT o en el concentrador. Esta particularidad de la rotura de los alabes con concertadores es que se utiliza para la evaluación del nivel de peligrosidad de los daños mecánicos en los bordes del alabe y de su valor permisible.

No peligroso o permisible es aquel daño, si es durante los ensayos de los alabes según dicho nodo de oscilaciones en el nivel de control de las tensiones, la rotura por fatiga se producirá en la zona de máximo nominal de tensiones NMT.

A su vez se considera peligroso o no permitido aquel daño, cuando durante los ensayos según dicho modo de oscilación en el nivel de control de las tensiones, la rotura por fatiga comienza desde el concentrador.

Existe una tercera variante, cuando durante los ensayos la aparición de las rajaduras por fatiga y su subsiguiente desarrollo se fija tanto en la zona de MNT, como en el concentrador. Este tipo de daño se considera crítico ya que el aumento de la profundidad del daño en esta zona en el alabe, provocará que la rajadura en la otra zona se desarrolle desde el concentrador y el daño llegue a ser por definición peligroso.

Fig. 2.15).

Se debe hacer notar que con el método de las roturas se determina el valor permitido de los daños en aquellas zonas en los alabes donde las tensiones locales σ_M son inferiores a las máximas σ_H durante las oscilaciones según dicho nodo.

Abolladuras artificiales de profundidad calibrada se hacen según la metodología [48] en los bordes del alabe en las zonas investigadas como se muestra en la Fig. 2.16 para contra la eficiencia mutua de los daños la distancia entre dos adyacentes deberá ser no menor de $2h$.

El método de las roturas consiste en un ensayo continuo de un lote de alabes con abolladuras en el nivel de control de las tensiones, que se fija según las tensoresistencias, ubicadas en la zona de NMT de dicho nodo, de acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 2.20. Aquí las líneas verticales le corresponden diferentes profundidades. La distancia entre las líneas Δh se recomienda elegir en los límites de $0.15 \div 0.25$ mm. El primer alabe con abolladuras con una profundidad de " h_0 ," en la zona investigada en el borde se ensaya en el nivel de control de las tensiones hasta la aparición de la rajadura por fatiga en el concentrador o en la zona del MNT. Más adelante en función del resultado de los ensayos los alabes se ensayan con abolladuras con una profundidad $h_i = h_{i-1} \pm \Delta h$, donde el signo "+" se usa en caso de formación de rajadura por fatiga en la zona del NMT, mientras que el signo "-" en caso de la aparición de fisuras o rayaduras en el concentrador o durante un desarrollo simultáneo en la zona del NMT y en la zona investigada de la abolladura.

El procesamiento de los resultados de los ensayos se efectúa de acuerdo al trabajo [18]. Se calcula el número total de alabes con fisuras en la zona del concentrador y el número total de alabes que tienen rajadura en la zona del NMT (aquí se considera también el número de alabes que tiene rajaduras en

la zona del MNT y en el concentrador). Más adelante se coge el menor de estos dos números. $N = \sum n$, que corresponde a una frecuencia inferior al acontecimiento de aparición de las fisuras producto del concentrador o en la zona del NMN, que se produciría para una profundidad de las abolladuras de h_1, h_2, \dots, h_i y este acontecimiento se efectuaría en $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$

veces. Las características estadísticas de la profundidad permitida de la abolladura, al valor promedio y la desviación media cuadrática se determina según las formulas.

$$\bar{h} = h_1 + d \left(\frac{\sum ini}{N} \pm 0.5 \right) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$S = 1,62 d \left[\frac{N \sum i^2 n_i - (\sum ini)^2}{N^2} + 0.0029 \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde h_1 : es el menor valor de la profundidad de la abolladura con el cual se efectúa el ensayo.

d : es el valor del intervalo durante la transición de un valor de la profundidad a otro.

i : es el número de orden de la profundidad de las abolladuras.

N_i : es el número de acontecimientos finales para una profundidad i de las abolladuras.

En la formula de \bar{h} para los cálculos se toma el signo “+” durante el análisis de la rotura del alabe en la zona del NMT mientras que el signo “-” durante el análisis de la rotura en la zona del concentrador.

Ya que el nivel de las tensiones relativas $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_M}{\sigma_H}$ durante la oscilaciones del alabe de una u otra forma varia en diferentes zonas en los bordes desde 0 hasta (0.2 - 0.8) entonces la profundidades toleradas de las abolladuras (\bar{h}) se determina para algunos cuantos niveles de las tensiones relativas en dicha dispersión. (Tabla 2.1).

$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_M}{\sigma_H}$ Nivel relativo de las tensiones	\bar{h} Profundidad tolerada de las abolladuras
1.0	0
0.9	$\bar{h} 0.9$
...	...
...	...
...	...
0.2	$\bar{h} 0.2$

Los valores hallados pueden utilizarse durante el planeamiento de los siguientes experimentos en otro nodo potencialmente peligroso de dicho tipo de oscilaciones (para los flexurales, torsionales y laminares)

Si es que $k_{vm} > [K_{vm}]$ en la zona de MNT, entonces el valor tolerado de los daños en esta zona se determina directamente con los ensayos de fatiga hasta un valor, reglamentado por las normas de resistencia.

En otras zonas del alabe la profundidad tolerada de los daños se determina por el método de las roturas.

Pero en este caso, a diferencia de lo descrito arriba, los alabes se ensayan con abolladuras, hechas tanto en la zona del MNT, como en la zona investigada del borde. Durante esto la profundidad de las abolladuras ubicadas en la zona del MNT, permanece invariable para todo lote de alabes ensayados, se limita solamente la profundidad de las abolladuras en las zonas investigadas. No peligroso se considera aquel daño en la zona investigada cuando en el proceso de ensayos la rajadura principal por fatiga para fatiga se desarrolla desde las golpeaduras ubicadas en la zona del MNT. Peligroso va ha ser el daño si es que durante los ensayos la rajadura por fatiga se desarrolla por este y no desde las abolladuras en la zona del MNT.

El cumplimiento de la condición señalada conlleva a que la resistencia del alabe por las tensiones cíclicas se va determinar con la resistencia local en la zona del MNT, pero tomando en cuenta la presencia de las abolladuras. Por consiguiente, La resistencia a la fatiga de los alabes con estos daños (en dos zonas) no va diferenciarse de la resistencia a la fatiga de los alabes con abolladuras en una zona - En la zona del MNT en dicho nodo de oscilaciones.

Se debe señalar, el método propuesto puede utilizarse efectivamente para la evaluación del nivel de peligrosidad no solamente de las abolladuras artificiales, sino también para los daños operacionales sin limitación, medidas y su carácter. Este permite objetivamente juzgar sobre la tolerancia o no tolerancia de unos u otros daños en dicha zona del alabe durante sus oscilaciones según cualquier modo.

Una elección racional de la profundidad inicial h_1 en las zonas de acción de las tensiones locales σ_M para un valor conocido de la profundidad tolerada h_M en la zona del MNT permite reducir el número de alabes ensayados. Para evaluar h_1 de los daños

en los bordes del alabe durante una carga cíclica se utiliza el parámetro de intensidad en la tensiones [19], que desde el punto de vista físico es función de la tensión y de la longitud del recorte [20]. Considerando al alabe una plancha o lámina delgada de espesor limitado (2B) y de longitud L con dos recortes lineales de una profundidad h_H y h_M se puede escribir [21].

$$k = \sigma_M \sqrt{\pi h_H} f_H ; \quad (2.4)$$

$$k = \sigma_M \sqrt{\pi h_M} f_M ; \quad (2.5)$$

Donde f_H y f_M : son funciones de corrección que dependen de la profundidad relativa de los recortes y de la longitud L.

La función de la velocidad del crecimiento de las rajaduras por fatiga durante los ensayos respecto a los recortes h_H y h_M se describen por la ecuación de París que relaciona la velocidad de crecimiento de la rajadura con la variación del coeficiente de intensidad de las tensiones en los límites del ciclo $\Delta K = K_{max} - K_{min}$

$$\frac{dl_H}{dN_H} = C_{1H} (\Delta K)^2 \quad (2.6)$$

$$\frac{dl_M}{dN_M} = C_{1M} (\Delta K)^2 \quad (2.7)$$

Donde k_{max} y K_{min} : son los coeficiente de intensidad de las tensiones para una máxima y mínima carga respectivamente del ciclo; C_{1H} es la constante que depende de la carga y de la frecuencia; n es el exponente que para diferentes aleaciones varía desde 2 hasta 10. Durante ciclos alternativos (signo variable) el valor K_{min} no se toma en cuenta y $\Delta K = K_{max}$.

Ya que el proceso de desarrollo de las rajaduras por fatigas se analiza en los límites de un alabe entonces la parte derecha de las ecuaciones arriba descritas se pueden igualar. Entonces los criterios de evaluación del nivel de peligrosidad del daño ubicado en cualquier zona con un nivel de tensiones σ_M , que tienen una profundidad h_M se puede describir de la siguiente forma:

- Daño tolerado, si
$$\frac{dl_H}{dN_M} < \frac{dl_M}{dN_H}; \quad (2.8)$$

- Daño no tolerado, si
$$\frac{dl_H}{dN_M} > \frac{dl_M}{dN_H}; \quad (2.9)$$

- Daño máximo tolerado, si
$$\frac{dl_H}{dN_M} = \frac{dl_M}{dN_H}; \quad (2.10)$$

El último criterio muestra que las rajaduras principales por la fatiga se desarrollan simultáneamente desde los recortes h_M y h_H . De esto se puede escribir

$$\sigma_M = \sqrt{\pi h_M} \cdot f_M = \sigma_H \sqrt{\pi h_H} \cdot f_H \quad (2.11)$$

Tomando en cuenta que $\bar{\sigma} = \sigma_M / \sigma_H$, obtenemos

$$h_M = \left(\frac{1}{\bar{\sigma}}\right)^2 \cdot h_H \cdot \left(\frac{f_H}{f_M}\right)^2 \quad (2.12)$$

La ecuación obtenida nos permite determinar la profundidad del daño permitido en la zona de los bordes con un nivel relativo de tensiones $\bar{\sigma}$ mediante ensayos directos de fatiga de acuerdo a una determinada profundidad tolerada de las abolladuras en la zona MNT dicho modo potencialmente peligroso.

Los valores de las funciones de corrección se calculan según las fórmulas [21]

$$f_M = f\left(\frac{h_M}{B}\right) \cdot f\left(\frac{L}{B}\right) = \sqrt{\frac{2B}{\pi h_M}} \cdot \text{tg} \frac{\pi h_M}{2B} \cdot \sqrt{\frac{0.2B}{\pi h_M}} \cdot \text{sen} \frac{\pi h_M}{B} \quad (2.13)$$

$$f_H = f\left(\frac{h_H}{B}\right) \cdot f\left(\frac{L}{B}\right) = \sqrt{\frac{2B}{\pi h_H} \cdot \text{tg} \frac{\pi h_H}{2B}} \cdot \sqrt{\frac{0.2B}{\pi h_H} \cdot \frac{\text{sen} \frac{\pi h_H}{B}}{B}} \quad (2.14)$$

De estas ecuaciones, obtenemos

$$\left(\frac{f_H}{f_M}\right)^2 = \left(\frac{h_M}{h_H}\right)^2 \frac{\text{tg} \frac{\pi h_H}{2B}}{\text{tg} \frac{\pi h_M}{2B}} \cdot \frac{\text{sen} \frac{\pi h_H}{B}}{\text{sen} \frac{\pi h_M}{B}} \quad (2.15)$$

La mayoría de los daños operacionales tienen una medida "h" en la dirección de la cuerda de 0.5 ÷ 10 mm. La profundidad de los daños tolerados h_H en el CBP es del orden de 1 a 4 mm. El análisis de los valores $(f_H/f_M)^2$ muestra, que ellos para las medidas reales de los alabes es cerca de 1.0 por ejemplo para $B=68\text{mm}$, $h_H= 1\text{mm}$, $h_M= 10\text{mm}$ tenemos:

$$\left(\frac{f_H}{f_M}\right)^2 = \frac{10}{1} \cdot \frac{\text{tg} \frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot 68}}{\text{tg} \frac{\pi \cdot 10}{2 \cdot 68}} \cdot \frac{\text{sen} \frac{\pi \cdot 1}{68}}{\text{sen} \frac{\pi \cdot 10}{68}}$$

En la figura 2.21 se muestran las curvas de cálculo, contruidos de acuerdo a la ecuación (2.12) para tres valores de h_H cuando $(f_H/f_M)^2 = 1$. EL valor hallado h_M se considera como profundidad inicial del recorte durante los ensayos según el método de las roturas.

Los ensayos realizados de los alabes según los modos de las oscilaciones 3x2, 4x2, 4x1 (los resultados se muestran en la Fig. 2.18) conforman la posibilidad de una evaluación analítica de los daños permitidos en las zonas con diferentes niveles de las tensiones $\bar{\sigma}$. Durante esto los datos de cálculo prácticamente coinciden con los experimentos.

El esquema de los recortes en el alabe. Utilizado durante la deducción de la ecuación (2.12), se muestra en la figura 2.19.

3.3 Evaluación de la influencia del campo de las fuerzas centrífugas en las distribuciones de las tensiones vibratoriales durante la oscilaciones de los alabes.

La metodología elaborada arriba se destina para determinar las medidas toleradas de los daños en las condiciones de laboratorio en el alabe sin rotación. La precisión de la influencia del campo de las fuerzas centrífugas en la ubicación, el carácter y la magnitud de los máximos de las tensiones que determinan las zonas de las abolladuras toleradas se efectuó analíticamente en base de la metodología y programa de cálculo, desarrollado por Rudavietz V.A. (TSIAM) [22]. Para resolver este problema se utiliza el método de Ritz. Durante esto el alabe se considera como una envoltura delgada elástica abierta de torsión y curvatura variable, cuadrangular en el plano. Un extremo de la envoltura esta rígidamente fijada los otros extremos están libres. Se toman en cuenta las inclinaciones de la fijación y de la paleta del alabe en su periferia, el velamen, la no lineabilidad del alabeo a lo largo de la altura, la variación arbitraria de su espesor.

El análisis de las distribuciones obtenidas de las tensiones muestra que la posición de los máximos en el campo de las fuerzas centrífugas permanece prácticamente constante y se produce solamente una pequeña variación de su valor. Además las tensiones aumentan en la parte de la raíz de la paleta y en el estrados. Esta misma tendencia se muestra en la Fig. 2.20.

Más fuertemente influye las revoluciones en la distribución de las tensiones durante las oscilaciones del alabe según los primeros modos flexionales (Fig. 2.21), donde conservándose el carácter de la distribución de las tensiones y la posición de lo máximos se produce la reducción de la vibratensión absoluta. El tipo de fijación del alabe también no influye en su nivel.

CAPITULO 4: Investigación experimental de la resistencia dinámica de los alabes con daños.

4.1 Equipamiento y metodología de los ensayos de fatiga de alta frecuencia.

En la actualidad para la realización de los ensayos de fatiga de alta frecuencia de los alabes, con un nivel suficientemente alto de vibraciones electrodinámicas ampliamente usados para solución de problemas se utiliza los vibro bancos de aire del tipo KuAI-VV diseñados bajo la dirección de V.P. Ivanov [23]. Señalaremos que los vibrobancos similares se sirven de debido a la considerable caída de la excitación efectiva con el aumento de la frecuencia sobre los 3000 – 5000 Hz.

Para el problema investigado fue fabricado y modificado por Bielousov G.G. el vibro banco de aire [1], una de las modificaciones se ve en la Fig. 3.1.

Para medir las deformaciones relativas de los alabes durante los ensayos se utilizó el equipo tensométrico del tipo PTG-78-2a los mili voltímetros numéricos y de aguja B3-41 y B3-38 . la medición de la frecuencia de las oscilaciones naturales se efectuó con un medidor de frecuencia electrónica tipo T53-38. Un medidor de frecuencia similar se utilizó en calidad de contador de ciclos N durante los ensayos de fatiga. Para la excitación del alabe se utilizó un vibro banco de aire, equipado con un regulador de mantenimiento automático de las tensiones dinámicas MATD. La medición del valor de las tensiones en el alabe se efectuó con ayuda de un equipo registrador de las tensiones relativas (ERTR) diseñado especialmente para este fin. El equipo ERTR permite automáticamente preguntar y seleccionar el tensoresistor con el

máximo valor de las tensiones durante las oscilaciones del alabe según otro modo.

Más adelante considerando el máximo valor de la tensión del sensor seleccionado como 100%, se efectúa la medición del valor relativo de las tensiones en los otros sensores.

ERTR tienen una salida de un registrador de dos coordenadas que en el proceso del experimento dibuja la curva de distribución de las tensiones según las tensoristencias que tiene el alabe (hasta 100 unidades). Tomando en cuenta la fase de la oscilación con respecto al tensoresistor principal. El error de las mediciones de las tensiones relativas del equipo ETRT es de orden de menor de 2.5%

La distribución de las tensiones han sido obtenidas para los principales modos de las oscilaciones del alabe que tienen un interés práctico.

Para evitar los errores durante el experimento la frecuencia de resonancia en la cual se propone llevar a cabo la realización de los ensayos, se determina previamente (por ejemplo con ayuda de vibradores electrodinámicos o piezoeléctrico). La frecuencia dada de los ensayos se establece de antemano según escala del generador de sonido, pero si después de encender el suministro de aire la resonancia no se consigue, entonces se efectúa una busca de la frecuencia en el diapason supuesto Para obtener las tensiones máximas de resonancia haya el lugar de la mejor excitación en el alabe sintiendo su chorro pulsatorio de aire, utilizado un sistema de control remoto de desplazamiento del vibrador.

El nivel necesario de las tensiones de resonancia se consigue regulando la presión del aire delante de la Tobera del vibrador σ con el desplazamiento del vibrador con respecto al alabe en dirección longitudinal.

Como en el alabe actúa una fuerza que se diferencia del multiarmónico, entonces las resonancias puede provocarse por la acción de las armónicos superiores que puede ser fuente de error. Por esta razón durante el ajuste en la resonancia es indispensable observar la forma de la curva de variación de las tensiones en el tiempo y controlar la frecuencia de las tensiones en el tiempo y controlar la frecuencia de las oscilaciones del alabe ensayado.

Cuando se entra al régimen de los ensayos se efectúa un reajuste de la frecuencia, ya que con el aumento del nivel de las tensiones debido a las pequeñas no linealidades elásticas y no elásticas en el alabe la frecuencia de resonancia puede variar un poco.

Una especial atención se debe prestar a la rigidez de la fijación del alabe en el equipo, ya que alcanzar un alto nivel de las tensiones debido a la amortiguación de las oscilaciones llega a ser imposible. La amortiguación mucho más se manifiesta durante los modos flexurales de alta frecuencia de las oscilaciones (por ejemplo 3x1, 9x1, 5x1).

Con la finalidad de evaluar la influencia de las condiciones de fijación en el nivel de las tensiones de resonancia se efectúa una determinación experimental de los decrementos de las oscilaciones de los alabes según la formula:

$$\bar{\sigma} = \pi \cdot \frac{\Delta f_a}{f_p} \cdot \frac{a^2}{1 - \left(\frac{a}{ap}\right)^2} \quad (3.1)$$

Donde ap es el máximo valor de la amplitud de las oscilaciones en la resonancia; $\Delta f_a = f_a'' - f_a'$ ⇒ el ancho del pico de resonancia es igual a la diferencia de las frecuencias en las cuales la amplitud de las oscilaciones disminuye hasta un valor de "a" desde el máximo valor f_p es la frecuencia de la resonancia. Generalmente la diferencia de las frecuencias se determina para el valor $a=0.7ap$

En la Fig 3.2 se muestran las curvas típicas de resonancia de los alabes de aleaciones de aluminio y de acero en los diferentes modos de alta frecuencia.

Los experimentos realizados han mostrado que para unos valores del decremento para los alabes de acero de $\sigma > 0.015$ y de aluminio de $\sigma > 0.01$ alcanzar tensiones de resonancia altas durante los ensayos de fatiga sustancialmente se complica.

La cantidad necesaria de sensores resistencias, pegadas a un alabe se elige en función del problema a investigarse. El lugar de su ubicación en la paleta se determina según la curva de distribución de las tensiones durante las oscilaciones según dicho modo. Durante esto los sensores principales (según los cuales los alabes entran al régimen de los ensayos) deberán encontrarse en la zona del MNT. Los sensores de control se pegan en las zonas de las tensiones en 1.5-2 veces menores. Esto permite seguir al régimen de ensayos en caso de que se malogren las principales sensores resistencias.

4.2 Resistencia a la fatiga de los alabes durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia.

Del análisis de los resultados del tensometrado de los motores se deduce que durante las resonancias de los alabes según los modos de alta frecuencia, el nivel de las tensiones dinámicas puede ser lo suficientemente grande y provocar en ciertos casos (por ejemplo, ante la presencia de abolladuras en los bordes) a una rotura por fatiga. La evaluación de la resistencia a la fatiga de los alabes se efectúa de acuerdo a la metodología tradicional básicamente según el primer modo de las oscilaciones el cálculo de los factores locales de seguridad durante las oscilaciones según los modos altos se fundamenta también en base a los datos sobre el límite a la fatiga según este modo.

Durante los ensayos según el primer modo la frecuencia de las oscilaciones, no se toma en cuenta la localización del lugar de la rotura, condicionada por las particularidades de la distribución de las tensiones, el valor de los gradientes de las tensiones a lo largo de los bordes y en dirección de la cuerda no se consideran.

Como se mostró arriba una evaluación más fiable de la resistencia de los alabes con daños operacionales deberá basarse en la realización de los ensayos de alta frecuencia según aquellos modos de las oscilaciones que determinan la rotura por fatiga debido a las abolladuras en la operación.

Los ensayos de fatiga de alta frecuencia dan también una considerable ganancia en el tiempo, que permite efectuar evaluaciones operativas de los límites de fatiga de los alabes. Por ejemplo para el alabe elegido la frecuencia del primer modo es del orden de $f_p=112$ Hz, la frecuencia del modo potencialmente peligroso 3×2 , $f_p=2760$ Hz. La base de los ensayos es de 2×10^7 en el primer caso se efectúa en 50 horas, mientras que en el segundo ensayo se demora solamente en 2 horas.

Examinemos los resultados de la evaluación de la resistencia a la fatiga de los datos de los alabes nuevos y con cierto tiempo de operación según el modo 3×2 . Se obtuvo la distribución de las tensiones en los bordes, en el extremo y en el estrado para este modo de las oscilaciones (ver Cap. 2. Subcap. 2.1). Mediante ensayos de algunos cuantos alabes se precisó el sitio de la formación de la rajadura por fatiga. La frecuencia media de los ensayos fue del orden de $\bar{f} = 276$ Hz. Los resultados de los ensayos de fatiga se muestran en la tabla 3.1

Los puntos experimentales, colocados en las coordenadas semilogarítmicas, se agrupan como se ve de la Fig. 3.3. alrededor de la línea curva y por esta razón se excluye la probabilidad de utilizarla en calidad de ecuación de la curva de fatiga de la ecuación exponencial.

$$N = e^{C_1} - b_1 \sigma_{\max} \dots \dots \dots (3.2)$$

Por lo tanto en calidad de ecuación se considera a ecuación exponencial

$$N = a_1 \sigma_{\max}^{-m} \dots \dots \dots (3.3)$$

ó

$$\log N = a_1 - m \lg \sigma_{\max} \dots \dots \dots (3.4)$$

De esta manera como valor independiente en la ecuación de la línea empírica de la regresión, que evalúe la línea teórica.

$$Y = a + b (x - \bar{x}); \dots \dots \dots (3.5)$$

Donde Y- es la evaluación de la esperanza matemática condicional de la magnitud $y = \ln N$, consideramos al valor $x = \lg \sigma_{\max}$

La evaluación de los parámetros de la ecuación de la línea de la regresión lo efectuamos según las formulas, que se obtiene del método de los cuadrados mínimos [24].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (3.6)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \rightarrow b = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.8)$$

Donde m - es el número de niveles de las tensiones.

Para un pequeño volumen de los ensayos de fatiga ($n \leq 15 \dots 20$) se establece a la ecuación de la curva promedio de fatiga. Correspondiente a la probabilidad de rotura $P = 50\%$.

(TABLA 3.1)

Después de calcular los principales coeficientes la ecuación de la línea empírica de regresión tiene la forma:

$$Y = 14.755 - 3.747X \quad (3.9)$$

La línea de la regresión, que corresponde a la ecuación obtenida se muestra en la Fig. 3.3

Se efectuaron ensayos de fatiga según el modo 3x2 de los alabes que tenían un tiempo de vida operativo de hasta 3000 hrs.

(Tabla 3.3)

Los resultados de los ensayos de fatiga efectuados de los alabes con tiempo de vida operativo se muestran en la tabla 3.2

La ecuación de la línea empírica de la regresión en este caso tiene la siguiente forma:

$$Y = 13,665 - 3,483x \quad (3.10)$$

La curva promedio de la fatiga, construida según la ecuación hallada, se muestra en la figura 3.3

Con la finalidad de evaluar la resistencia de la fatiga de los alabes con tiempo operacional en otros modos, fueron realizados ensayos comparativos en la frecuencia de $f = 3800$ Hz (modo 4x2). Parte de los alabes tenían abolladuras operacionales en los bordes de ataque y de salida.

Los resultados del experimento se muestran en la tabla 3.5

(Tabla 3.5)

Como los datos obtenidos no son suficientes para efectuar el análisis regresivo, entonces las curvas de la fatiga en la figura 3.4 están hechas construidas por el método de interpolación gráfica.

A parte de esto aquí se reflejan los resultados de los ensayos anteriores y las curvas de fatiga de los alabes para los primeros modos de las oscilaciones según los datos del fabricante.

Fig. 3.2 y Fig. 3.3

Fig. 3.4, Fig. 3.5 y Fig. 3.6

De la comparación de las curvas de fatiga de la figura 3.4 y del análisis estadístico efectuado del experimento se deduce que la resistencia a la fatiga de los alabes durante las oscilaciones según diferentes modos no es igual. Debido a esto la evaluación de los factores de seguridad locales k_{vm} para aumentar la veracidad es preferible efectuar en base a los ensayos de los alabes durante las oscilaciones según los modos potencialmente peligrosos.

4.3 Determinación del valor tolerado de los daños de los alabes durante los oscilaciones según los modos potencialmente peligrosos.

Para comprobar el método desarrollado se efectuarán ensayos durante unas oscilaciones del alabe según el modo 3×2 4×2 . El análisis de las distribución de las tensiones durante la oscilaciones del alabe según el modo 3×2 muestra, que en la parte superior de la paleta se tiene tres zonas, donde $M=0.5$ H Dos zonas están ubicadas en el borde de ataque y uno en el de salida (ver figura 2.9). en el borde de salida a una distancia aproximadamente de 37 mm se encuentra el MNT, aquí durante los ensayos de los nuevos alabes se desarrollo la rajadura de fatiga.

El valor tolerado de las abolladuras se determina en las tres zonas señaladas. Las abolladuras artificiales se hicieron en los bordes según el método standard [13]. Durante esto se limitó la profundidad de los daños de 0.5 a 2.5 mm para un ángulo constante de abertura, y un radio de redondeo constante en el vértice ($z=0.1\text{mm}$ $\alpha=60^\circ$).

La secuencia de los ensayos se muestra en la Fig. 3.4

Todos los alabes se ensayaron en el nivel de control de las tensiones de $\sigma_H = 120$ MPa. Según tensoresistor principal hasta la aparición de la rajadura de fatiga en los concertadores hechos o en la zona del MNT.

Según el método expuesto en el subcapítulo 2.2 se determinó la profundidad límite tolerada de las abolladuras de una geometría dada y de un nivel dado deformación plástica del material en la zona de los concertadores.

La elaboración de los resultados de los ensayos se muestran en las tablas 3.6 y 3.7

En la Fig. 3.6 se han construido curvas que caracterizan la distribución de la profundidad tolerada de los daños en los bordes del alabe para dicho modo de las oscilaciones. El aumento del radio en el vértice de las abolladuras hasta de 1.5 mm ha permitido aumentar la profundidad tolerada de los daños de hasta 3.5 mm.

El intento de establecer una profundidad límite de los daños en las zonas de las paletas con tensiones $\sigma_M \approx 0$ terminó sin éxito. Como han mostrado los ensayos de los alabes con diferentes abolladuras en estas zonas, aquí pueden haber abolladuras operacionales toleradas con una profundidad de hasta 8÷12 mm. Durante esto la resistencia del alabe se va a determinar por su resistencia a la fatiga local en la zona del MNT, o sea en el borde de fuga, donde se desarrolla la rajadura por fatiga durante los ensayos.

Tabla 3.6 y Tabla 3.7

Se ha establecido también, que en los límites de todas las zonas donde se ha determinado el valor tolerado de los daños el número de las abolladuras operacionales pueden corresponder a su número máximo observado en la práctica (5-6 unidades en alabe), pero bajo la condición que la profundidad de cada abolladura no supere el límite permitido para su ubicación dada. Existen normas que limitan el número de un alabe (se permite como regla general, no más de dos abolladuras en la paleta).

De esta manera los experimentos efectuados confirman la posibilidad de la evaluación del nivel de peligro de los daños mecánicos de los alabes de los compresores durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia y de la determinación en base a esto, de acuerdo a la metodología propuesta, del valor tolerado de las abolladuras.

Para obtener suficientemente exactas evaluaciones de las características estadísticas \bar{h} y Sh es indispensable el cumplimiento de la condición $0.5 Sh < d < 25h$ [18]. En dicho caso $d = 0.1 \text{ mm}$ $Sh = 0.102 \text{ mm}$ o sea se cumple la desigualdad. Durante la determinación de la desviación media cuadrática Sh según la fórmula (2.3) es indispensable también que valores del primer sumando entre paréntesis conductos sea no inferior a 0.3 (se obtuvo durante los cálculos el valor de 0.6).

El mínimo valor de cálculo de la profundidad tolerada del daño para una probabilidad de $P = 0.9986$ ($V_p = 3$) durante los cálculos según los parámetros \bar{h} y Sh es

$$h_{\text{calc}} = \bar{h} - V_p Sh = 2.05 - 3 \cdot 0.102 = 1.744 \text{ mm}$$

De manera similar se determina la profundidad tolerada de los daños en cualquier zona con tensiones locales desde $0.2\sigma_H$ hasta $0.9\sigma_H$.

4.4 Resistencia a la fatiga de los alabes reparados.

La eliminación de daños operacionales es una de las operaciones tecnológicas, que permite considerablemente reducir la concentración de las tensiones y producto de esto restablecer la resistencia de los alabes a las tensiones cíclicas [25]. Como objetos de los ensayos sirvieron los alabes de los compresores de aleaciones de acero. Según el primer y segundo modo flexionales.

Los ensayos de los alabes con abolladuras reparadas también se efectuaron en las compañías fabricantes y en los institutos de investigación respectivos.

La realización de la investigación posibilitan hacer la deducción que la reparación (eliminación) de las abolladuras prácticamente restablece la resistencia a la fatiga de los alabes, durante sus oscilaciones según modos de alta frecuencia no se estudio.

En el trabajo [26] se efectuaron ensayos de los alabes según el modo 3x2 con abolladuras eliminadas, ubicados en las zonas de acción de las tensiones locales según la curva de su distribución de hasta $0.7\sigma_H$. En todos los casos las fisuras por fatiga en los alabes se desarrollaron en las zonas del MNT, condicionado por el modo dado oscilación (Fig. 3.7) han confirmado la posibilidad de la reparación (eliminación) de las abolladuras en el mantenimiento y reparación si es que ellos se encuentran en las zonas de hasta 0.7, ... $0.8 \sigma_H$.

CAPITULO 5: Particularidades de la rotura de los alabes de los compresores durante las oscilaciones de alta frecuencia.

5.1 Influencia de los modos de las oscilaciones en el proceso de la rotura de los alabes.

Como se ha demostrado, cada modo específico de las oscilaciones responde completamente una determinada distribución de las tensiones con uno o algunos cuantos MNT, que determinan la zona de la rotura local de los alabes móviles de los compresores. En la Fig. 4.1 se muestran aquellas zonas para ciertos modos de las oscilaciones de los alabes de aluminio y de acero. A pesar a la considerable diferencia en las medidas de los alabes y también en la construcción de la fijación, la ubicación relativa de las zonas de rotura para muchos modos que son de interés desde el punto de vista de excitación en el diapasón de las RPM de trabajo prácticamente es idéntica. La dispersión Observada de la ubicación de las rajaduras por fatiga en estas zonas durante los ensayos de los alabes se puede explicar por la influencia de los factores tecnológicos en estas zonas y por la naturaleza estadística de la rotura de la fatiga y para los alabes durante las oscilaciones según modo iguales la ubicación del MNT prácticamente no varía (Fig, 4.3) por lo visto en la medida de las zonas ejerce una gran influencia las gradientes de las tensiones, que determinan los volúmenes del alabe deformado durante sus oscilaciones según uno u otro modo. Durante esto la máxima incertidumbre del lugar de formación de las rajaduras por fatiga se observó según los primeros modos de las oscilaciones (Fig. 4.2) ya que el campo de las tensiones es más homogéneas.

Durante las oscilaciones de los alabes según los modos de alta frecuencia 2×2 , 2×3 , 4×2 , 1×3 , 2×3 las zonas de formación de las rajaduras por fatiga son más estrechas (Fig. 4.1)

Debido a esto para una más exacta medición del nivel de las máximas tensiones durante las oscilaciones de los alabes según uno u otro modo es indispensable en la zona de la supuesta

rotura pegar unos cuantos tensoresistores (3-5 unid.), que permite obtener valores más confiables.

Durante las oscilaciones de los álabes según modos más complejos (3x2, 4x2) el carácter del desarrollo de las fisuras de fatiga, sustancialmente varía debido a los grandes gradientes de las tensiones en la zona del MNT no solamente a lo largo de los bordes, sino también en dirección del crecimiento de la rajadura. El esquema en la Fig. 4.4 explica estas diferencias. De esta manera el factor determinante que provoca el detenimiento de las rajaduras por fatiga en los álabes durante sus oscilaciones según los modos de alta frecuencia es el valor de la tensión cerca de la zona de MNT. Esta particularidad del detenimiento de las rajaduras se puede comprobar durante los ensayos de los álabes del compresor según los modos laminares de las oscilaciones que tienen los MNT en la punta. Durante esta oscilación las rajaduras desde la punta pueden alcanzar una longitud de 10 mm., no desarrollándose más al continuar la acción de la carga cíclica.

Ya que en el dispasón de trabajo de las revoluciones de los álabes de una etapa dada pueden ser detectados algunos cuantos modos de las oscilaciones con un nivel incrementado de las tensiones vibracionales entonces es indispensable conocer el carácter de desarrollo de la rajadura de fatiga durante el ensayo secuencial de los álabes según dos o más modos.

Debido a esto fue comprobado experimentalmente la posibilidad de la obtención de la rotura de un álabe según algunos cuantos modos de las oscilaciones. El álabe se ensayó en un nivel de control de las tensiones superior, a su límite a la fatiga con una base de $2 \cdot 10^7$ ciclos hasta la aparición de la rajadura de fatiga de una longitud de 5...8 mm. Después de esto el álabe se le alejó de la resonancia del modo dado y se le ajustó a la resonancia según otro modo de oscilaciones. En ambos casos se mantuvo la igualdad de las tensiones en las zonas de los máximos nominales.

Se estableció que la rotura de un alabe según dos modos es posible cuando la rajadura previamente formada se encuentra en una zona de las tensiones según el nuevo modo 2-3 veces inferiores que en la zona del MNT. Por ejemplo, en los experimentos se consiguió obtener la rajadura de fatiga en el alabe según el modo 3x2 y más adelante según el modo 4x1 (Fig 4.5).

Si se ensaya el alabe con una rajadura en el borde de ataque o de salida (en los modos 3x2, 4x1) según el modo 1x3, entonces la rajadura previamente obtenida continúa desarrollándose, bruscamente cambiando de dirección (Fig 4.6a) de acuerdo con el campo de las tensiones. Lo mismo sucede con la rajadura en la punta según los modos 3x2 o 4x1 (Fig. 4.6b).

5.2 Influencia de los daños y sus ubicaciones en el proceso de rotura.

De acuerdo con la concepción existente de la mecánica de la rotura los defectos con fisuras semejantes a los cuales se les puede relacionar la mayoría de los daños operacionales, reducen la resistencia a la fatiga de las piezas, lo que se toma en cuenta durante los cálculos a la resistencia con la introducción del coeficiente efectivo de concentración K_o

Durante la realización de los ensayos de fatiga de los alabes con abolladuras artificiales y operacionales en los experimentos para la elaboración de la metodología de la determinación de los daños tolerados se midieron no solamente los niveles de las tensiones la frecuencia de resonancia de los alabes y la cantidad de alabes hasta la rotura.

Sino también la variación de la frecuencia después de la aparición de las fisuras y durante su subsiguiente desarrollo. Se determinó la variación del número de ciclos inclusive hasta llegar a formar macrorrajaduras de una longitud de 8...11mm o de su detenimiento.

En todos los casos de estudio la influencia de los daños en la cinética de la rotura, ubicados en la tercera parte superior de la paleta de los alabes en las zonas con niveles de las tensiones actuantes de $\sigma_M = 0; 0.5\sigma_H$ y en la zona del MNT.

Los ensayos de los alabes con diferentes abolladuras tanto según sus medidas como por su carácter y ubicados en los bordes en las zonas con bajas tensiones mostraron que la presencia de los daños en estas zonas no conlleva a la reducción de la resistencia de la fatiga de los alabes. Aquí pueden ser tolerados cualquier tipo de abolladuras que se encuentran durante la operación ya que la resistencia de alabes dañados va a determinarse por su resistencia local en la zona del MNT y no en la de la zona de los concertadores. La investigación de las zonas en los alabes con tensiones locales de $\sigma_M = (0.15 \div 0.4) \sigma_H$ según la curva de distribución de las tensiones muestra la existencia de un nivel mínimo de las tensiones (cerca de $0.3\sigma_H$), en el cual se puede determinar las medidas toleradas de las abolladuras \bar{h} y r según la metodología elaborada. El alabe con abolladuras ubicadas en las zonas con tensiones locales $0 < \sigma_M < 0.3\sigma_H$ que oscila según algún tipo de modo, llega a ser algo así como insensible a los concertadores. Por consiguiente el valor límite del coeficiente de concentración de los daños puede considerarse igual a tres. La consideración de esto nos da la posibilidad de sustancialmente aumentar las normas sobre los daños para un valor exacto de los nodos potencialmente peligrosos de las oscilaciones para dicha etapa.

Esta establecido que en las zonas en el alabe con $\sigma_M=(0.4.....0.8)$ σ_H el proceso de rotura depende de las medidas de los daños del valor absoluto de las tensiones durante los ensayos y del nivel de las tensiones en las regiones, que rodean dichos zonas. Para unos tamaños de los daños, inferiores a los tolerados por la presente metodología, la formación y el desarrollo de la rajadura de fatiga se produce en la zona del MNT. Si los tamaños de los daños supera el crítico entonces el desarrollo subsiguiente de la fisura de fatiga formada en la zona del concentrador depende del nivel de las tensiones en el frente del daño. En caso de que el vértice de la rajadura se encuentre en la región de las tensiones, inferiores a las tensiones en el sitio de su origen la velocidad del crecimiento de la cajadura disminuye. Durante el movimiento de la rajadura desde el concentrador a la región de grandes tensiones se produce el aumento de la velocidad de su crecimiento.

En la figura 4.7 a,b en las zonas I, II se observó el detenimiento de las fisuras, ya que las zonas I, II están rodeadas por regiones con reducidas tensiones, mientras que en la zona III la rajadura se desarrollo hasta un valor crítico ya que la zona II es una región de tensiones aumentadas.

Si el daño se encuentra como se muestra en la Fig. 4.8 cerca al borde o a la punta, entonces la rotura comienza en la zona del concentrador y la fisura de fatiga se mueve en dirección del borde de la punta y del cuerpo del alabe. Sin embargo el desarrollo de las rajaduras desde estas abolladuras se efectúa sustancialmente más lento que desde los defectos, que se encuentran directamente en los bordes.

En los alabes, que tienen deformaciones de los bordes del tipo mostrado en la Fig. 4.9, la formación de las rajaduras por fatiga se produce desde los términos de los daños.

Las particularidades descritas se pueden observar según las curvas de la variación de las frecuencia naturales de los alabes en

el proceso de su rotura en las diferentes zonas de la paleta según los modos de alta frecuencia de las oscilaciones. En la Fig. 4.10, 4.11 se muestran las curvas típicas, obtenidas como resultado de los ensayos de los alabes según el modo 3x2. En la izquierda sobre la curva el número indica el nivel de las tensiones medida en la zona del máximo nominal, el número entre paréntesis es la longitud de la fisura por fatiga en milímetros, junto se señala el número del alabe.

Las curvas 47, 51, 89 caracterizan el proceso de rotura de los alabes con abolladuras que tienen un radio en el vértice de 1.5 mm y que están ubicados en la zona de las tensiones cerca de $0.5\sigma_H$. Durante esto el vértice de la rajadura en desarrollo se aleja a la región de tensiones más altas. Las curvas 59, 60 corresponden al desarrollo de las fisuras en las zonas del MNT, mientras que las curvas 58, 63-65 se obtuvieron durante una rotura simultánea de los alabes en la zona de los concertadores y del MNT.

De las figuras 4.10, 4.11 se deduce que la formación de las rajaduras de fatiga debido a las abolladuras en los alabes durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia se produce en las etapas tempranas de la carga cíclica, pero el propio proceso subsiguiente de su desarrollo hasta el tamaño crítica es del orden del 40-50% y no más del N_p .

5.3 Influencia del nivel de las tensiones en la rotura por fatiga de los alabes.

Está establecido, que durante los ensayos de los alabes según la metodología descrita con la finalidad de determinar el valor tolerado de los daños en una u otra zona de la paleta del alabe es indispensable tomar en cuenta el nivel de las tensiones en la zona de su MNT en el modo dado.

La magnitud de las tensiones señalados generalmente se considera en calidad de valor de control medido con ayuda de las tensoresistencias en esta zona y sirve para una evaluación aproximada de las tensiones en la zona de las abolladuras artificiales y operacionales.

Los experimentos con alabes de aleación de aluminio que tenían iguales abolladuras según su magnitud, carácter y ubicación y ensayados de acuerdo un modo de oscilaciones pero, en bajos y altos niveles de tensiones (100 MPa y 160 MPa respectivamente) mostraron una fuerte dependencia del nivel de peligrosidad de los daños respecto al valor de estas tensiones (Fig. 4.12). Se determinó que el aumento de las tensiones durante los ensayos con la finalidad de forzarlo y de recortar el tiempo de los experimentos provoca el desarrollo de la fisura por fatiga en la zona condicionada por el modo de las oscilaciones. El ensayo de los alabes en un nivel bajo de tensiones hace mas probable la formación de la rajadura debido al concentrador.

El ensayo de los alabes en un nivel bajo de tensiones conlleva a que en el vértice del defecto el material trabaje en la región elástica que provoca la formación de la rajadura en la zona del concentrador. Durante el aumento de las tensiones cerca al vértice de la abolladura aparecen deformaciones plásticas el nivel de las tensiones se determina por la distribución elástica plástica y llega a ser aproximadamente igual a las tensiones en la zona de su máximo nomina. Debido a esto es probable la formación de las fisuras de fatiga en dos zonas en el alabe. Una continuación del aumento del nivel de las tensiones aun más aumentará la zona plástica en el vértice y el coeficiente efectivo de la concentración se reduce. En este caso la fisura por fatiga se origina en la zona del MNT (Fig. 4-13)

La influencia de la asimetría del ciclo R y la componente estática de las tensiones σ_m , por acción de las fuerzas centrífugas en el proceso de rotura de los alabes no está investigado. Tomando en cuenta el pequeño valor de σ_m en la tercera parte superior de la paleta del alabe, donde básicamente se produce la formación de las rajaduras por fatiga durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia, se le puede probablemente despreciar. Sin embargo en caso de que sea necesario las máximas tensiones pueden ser determinadas como $\sigma_a = \sigma_H + \sigma_m$.

Debido a esto, para evitar errores en la determinación del nivel de peligrosidad de los daños de los alabes; los ensayos deben ser efectuados con unas tensiones superiores al límite de la fatiga base recomendadas en los documentos reguladores ($\sigma_{-1} < \sigma_H < 0.3\sigma$). Una considerable reducción de la duración en la realización de los ensayos de la fatiga se consigue no forzando el nivel de las tensiones sino con el aumento de la frecuencia de los ensayos (en 10 – 25 veces).

5.4 Análisis de la rotura vibracional de los alabes durante la operación.

Como se sabe los factores de seguridad de los alabes de los compresores para las tensiones cíclicas están rígidamente reguladas por las normas respectivas en función al régimen de funcionamiento del motor y el tipo de avión [12, 13]. Los valores del factor de seguridad se establecen en base a la práctica de diseño puesta a punto y operación de las máquinas y se refleja en los cálculos.

Debido al perfeccionamiento de la tecnología de fabricación de las estructuras al aumento de la veracidad de los cálculos aparecen fundamentos para la selección de factores más bajos.

Para los alabes de los compresores esto se aplica en la introducción de normas más amplias para las abolladuras. La

medición de las tensiones vibracionales con un alto grado de veracidad en un motor en funcionamiento es un problema técnico difícil. Por esta razón hay posibilidad de errores en la determinación de los factores de seguridad reales.

La ubicación de las zonas de la rotura por fatiga de dos alabes diferentes durante las oscilaciones según modos iguales prácticamente coincide (Fig. 4.14). De esto se puede con la suficiente veracidad según el lugar de la formación de las rajaduras por fatiga en los alabes de los compresores en funcionamiento juzgar sobre el modo de las oscilaciones, responsable por dicha rotura.

En la Fig. 4.15 se muestran cuatro alabes de los compresores de diferentes tipos de motores que tenían rotura por fatiga durante su operación. El sitio de desarrollo de las rajaduras se señalan en la paleta con líneas delgadas. A pesar de las iguales distribuciones de las abolladuras en los bordes del alabe que debería ejercer una misma influencia en las zonas de formación de las rajaduras se tiene una localización clara de las zonas de roturas. De esta manera, el culpable de la aparición de las fisuras y de su subsiguiente desarrollo son básicamente los modos de alta frecuencia de las oscilaciones específicas para cada alabe.

Se ve que el más sobrecargado es el alabe, representado en la Fig. 4.17 que tiene la mayor cantidad de posibles modos de oscilaciones, responsables por la rotura.

Fig. del 4.1 al 4.15

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- ▶ Se halló la distribución de los daños según las etapas de compresor.
- ▶ Se obtuvo la distribución de los daños a lo largo de la altura y del perfil en los álabes, móviles del compresor.
- ▶ Se determinaron los datos reales sobre la cantidad permitida y abolladuras en el álabe móvil.
- ▶ Se generalizó los datos según los tamaños de los defectos, obtenidos por los álabes durante la operación.
- ▶ Se desarrolló una clasificación de los defectos típicos de los álabes móviles del compresor.
- ▶ La mayoría de las abolladuras se encuentran en las secciones periféricas de los Alabes en la tercera parte superior de la paleta del álabe, se encuentra hasta el 80-90% de todos los daños.
- ▶ Todas las abolladuras se ubican en los bordes de ataque y de salida y también en el intrados de los álabes.
- ▶ Las abolladuras muy rara vez se ubican en el extrados.
- ▶ La distribución de las abolladuras alrededor del perfil del álabe para diferentes tipos de los compresores son: 22-25% en el borde de salida, 7-14%, en el borde de salida; 34-68% en el intrados.
- ▶ El principal tipo de abolladura son las abolladuras suaves (más del 70%) sin arrancamientos, sin protuberancia pasante.
- ▶ La ubicación de los daños operacionales superior de los álabes lo hacen potencialmente peligrosos durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia.
- ▶ Como resultado de toda investigación de la capacidad operativa de los álabes móviles del compresor con daños operacionales se estableció que en una serie de casos las normas de certificación de los álabes pueden ser ampliados, lo que permite reducir el número de desmontajes prematuros del motor de la operación.

- ▶ Se ha desarrollado una metodología destinada para determinar las dimensiones permitidas de los daños en las condiciones del laboratorio de fábrica en un álabe sin rotación.
- ▶ La ubicación de lo máximo en los campos de las fuerzas centrífugas prácticamente permanecen constante, y se produce solamente un insignificante (1-5%), variación de su magnitud.
- ▶ Para una comprobación experimental de la metodología desarrollada se utilizó el equipo del "MATI", y se desarrolló ensayos a los álabes móviles del compresor de los motores AI-20 y D-30.
- ▶ Como resultado de los ensayos realizados se estableció que:
 - Para dicho tipo de ensayos de los álabes del compresor, considerando las formas mas características de los daños operacionales, las más peligrosas son las oscilaciones según los modos de 3x2 y 4x2.
 - El aumento del radio en el vértice de las abolladuras permite aumentar la profundidad tolerada del daño (para $r \leq 1.5$ mm hasta 3.5 mm.).
 - En los límites de todas las zonas donde se determinó la magnitud permitida de los daños el número de abolladuras operacionales pueden corresponder para los álabes ensayados a 5-6 unidades por álabe bajo la condición de que la profundidad de abolladura no supere el valor límite permitido hallado. Se debe notar que según las normas existentes y número de abolladuras en un álabe permitido es como regla general no más en la paleta.

De esta manera, los ensayos realizados confirman la posibilidad de evaluar el nivel de peligro de los daños mecánicos de los álabes utilizando la Metodología desarrollada en esta Tesis para determinar la magnitud permitida de abolladura durante las oscilaciones según los Modos Potencialmente Peligrosos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - Investigación de la influencia de los daños operacionales de los álabes de los compresores de los motores de turbinas de gas (MTG) en su resistencia dinámica, Bielousov C.G. Moscú 1981.
- [2] - Estructuras cinemáticas del flujo en las tomas del aire de los mts. de aviación v.a. riga, trabajos RK II GA edición 232 1972.
- [3] - Los factores de operación y de diseño que determinan la intensidad del daño del MTR por objetos extraños Sansón V.A. Conjunto, Operación y reparación de equipos de Aviación RIGA 1972.
- [4] - Investigación de la condición de los álabes de los rotores de
- [5] los compresores de Alta presión y baja presión de la planta
- [6] de poder del avión YAK-40 Seriegin N.A. Moscú 1975 partes
- [7] 1,2,3,4.
- [8] - Investigación y clasificación de las fallas típicas de los álabes del
- [9] compresor de los motores de turbina de gas de aviación. Bielousov
- [10] G.C, Sieregin NA. y otros Moscú Trabajos MATI 1977-1978.
- [11] Partes 1,2,3,4.
- [12] - Estándar Regional 1100870-77 álabes de MTG métodos de Investigación sobre fatiga M:T SIAM 1978.
- [13] - Estándar Regional 100304-79 Alabes de MTG normado de los daños de los álabes de los compresores por absorción de objetos extraños M.TSIAM 1978.
- [14] - Investigación de influencia de los daños operacionales en la resistencia dinámica de los álabes de los MTG Ivanov V.P.M. 1977.
- [15] - Recomendaciones metodología para determinar las normas sobre los daños operacionales tolerando de los compresores de los MTG Moscú Edición Gosniga 1980.

- [16] - Investigación experimental de la resistencia de Vibración de los álabes móviles y de los vanos direccionales del compresor de los MTG de Aviación Edición GUSNIIGA 1966.
- [17] - Sobre la Pregunta acerca de la determinación de los modos y de las frecuencias naturales de las oscilaciones de los álabes de las turbomáquinas IVANOV V.P. STIPANENKO N.D. BYSHEV edición KYAIENI9 1,965.
- [18] - Procesamiento Estadístico del resultado de pruebas mecánicas Stiepanov M.N. Moscú 1973.
- [19] - Desarrollo de las grietas por fatiga en los materiales y en los estructurales GEFERME-KRAMARENKO O.Y. Fillatov M:Y KIEV Naukadumka 1980.
- [20] - Velocidad de crecimiento de las grietas y la resistencia a la fatiga del metal Shrolinek L:M Moscú Metalurgia 1973.
- [21] - Resistencia de elementos de la estructura a la rotura frágil MAJUTOV N.A: Moscú 1973.
- [22] - Cálculo de las frecuencias y de los modos naturales de las oscilaciones tridimensionales de los álabes de los compresores Rudaviets V.A. SHOFREE. Teoría de las envolturas y placas Moscú Naka 1973.
- [23] - Vibrabancos de aire IVANOV V.P. Ky, AI 1965.
- [24] - Fatiga de las aleaciones estructurales livianos Stipnov N.M. Giantsiunov ED.V. Moscú Mastino Estroyause 1973.
- [25] - Influencia del trabajo operacional en la resistencia a la fatiga de los álabes móviles de los compresores axiales de los MTG de aviación TITOV FMV en el juego de tomos: Explotación y Confiabilidad RIGA 1972.
- [26] - Influencia de las abolladuras y de los trabajos de eliminación en los resultados de experimentos de fatiga de los álabes móviles del compresor Seregin NA y otros N. MATI 1978.

TABLA 3.1

**RESULTADOS DE LA PRUEBA DE FATIGA DE ALABES NUEVOS
SEGÚN EL MODO 3X2**

Nº De Orden	Nº De Alabe	f Hz	σ_{H1} MP _a	N $\times 10^{-5}$	Nº De Orden	Nº De Alabe	f Hz	σ_H MP _a	N _x $\times 10^{-5}$
1	57	2761	90	200	10	65	2777	145	70
2	51	2766	95	200	11	41	2761	151	100
3	-	2742	102	200	12	43	2770	155	200
4	58	2741	106	200	13	45	2761	158	8.5
5	59	2783	110	200	14	-	2741	165	45
6	62	2762	120	200	15	46	2802	190	10
7	44	2778	132	89	16	67	2755	225	4.8
8	-	2762	138	70	17	42	2786	238	10
9	66	2760	138	35					

TABLA 3.3

RESULTADOS DE LA PRUEBAS DE FATIGA DE LOS ALABES QUE TIENEN UN TRABAJO OPERACIONAL

Nº De Orden	Nº De Alabe	f Hz	σ_H MP _a	N x10 ⁻⁵	Nº De Orden	Nº De Alabe	F Hz	σ_H MP _a	N _x x10 ⁻⁵
1	23	2760	106	200	11	14	2790	157	5,0
2	--	2760	110	200	12	36	2806	160	6,0
3	26	2760	111	120	13	25	2749	169	15,0
4	--	2760	118	6.5	14	28	2760	169	7.0
5	29	2780	120	22	15	34	2756	177	13,0
6	32	2762	120	15	16	8	2725	180	6,5
7	30	2770	131	9,2	17	33	2766	196	60
8	35	2797	133	12,5	18	22	2802	223	3,2
9	87	2768	135	28,0	19	24	2772	225	17.0
10	20	2775	154	2,5	20	27	2777	235	3.0

TABLA 3.5

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FATIGA DE LOS ALABES CON UN TRABAJO OPERACIONAL SEGÚN EL MODO 4X2.

Nº De Orden	Nº De Alabe	f ₁ Hz	σ _{H1} MP _a	N _x x10 ⁻⁵	Nº De Orden	Nº De Alabe	f ₁ Hz	σ _H MP _a	N _x x10 ⁻⁵
1	70	3815	90	200	12	--	3813	165	16
2	71	3818	90	200	13	--	3814	166	50
3	83	3832	90	200	14	72	3850	120	31
4	--	3806	90	200	15	74	3765	120	66
5	--	3835	137	35	16	77	3709	102	22
6	84	3834	90	200	17	79	3834	90	60
7	--	3831	126	18	18	--	3807	157	10
8	85	3824	100	320	19	81	3758	90	10
9	--	3820	133	200	20	80	3785	100	51
10	82	3775	100	256	21	76	3835	120	30
11	--	3800	135	30	22	75	3786	117	42

TABLA 3.6

RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE LOS ALABES SEGÚN EL METODO DE ROTURAS

$h,$ mm	Numero de Alabes con Rajaduras en la Zona G_m y en la Zona G_H	Nº de Alabes con Rajaduras en la Zona G_m	Nº Total de Alabes
1,8	3	0	3
1,9	7	0	7
2,0	10	3	13
2,1	7	4	11
2,2	0	3	3
Σ	27	10	37

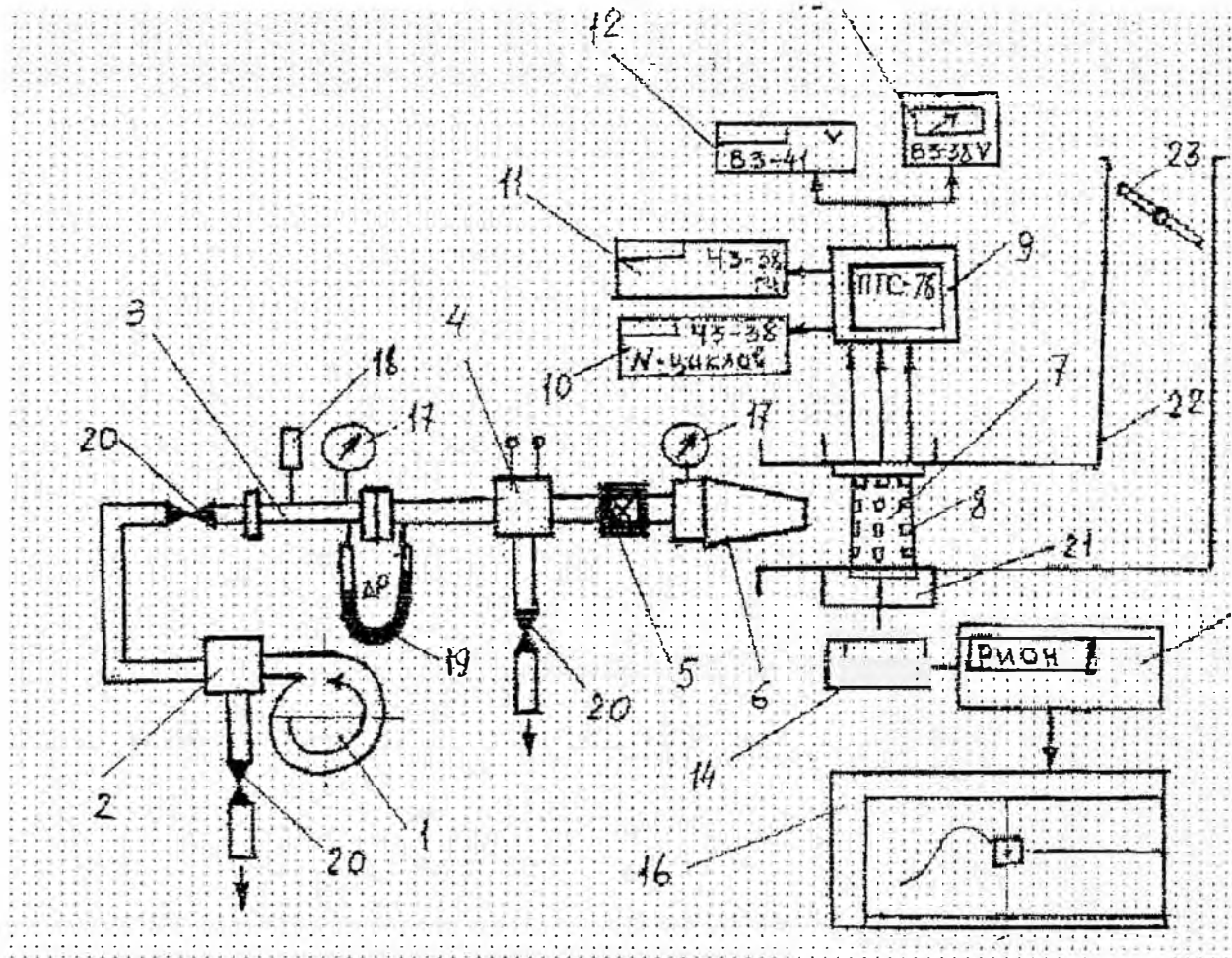
TABLA 3.7

DETERMINACION DEL VALOR MEDIO Y DE LA DESVIACION
MEDIA CUADRATICA DE LA PROFUNDIDAD TOLERADA
DEL DAÑO.

\bar{l}	\bar{l}^2	$N_{\bar{l}}$	$\bar{l}N_{\bar{l}}$	$\bar{l}^2n_{\bar{l}}$
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
2	4	3	6	12
3	9	4	12	36
4	16	3	12	48
	Σ	10	30	96

$$\bar{h} = 2.05 \text{ mm.};$$

$$S_h = 0,102 \text{ mm.}$$



ESQUEMAS DEL BANCO PARA LA PRUEBA DE ALABES

1. COMPRESOR
2. FILTRO
3. SEGMENTO DE MEDICION DE GASTO
4. VALVULA ELECTRONEUMATICA
5. LLAVE PARA LA REGULACION DEL GASTO DE AIRE
6. TOBERA DEL VIBRADOR
7. ALABE PROBADO
8. SENSORES DE TENSION
9. EQUIPO TENSOMETRICO
10. MEDIDOR DE CICLOS
11. MEDIDOR DE LA FRECUENCIA DE LAS OSCILACIONES NATURALES
12. MILIVOLTIMETRO NUMERICO
13. MILIVOLTIMETRO DE AGUJA
14. VIBRADOR (PIESO ELECTRICO, ELECTRO DINAMICO)
15. EQUIPO DE REGISTRO DE TENSIONES DE RELATIVAS RION
16. REGISTRADOR DE DOS COORDENADAS
17. MANOMETRO
18. TERMOMETRO
19. MANOMETRO DIFERENCIAL
20. LLAVE
21. DISPOSITIVO DE FIJACION DEL ALABE
22. COLECTOR DE ESCAPE
23. VALVULA DE ESTRANGULACION

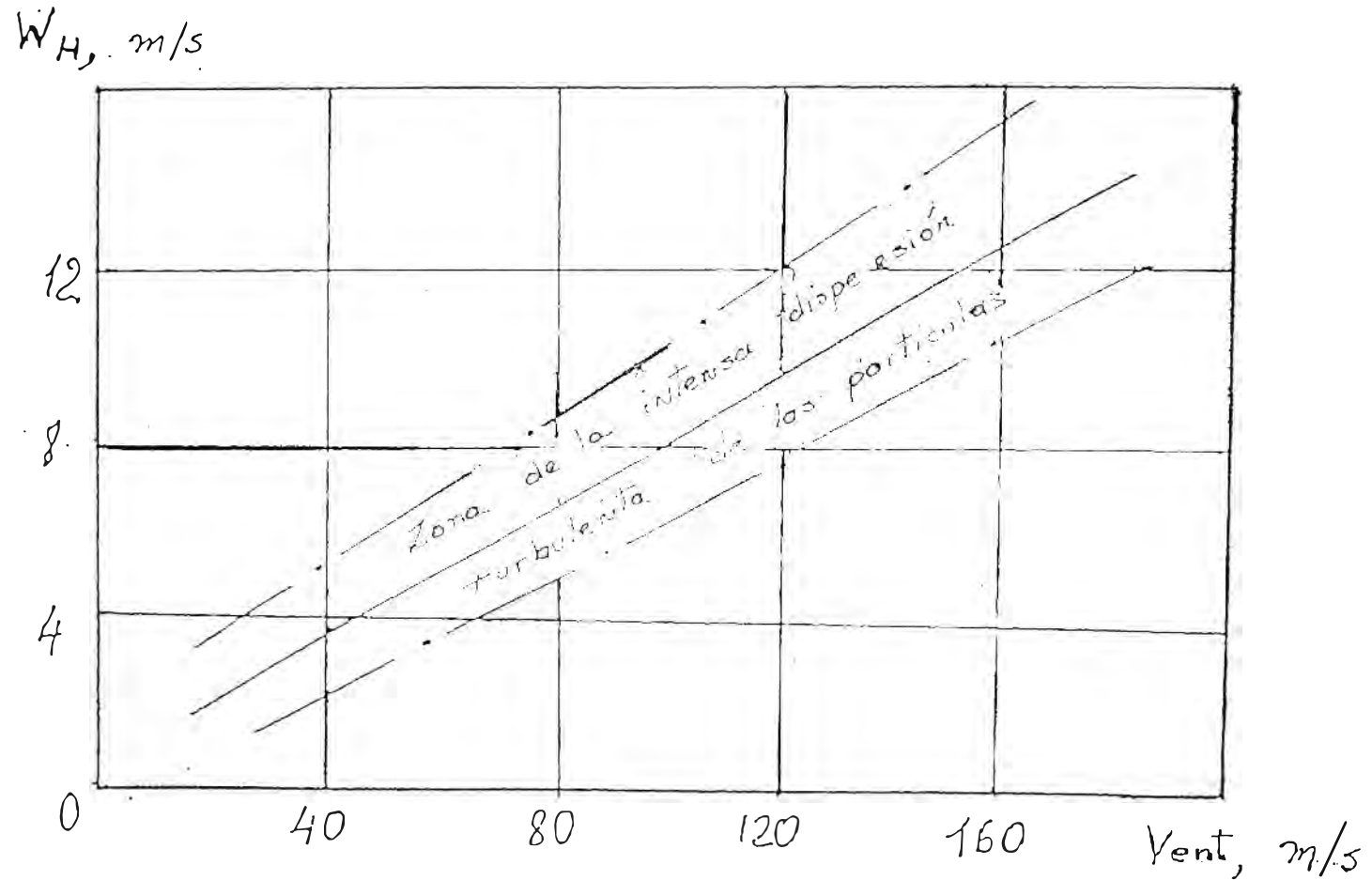


Fig. 1.1 Relación entre la velocidad del flujo en la entrada de la toma de aire V_{ent} . y del Componente lateral de la velocidad del viento W_H .

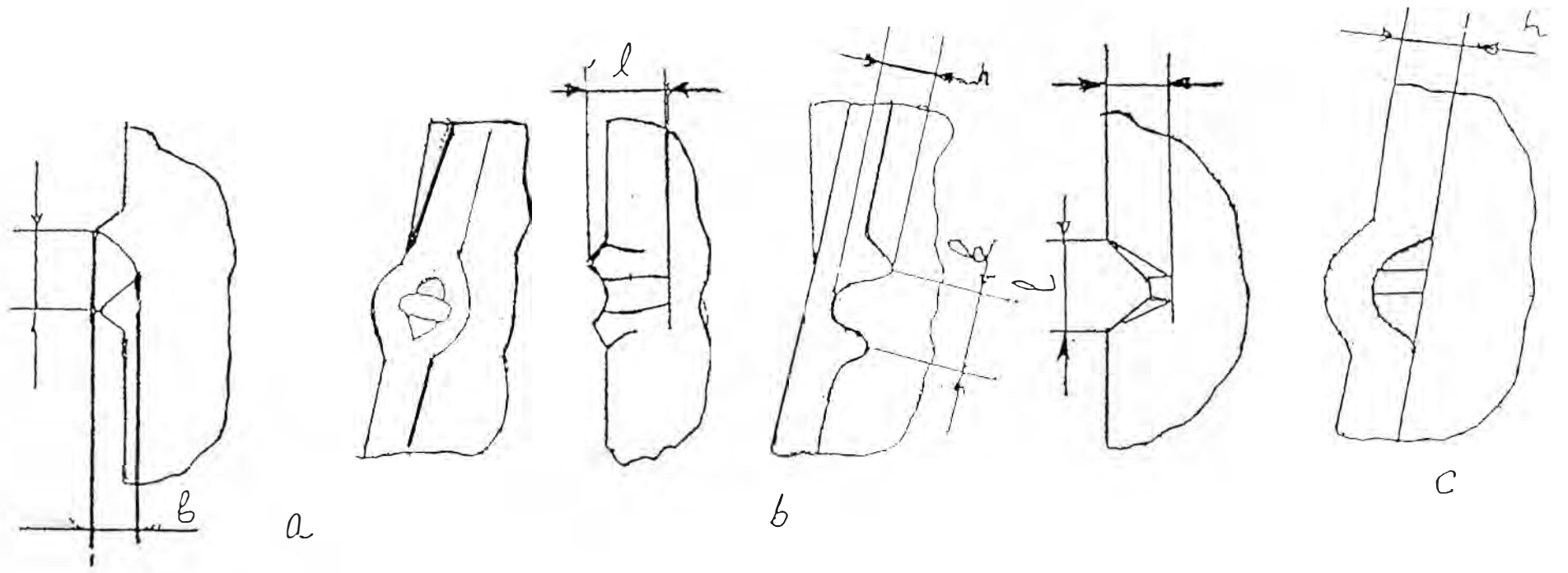
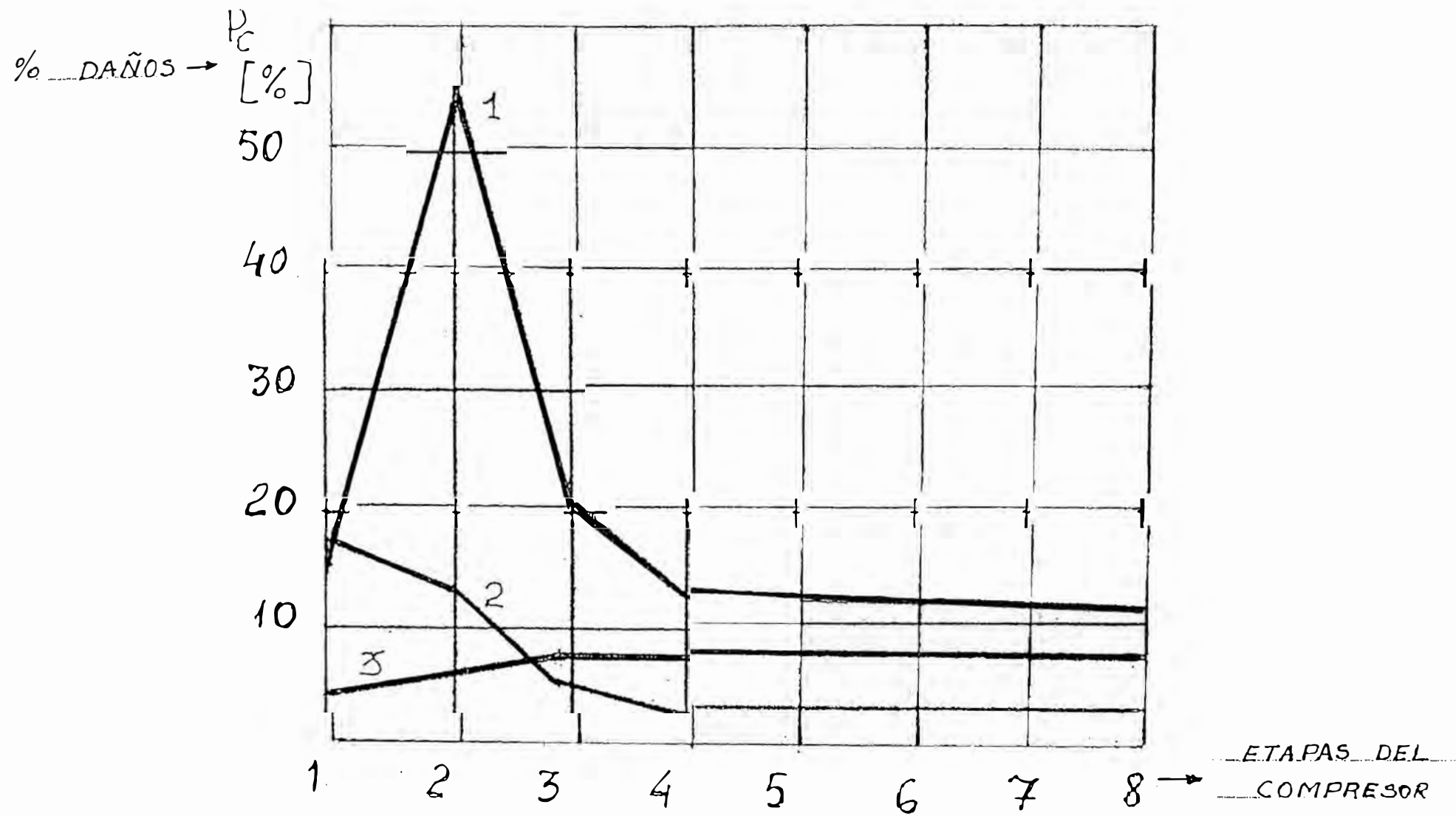


Fig. 1.2 Tipos de abolladuras y su medición.



PC
DAÑO → [%]

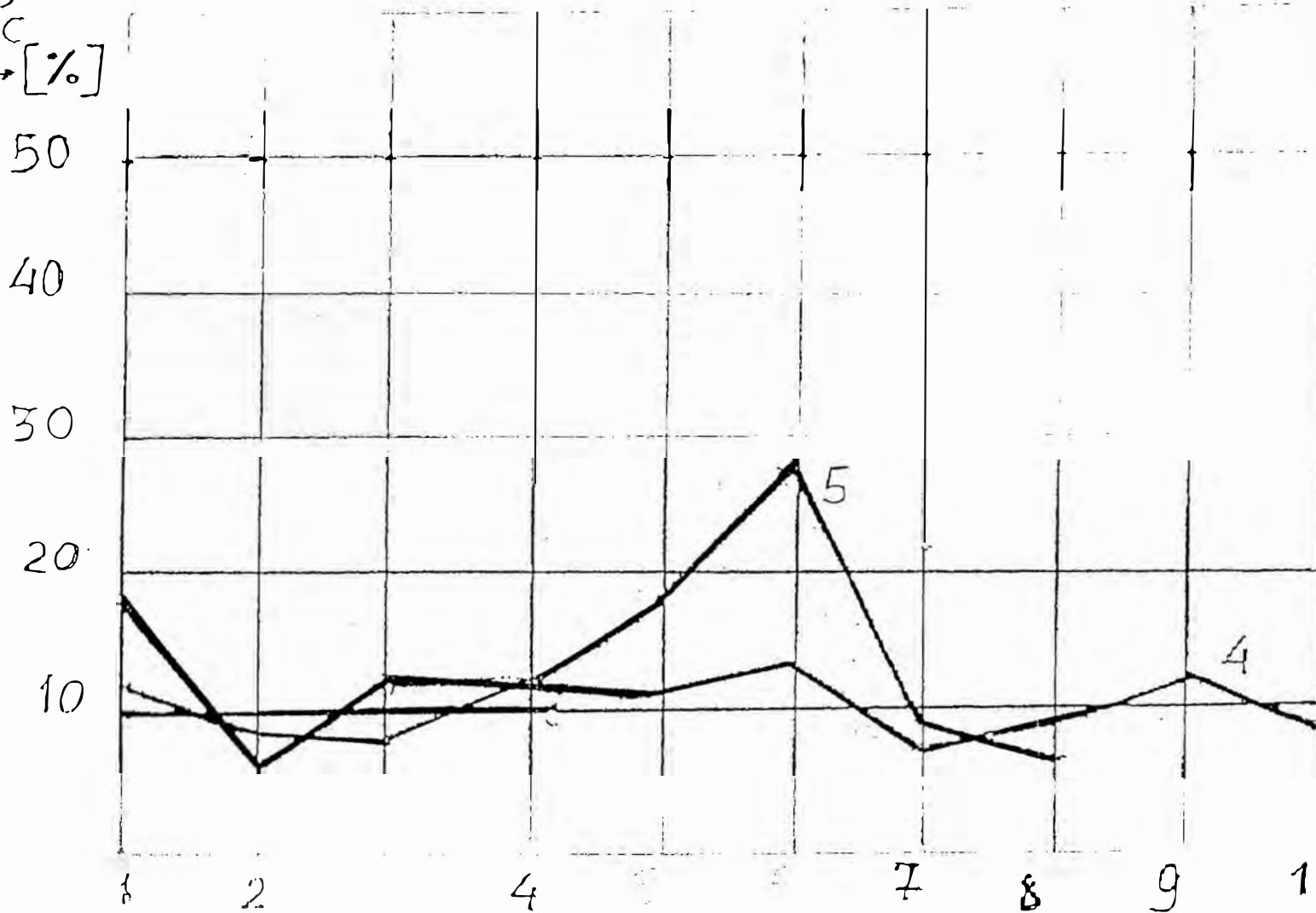
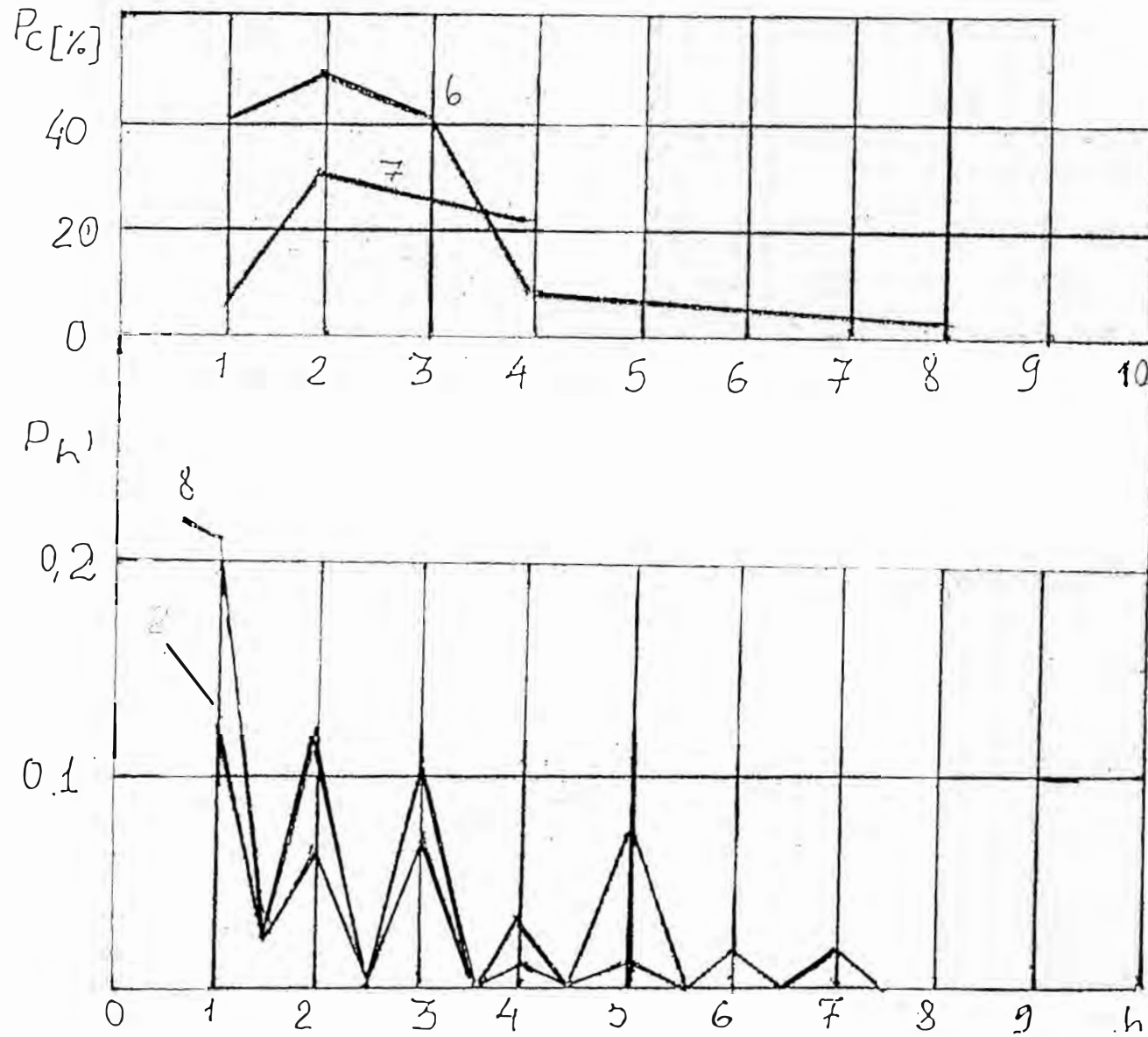


Fig. 1.3

Daños de los
compresores
Mtg de tipos
Diferentes por etapas
I. Motor tipo I
II Motor tipo II
3. Motor III tipo
4. AI - 20 K
5. RD - 3M - 500

10 → ETAPAS DEL
COMPRESOR

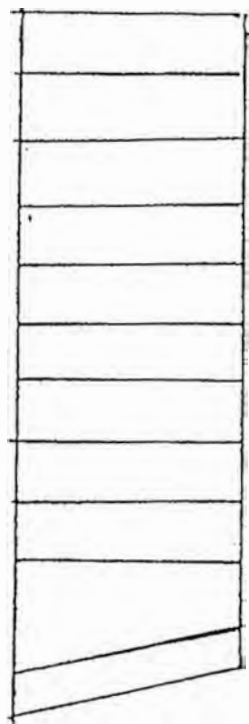


6. AI-25

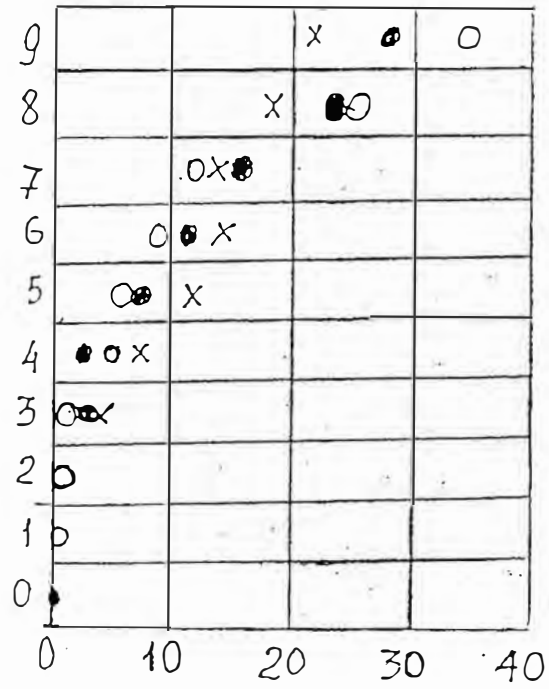
7. D-30

Fig. 1.4 Distribucion de las abolladuras según la profundidad en función del número de la etapa para los motores RD-3M - 500, las etapas 2 - 8 desmontados antes de tiempo.

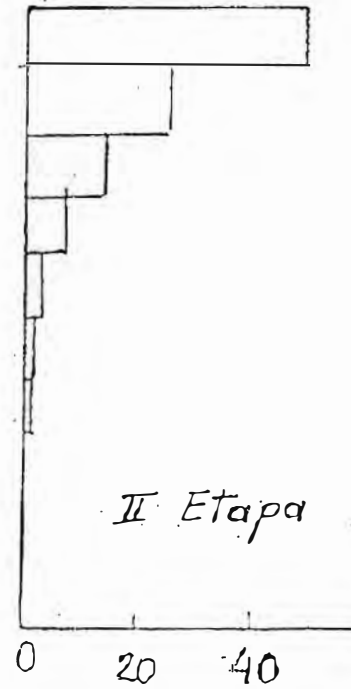
SECCIONES



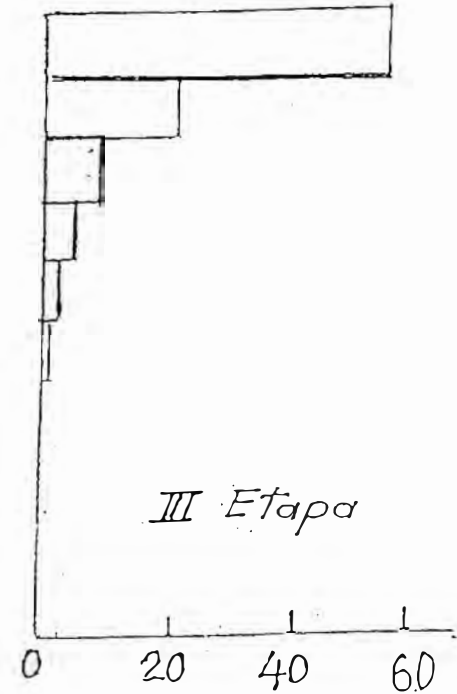
↑
ALABE



Cantidad de abolladuras en %



II Etapa



III Etapa

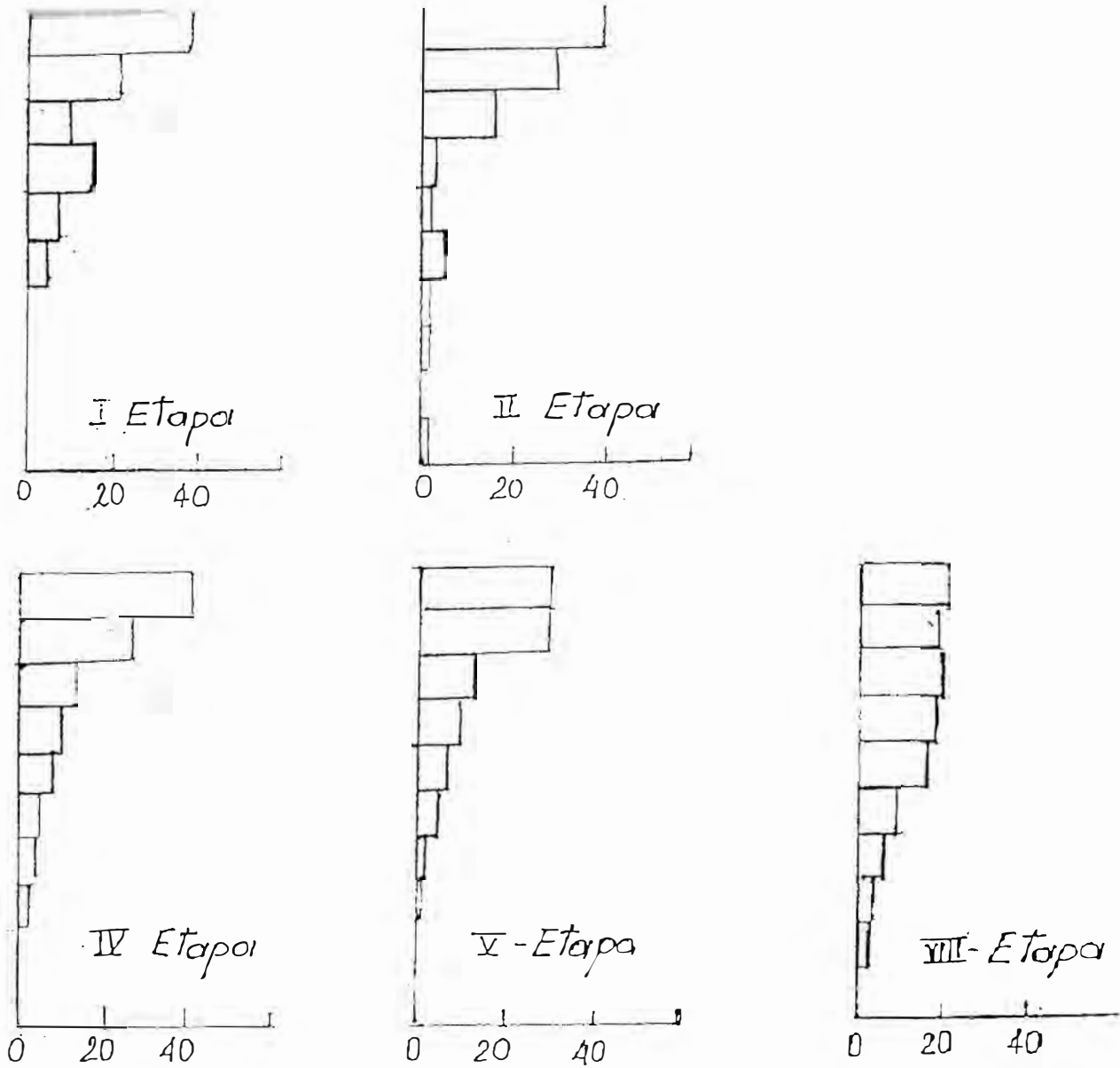
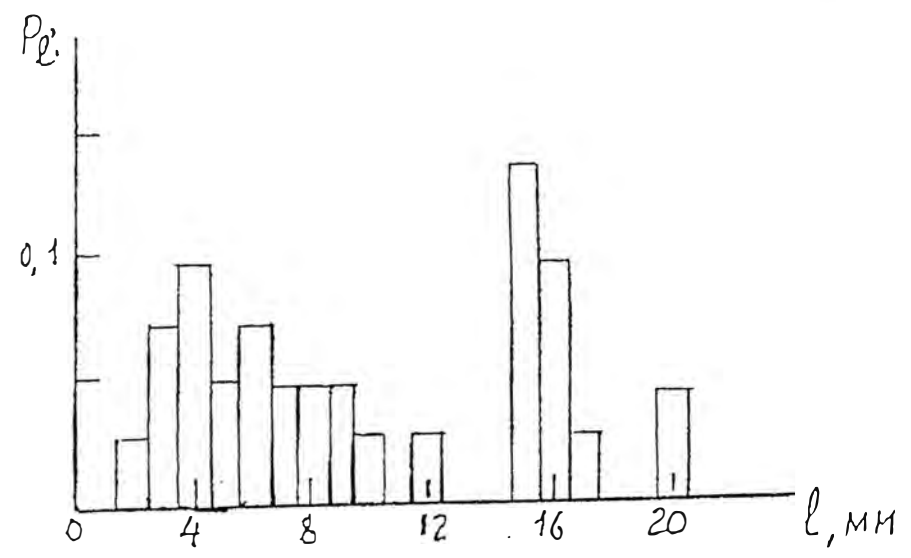
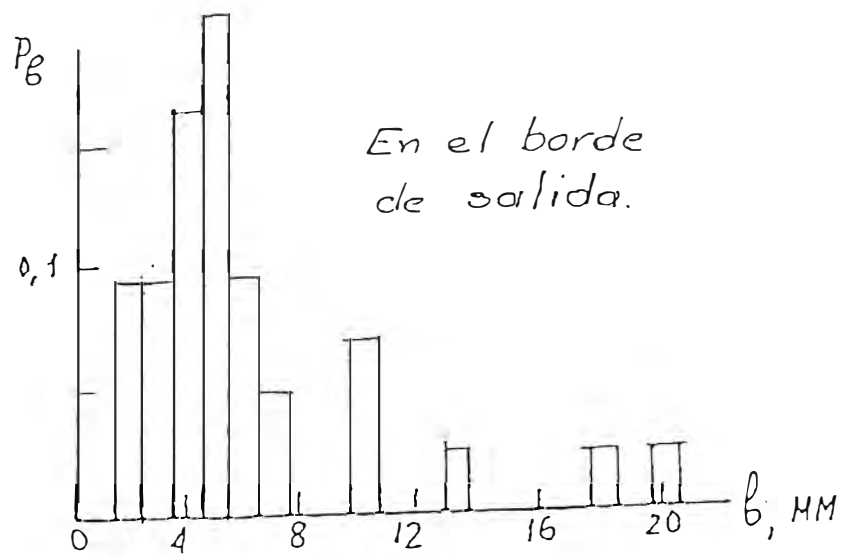
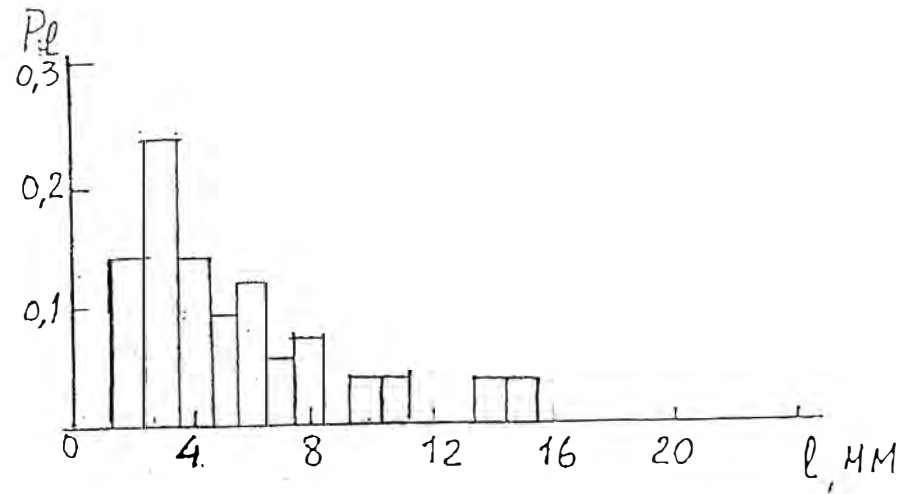
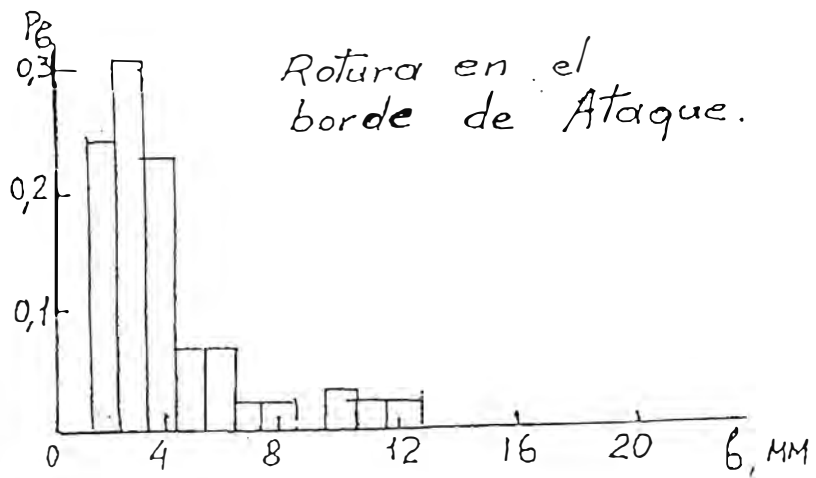
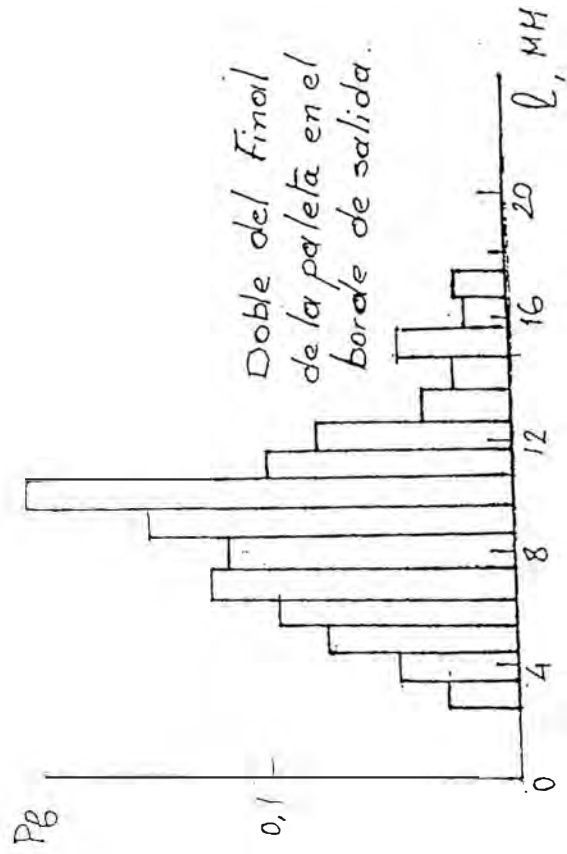
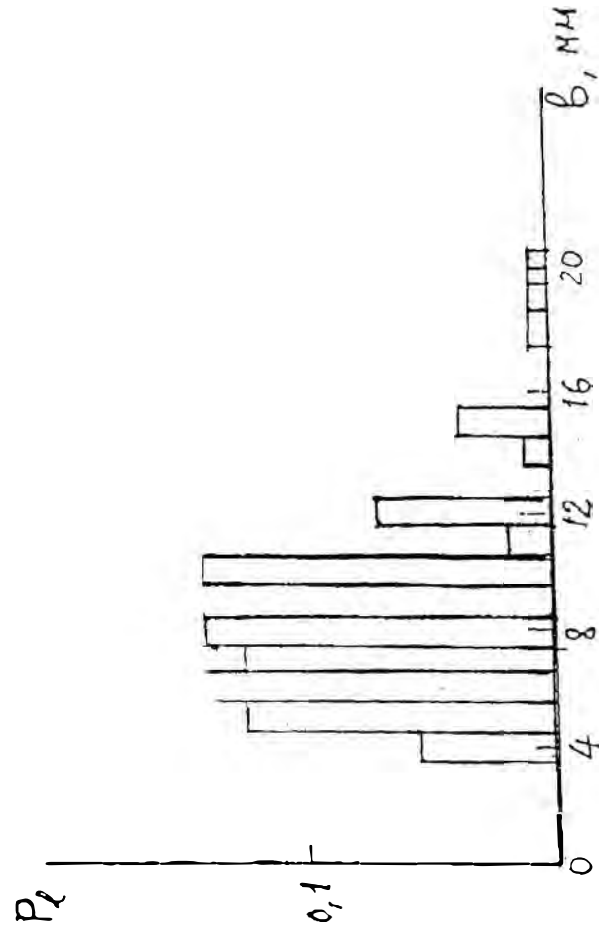


Fig. 1.5 Distribución de las abolladuras operacionales a lo largo de la altura del álabe.





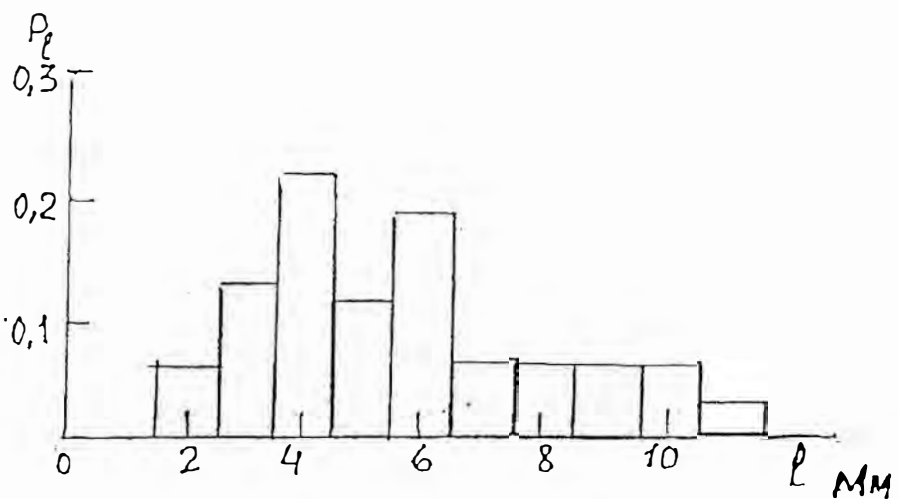
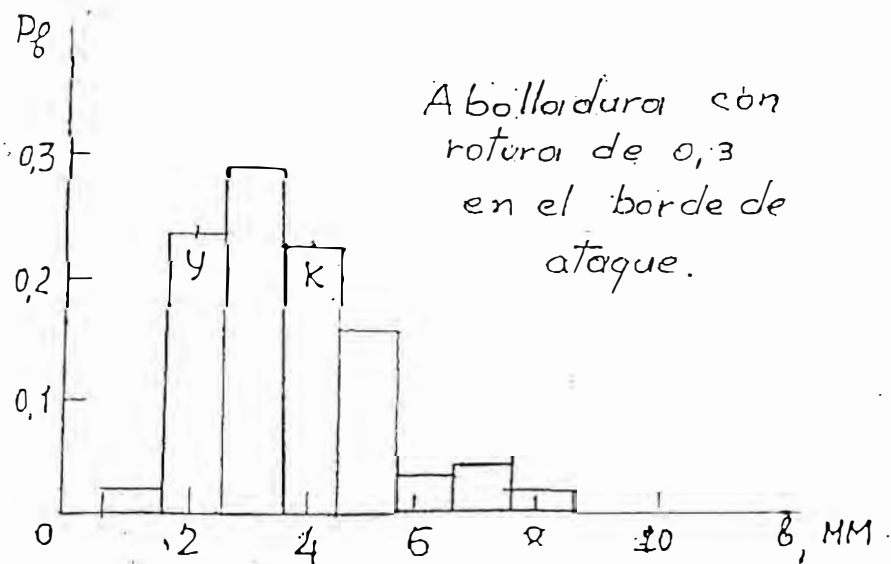
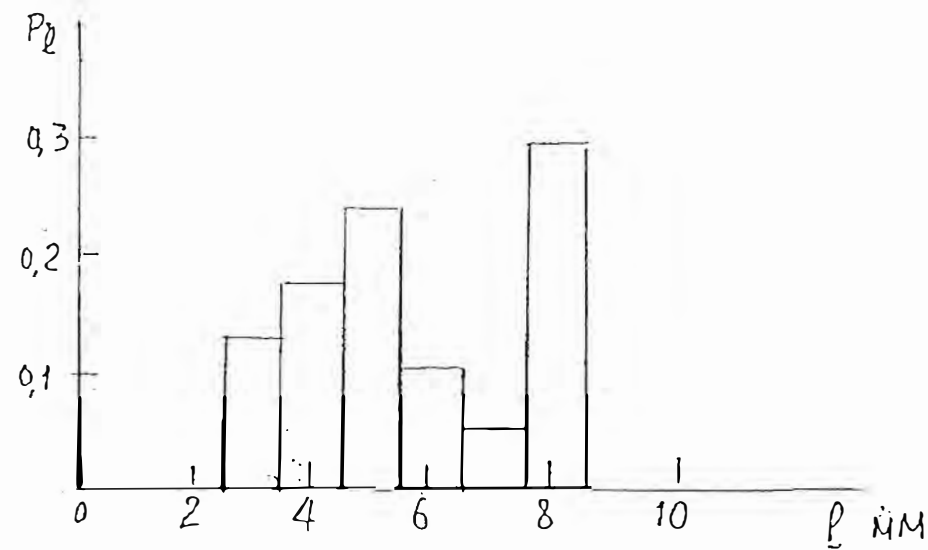
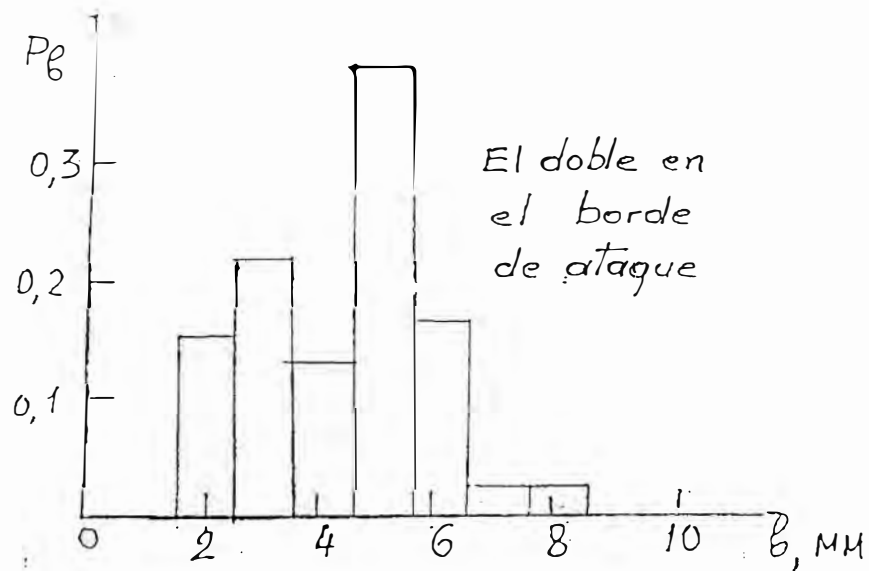


Fig. 1.6 Histogramas de las distribuciones de la longitud de las abolladuras "l" en los bordes v. de la profundidad "b".

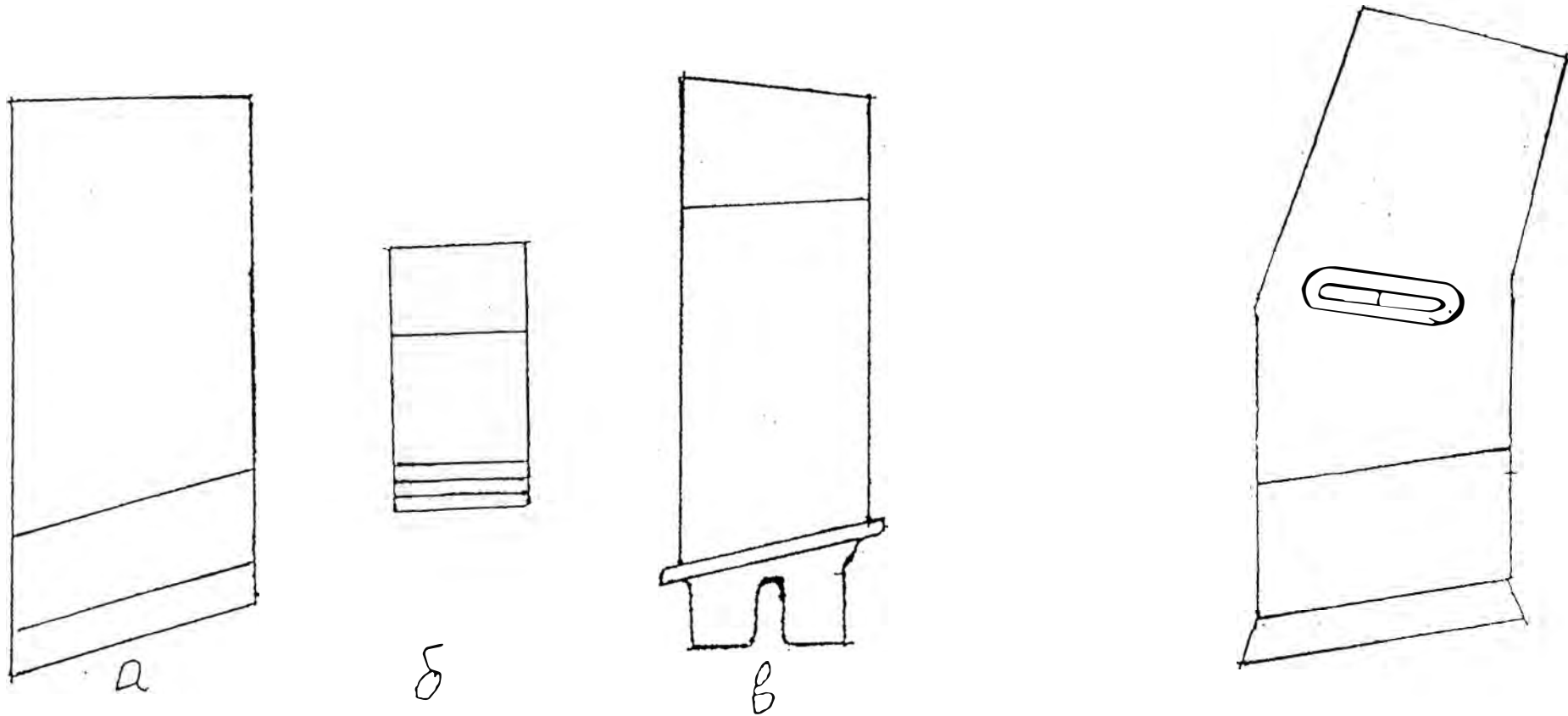


Fig. 1.7

Fig. 1.7 Zonas en las paletas de los álabes en los cuales las abolladuras no se permitan: a. RP - 3M - 500, Etapa : B - T58 - GE - 8B y etapas B - D - 30, II etapa; 6 - NKB I Etapa.

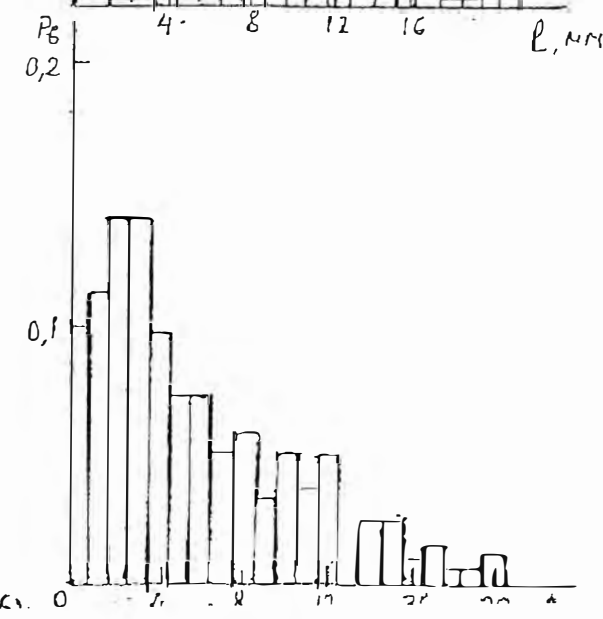
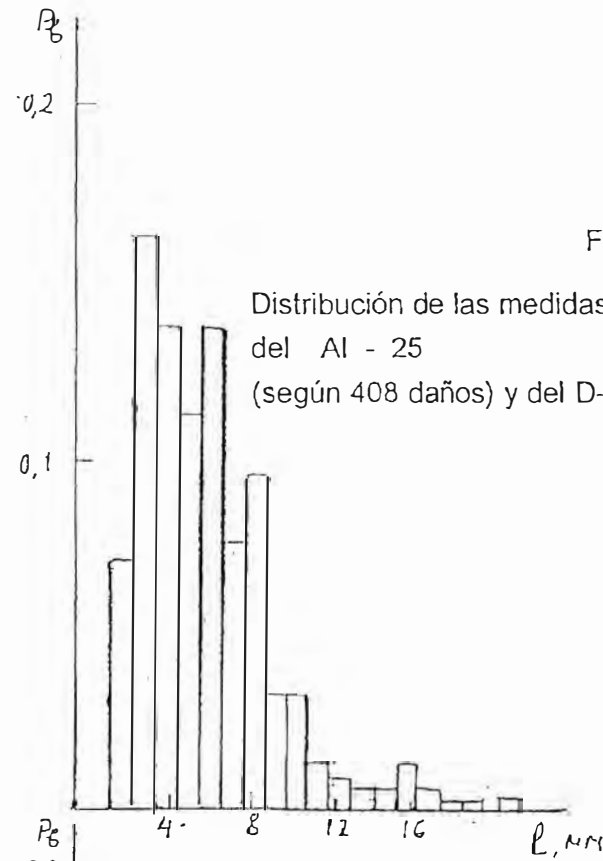
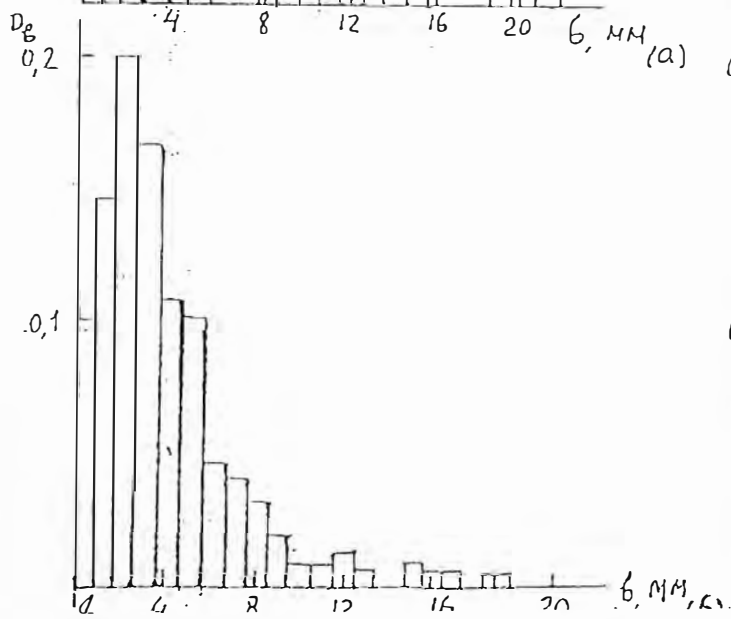
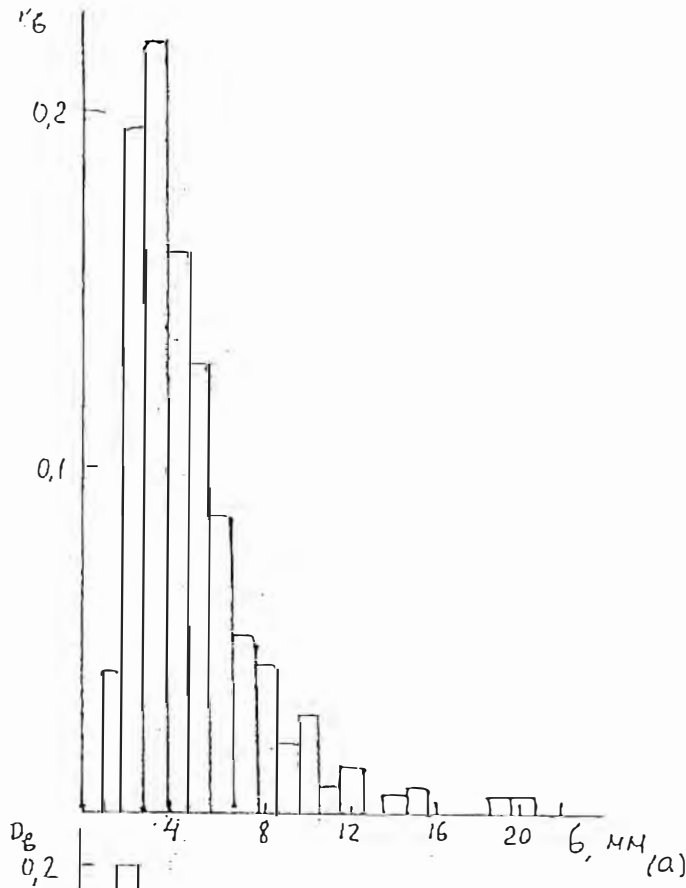




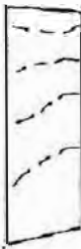





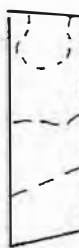






Fig. 1.8

Distribución de las medidas "a" y "b" de los diarios operativos del AI - 25 (según 408 daños) y del D-30 (Según 321 fallas).

$n \backslash m$	1	2	3	4	5
1	 112	 543	 1206	 2171	 3469
2	 701	 1727	 2765	 3812	 4835
3	 5000	 6289	 7646	 8867	 10251

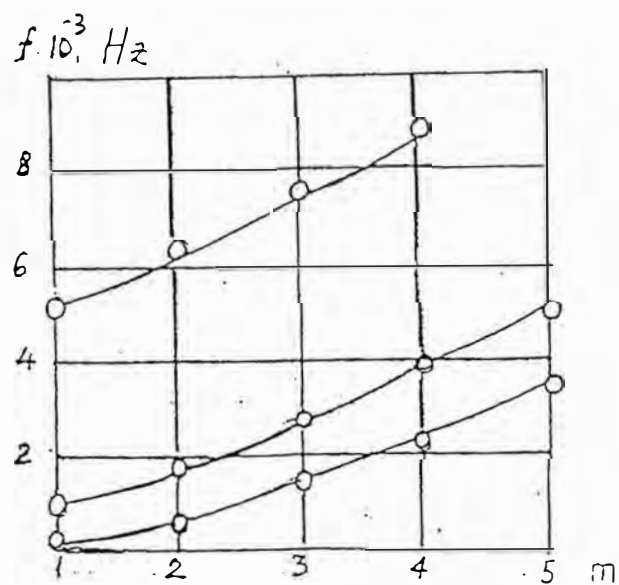


Fig. 2.1 Espectros de los modos y de las frecuencia naturales del álabe de la II Etapa del ventilador del motor D -30.

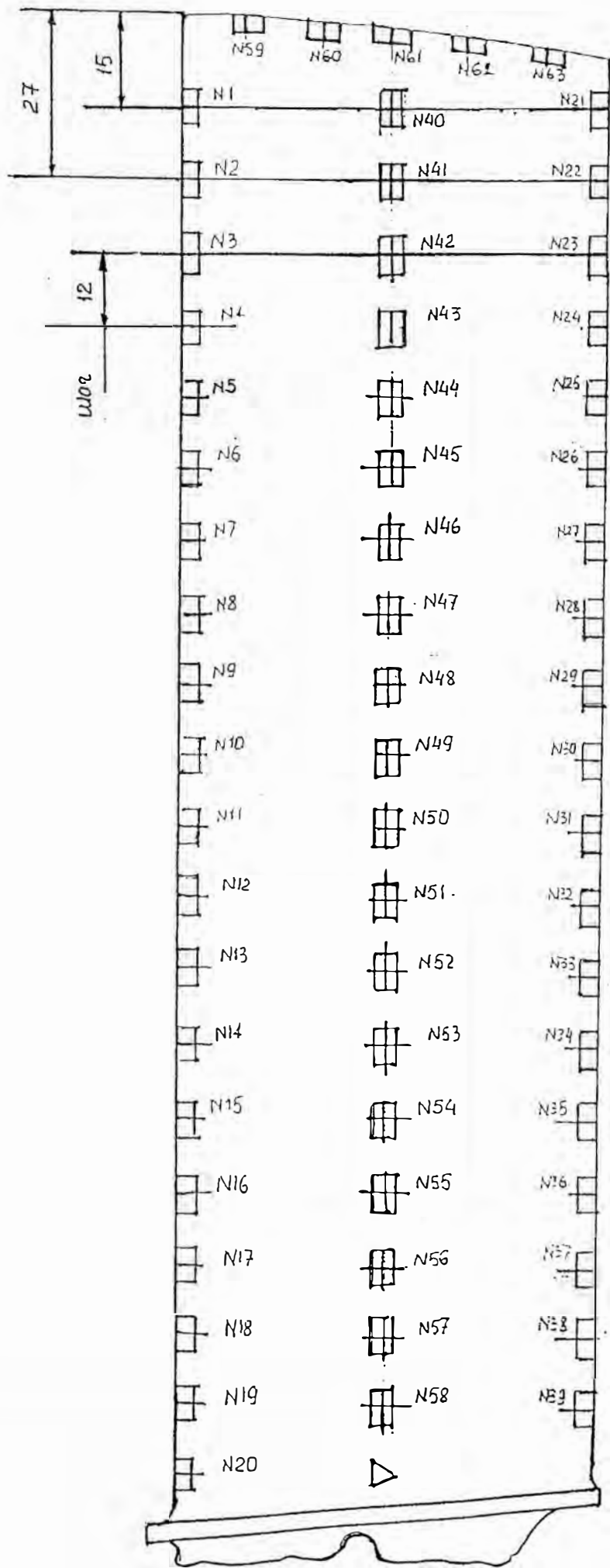


Fig. 2.2 Esquema de preparaciones del álabe con tensoresistores.

Distribución de las tensiones durante las oscilaciones
del ábabe (Fig. 2.3 - 2.12)

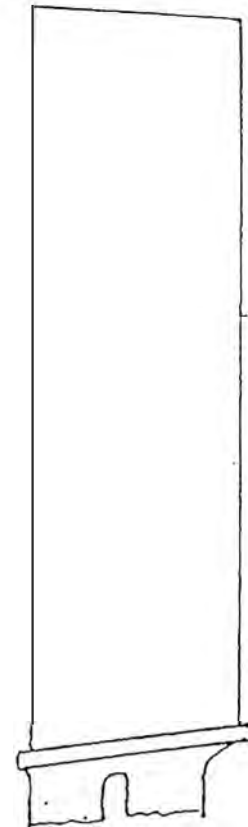
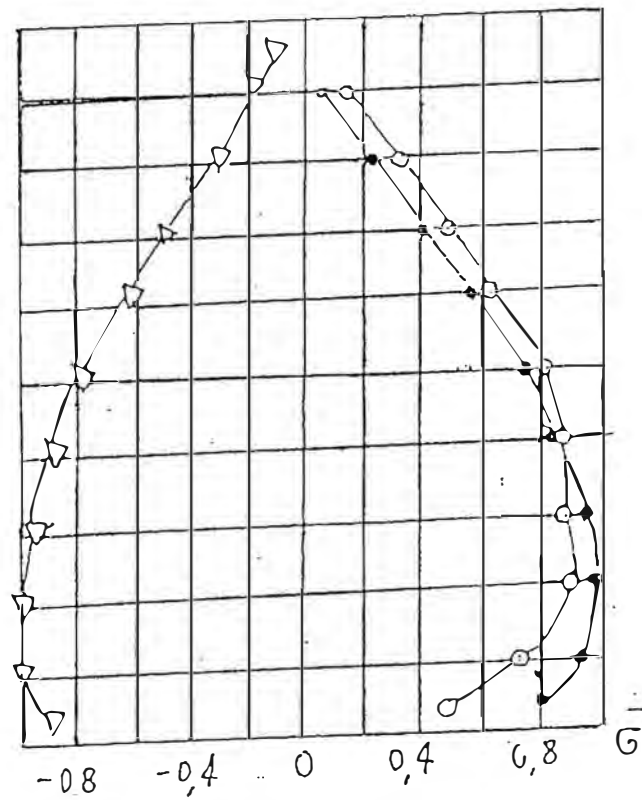


Fig. 2.3 Según el modo "1 x 1"

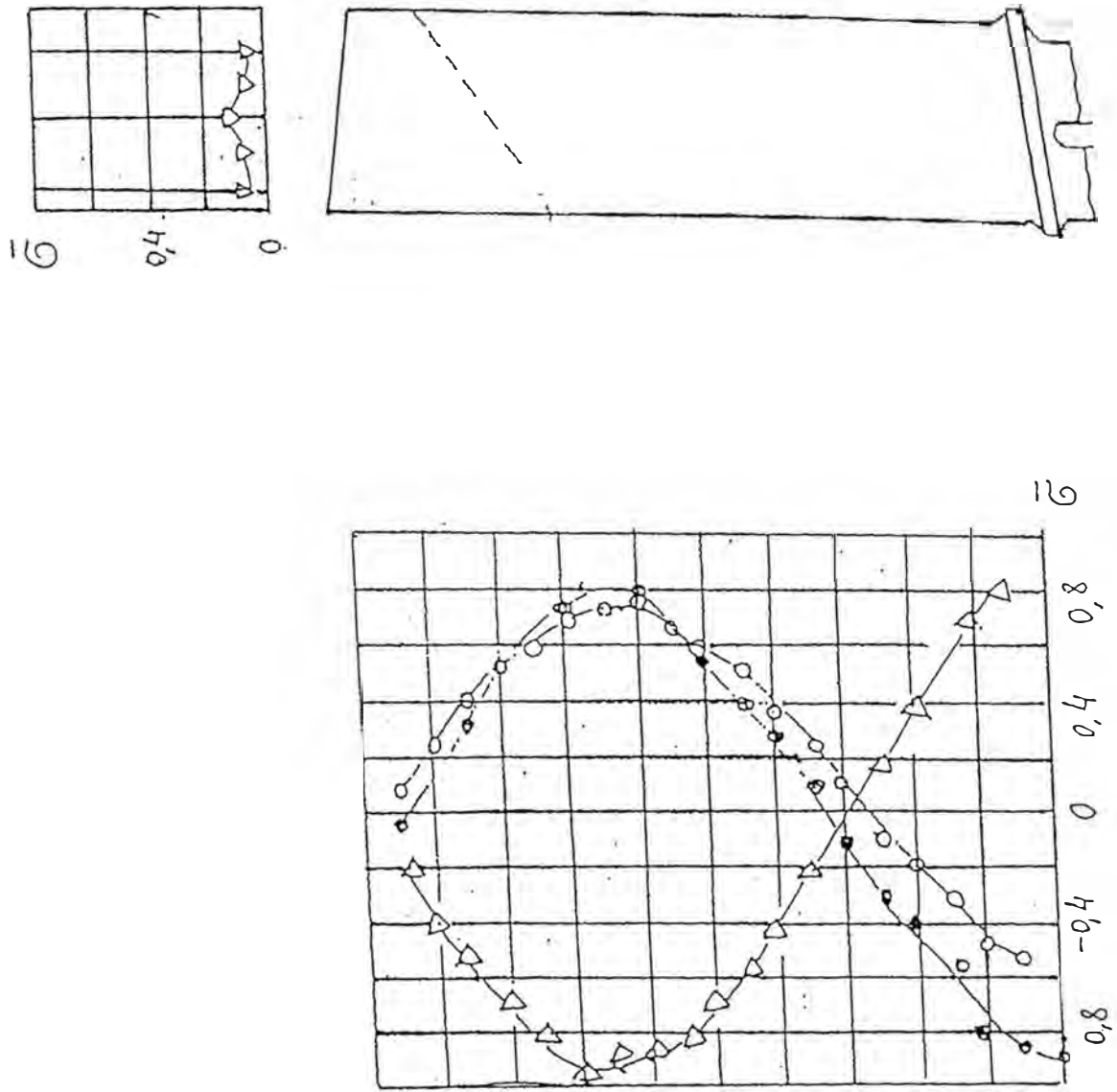


Fig. 2.4 Según el modo "2 x 1"

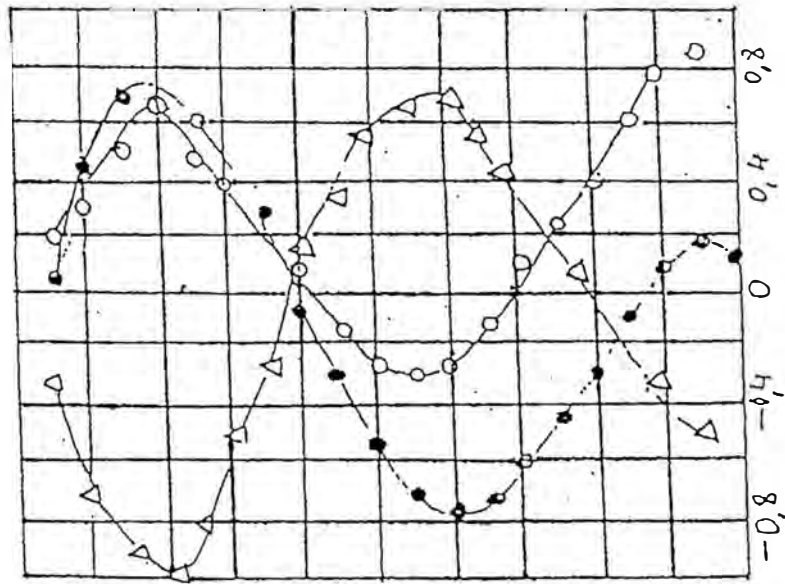
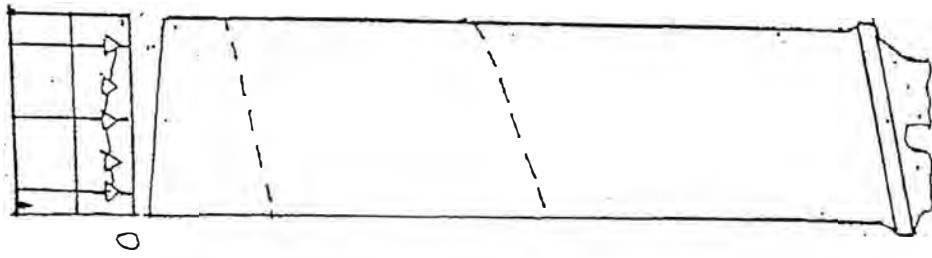
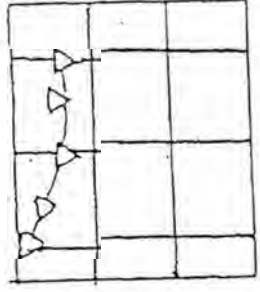


Fig 2.5 Según el modo "3 x 1"



0

-0,4
= 6

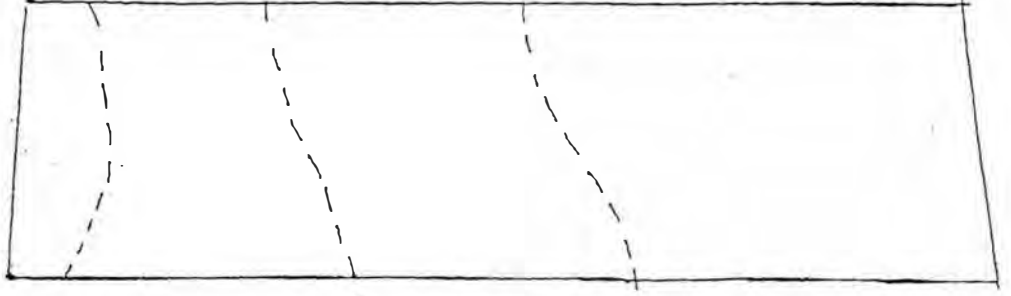
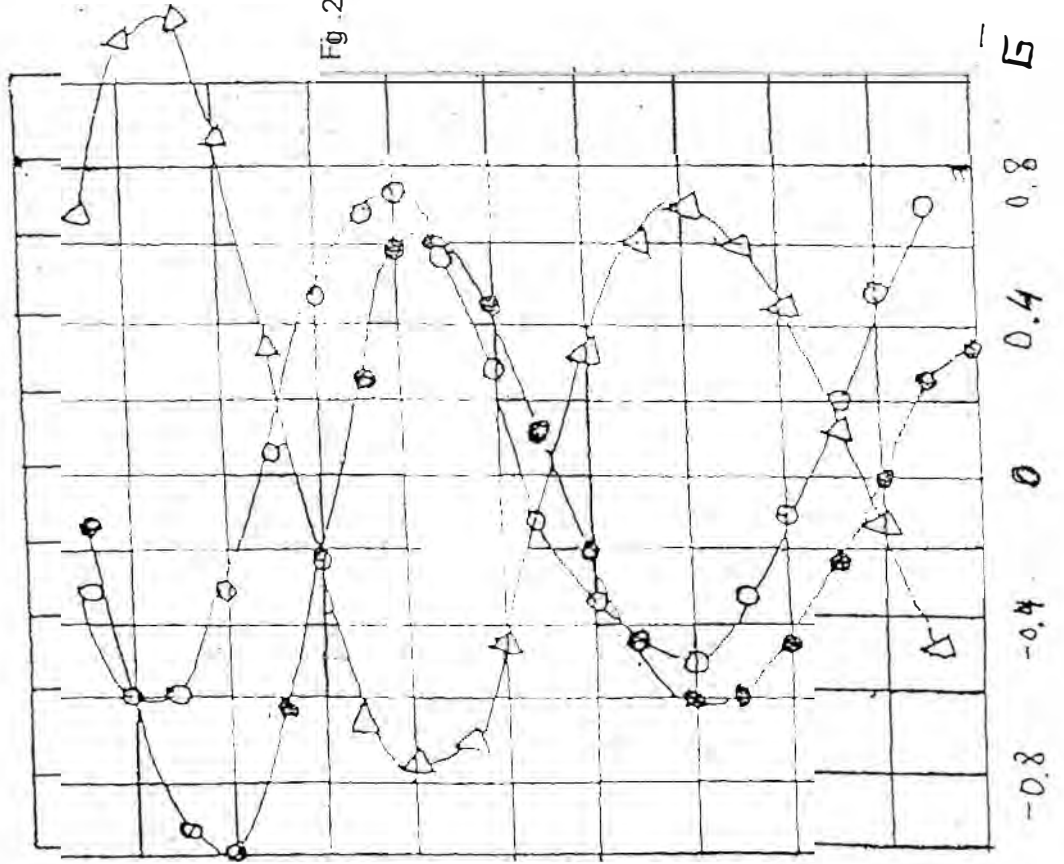


Fig. 2.6 Según el modo 4 x 1"



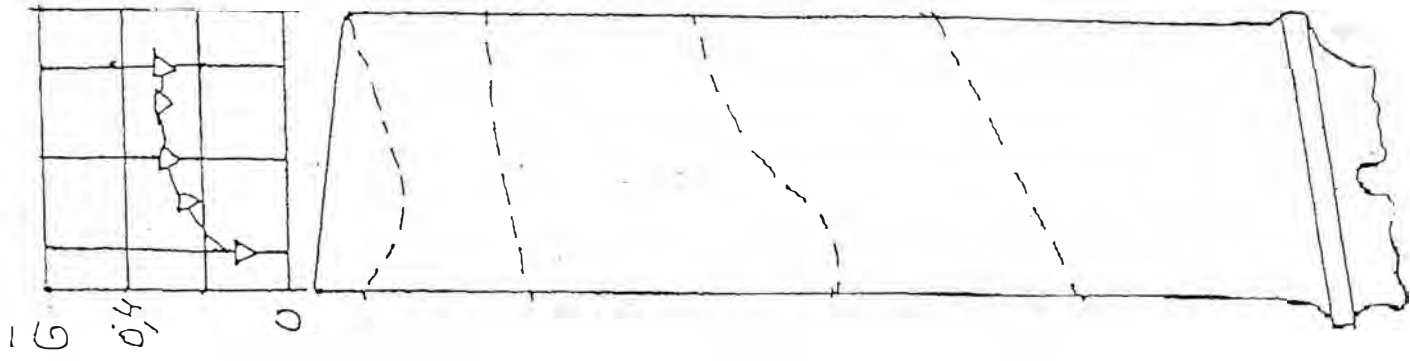
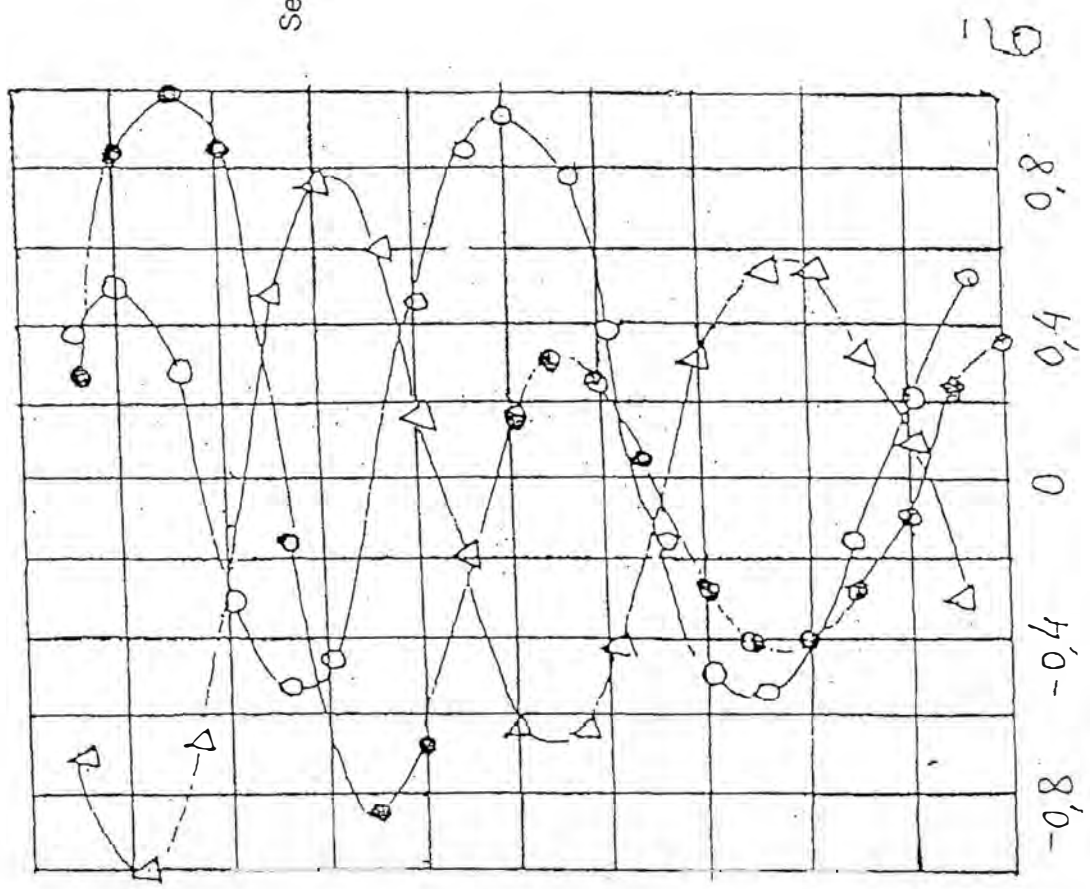


Fig. 2.7
Según el odo



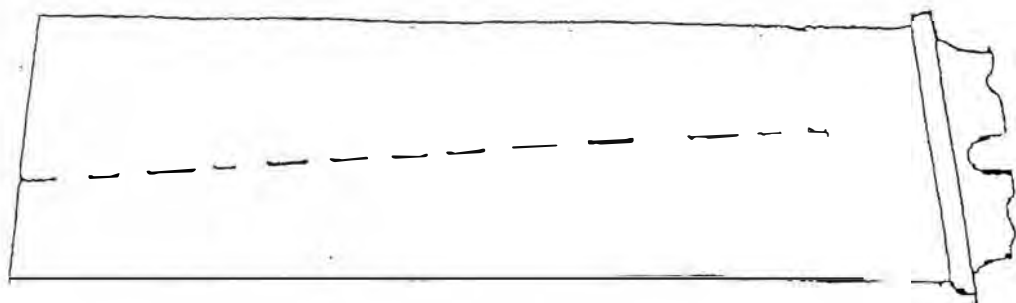
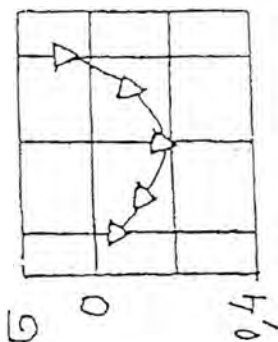
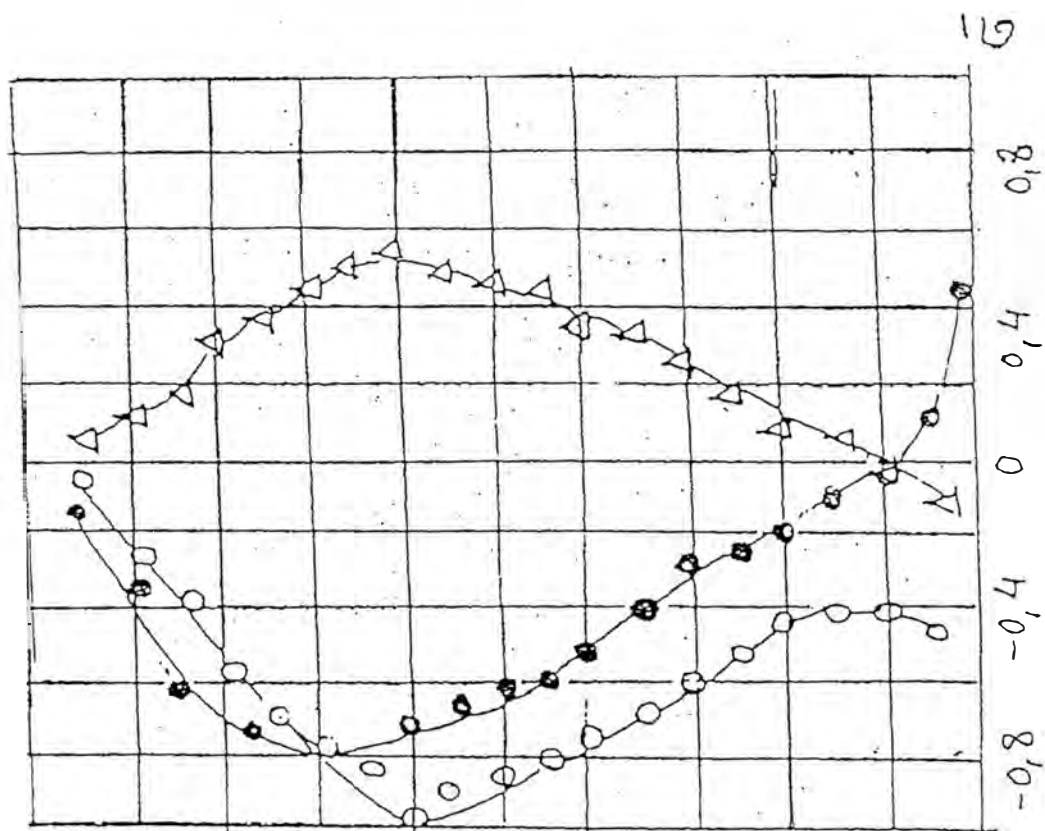


Fig. 2.8
Según el modo "1 x 2"



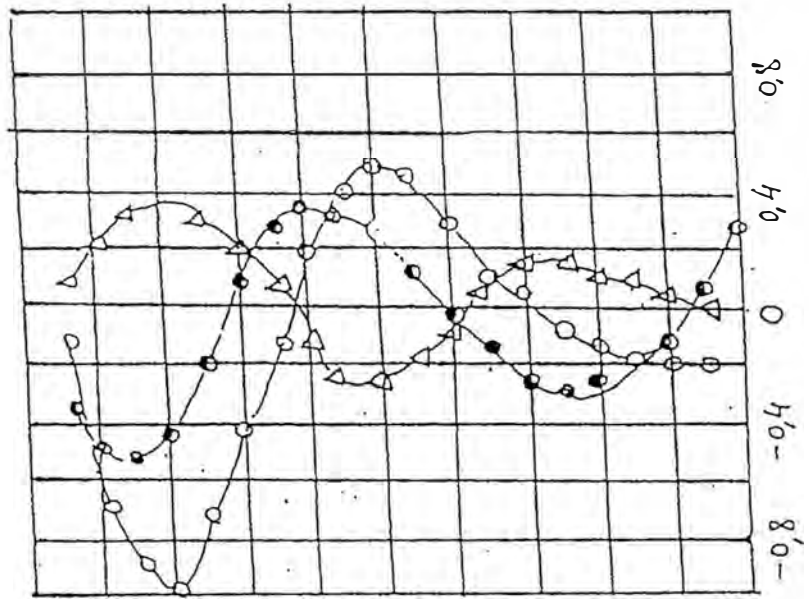
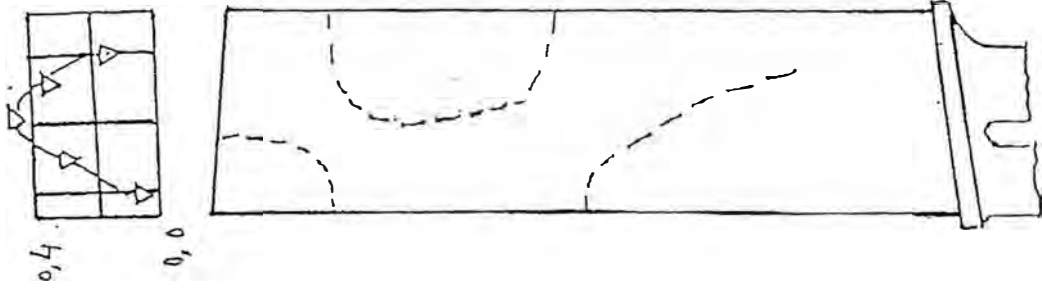


Fig. 2.9 Según el modo "3 x 2"

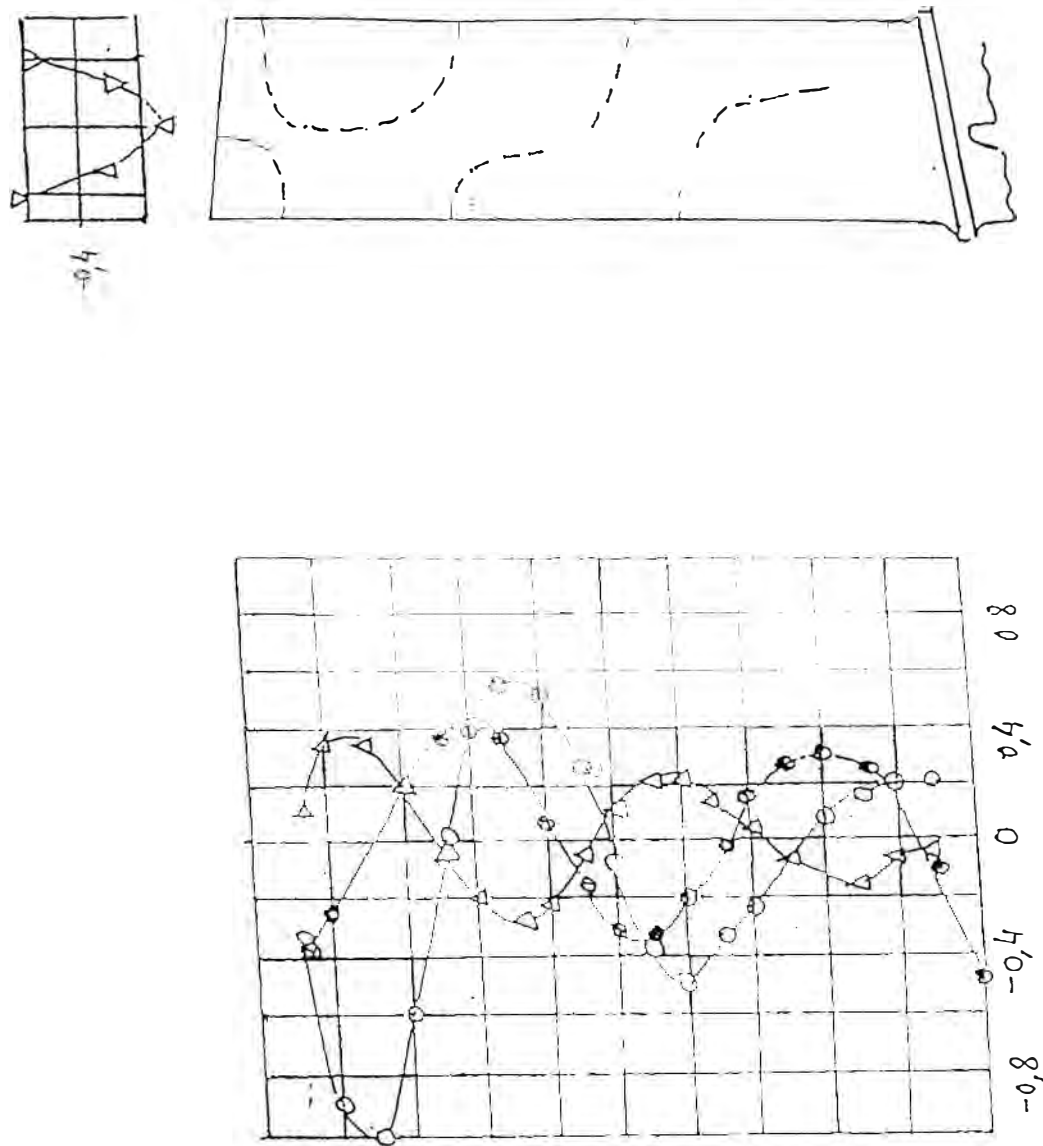


Fig 2 10 Según el modo "4 x 2"

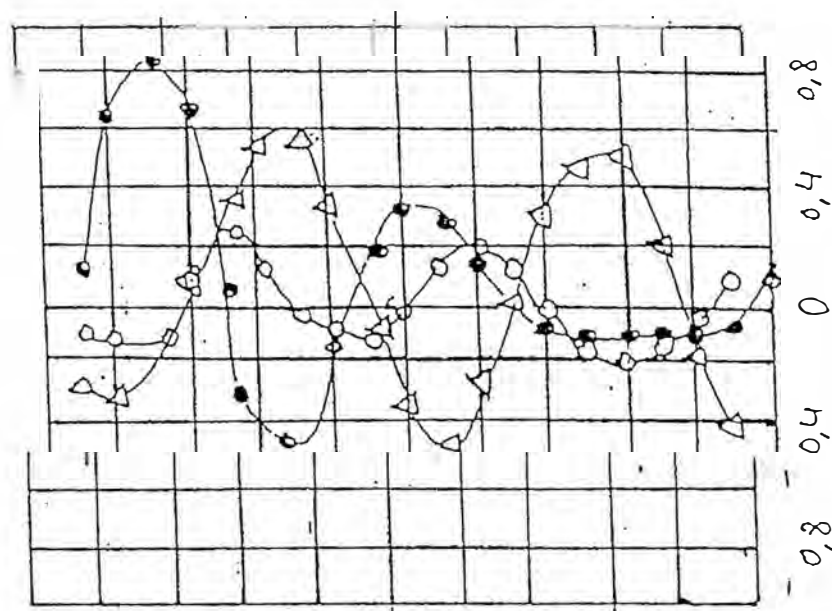
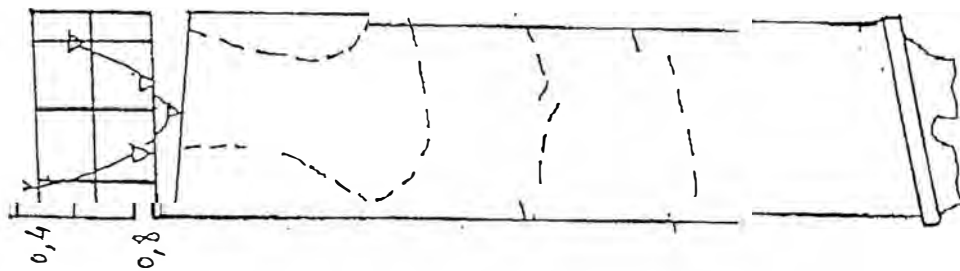


Fig 2.11 Segue $\lfloor \text{mod } 0 " 1 \times 3'$

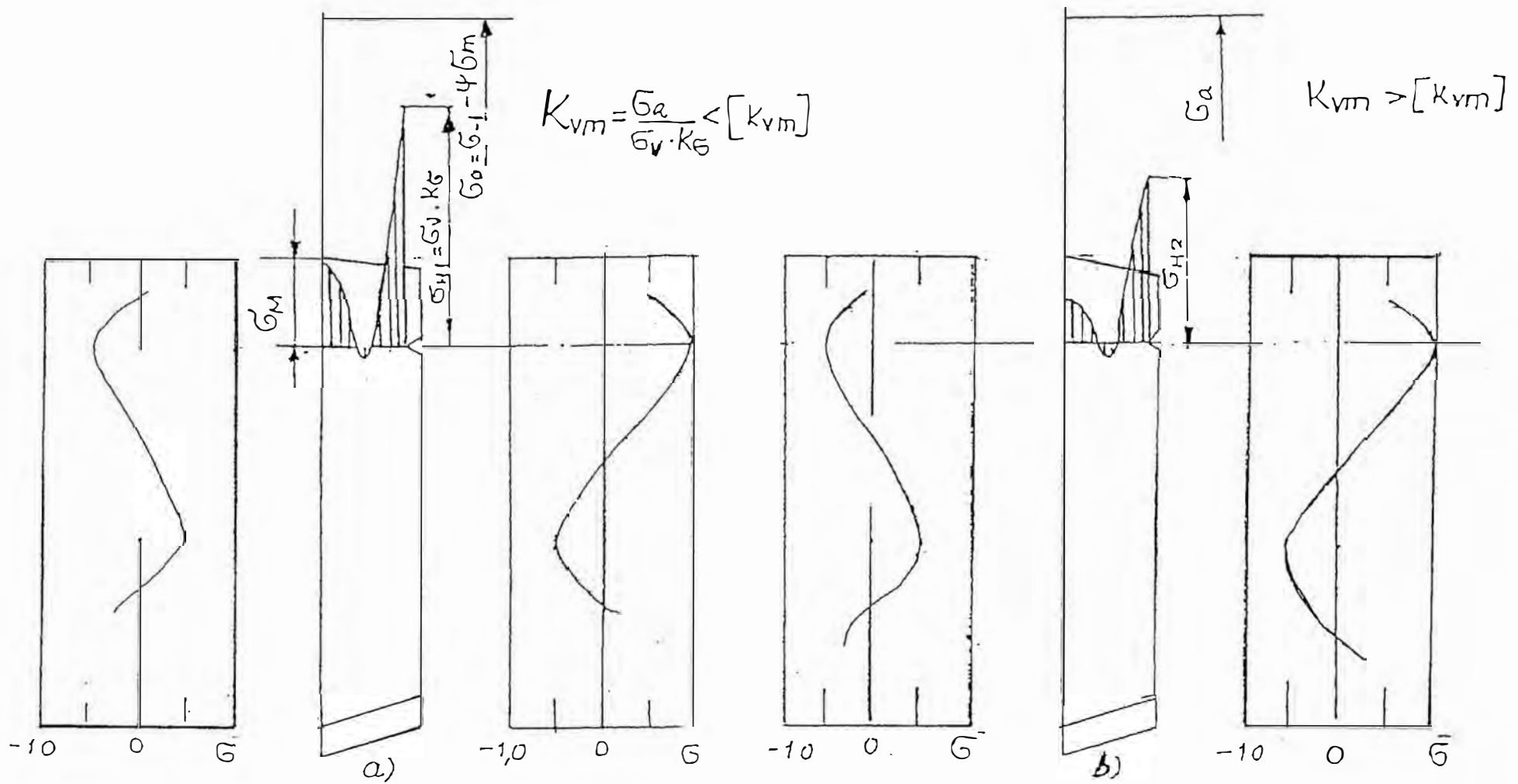


Fig. 2.12 Niveles de las tensiones que actúan en el álabe y los factores de seguridad a) en el modo de peligro potencial b) Grandes factores de seguridad.

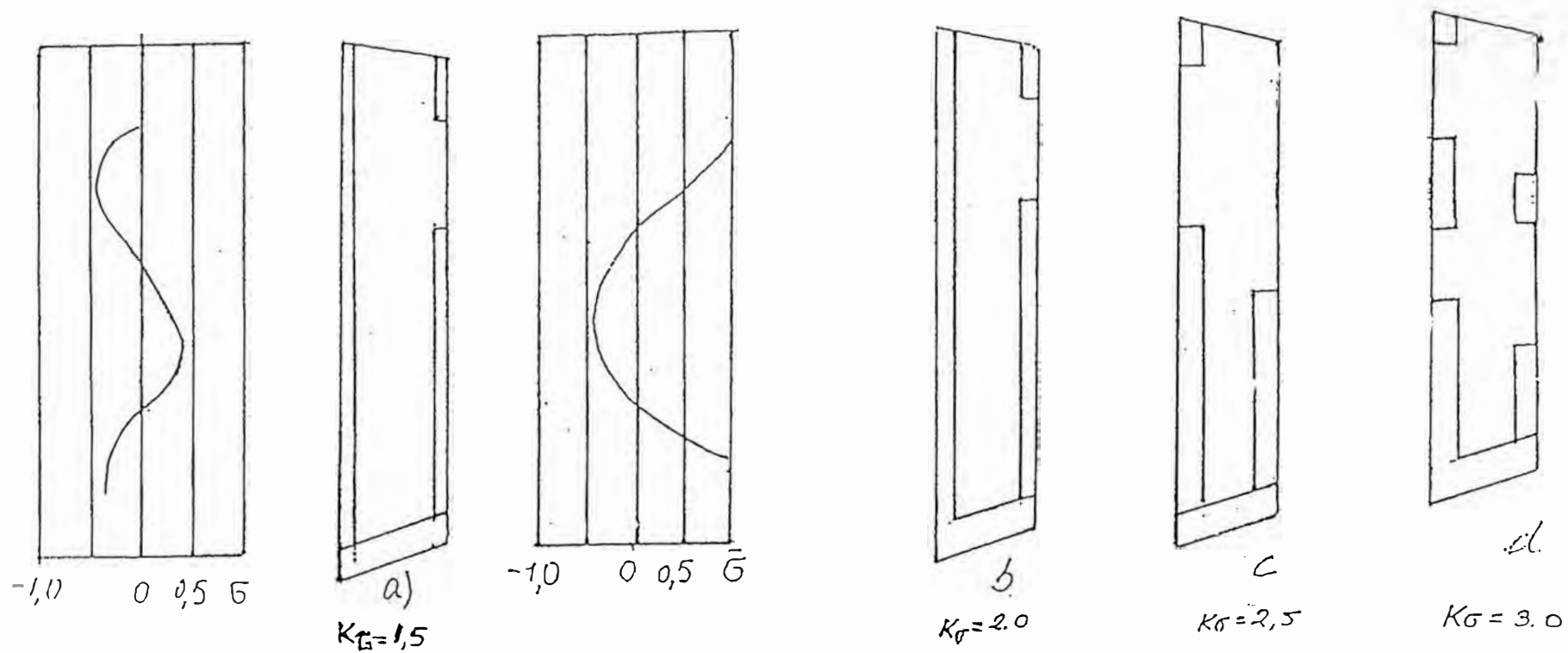


Fig. 2.13 Zonas permitidas en la paleta del álabe para daños con diferentes concentraciones de tensiones (modo de oscilaciones 3 x 2).

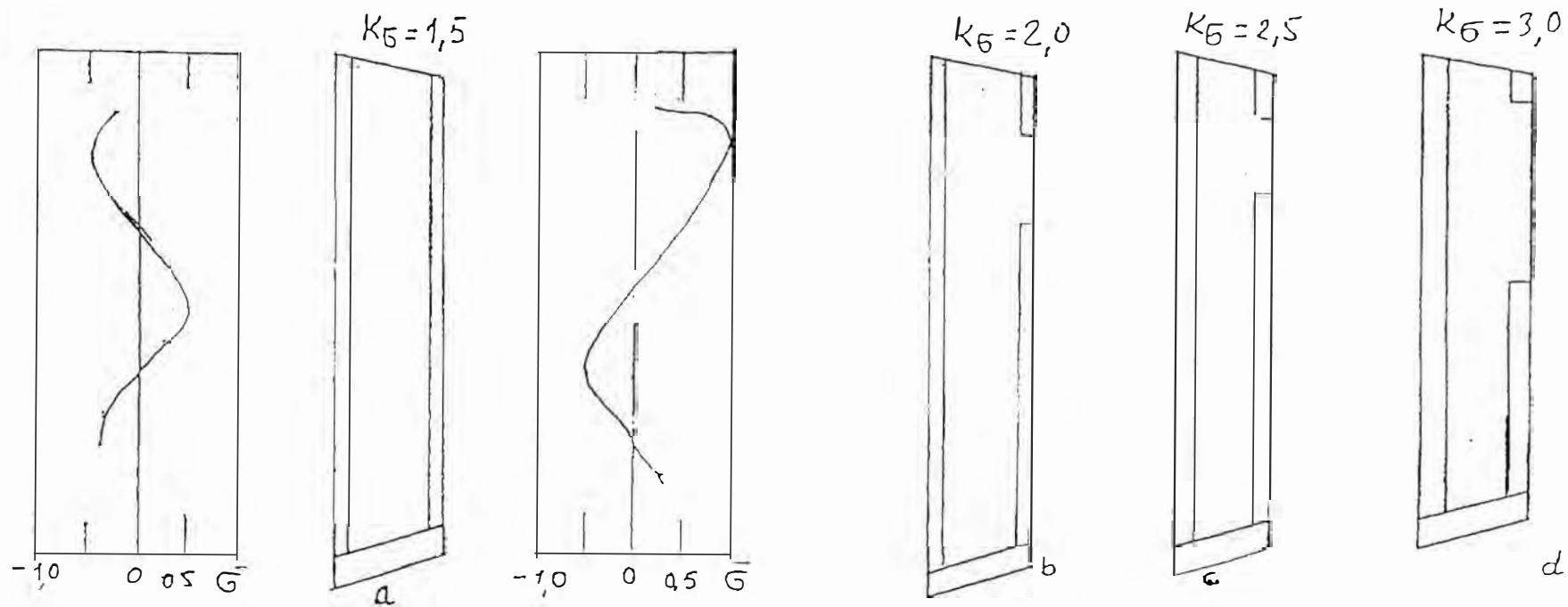


Fig. 2.14 Zonas permitidas para daños con concentración diferente de tensiones en la paleta de álabe si es posible la disminución del límite a la fatiga en la zona.

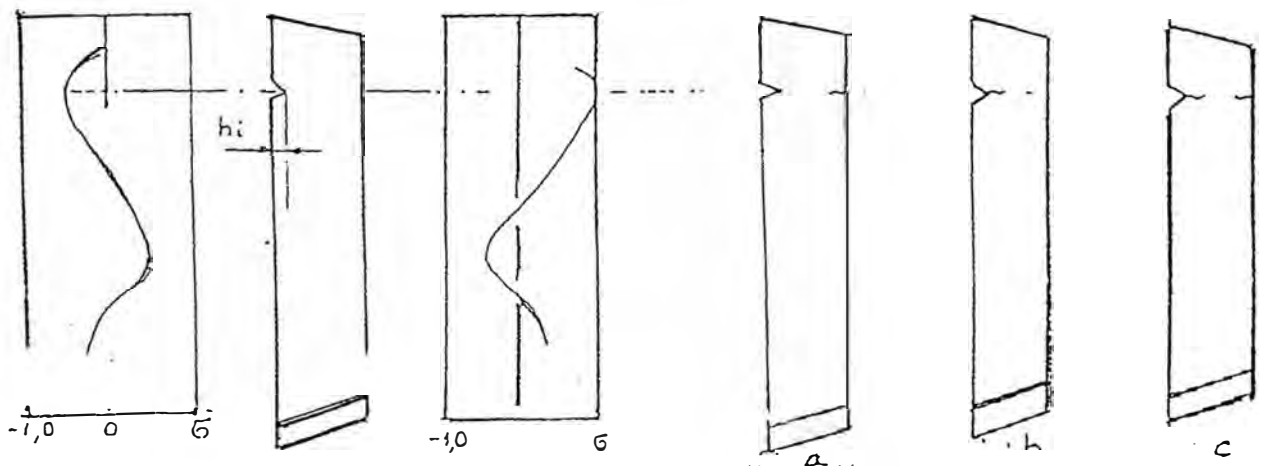


Fig. 2.15 Evaluación del nivel de peligrosidad de los daños a) No peligroso, daños permitiendo; b) Peligroso daño no permitido; c) crítico o limite permitido del daño.

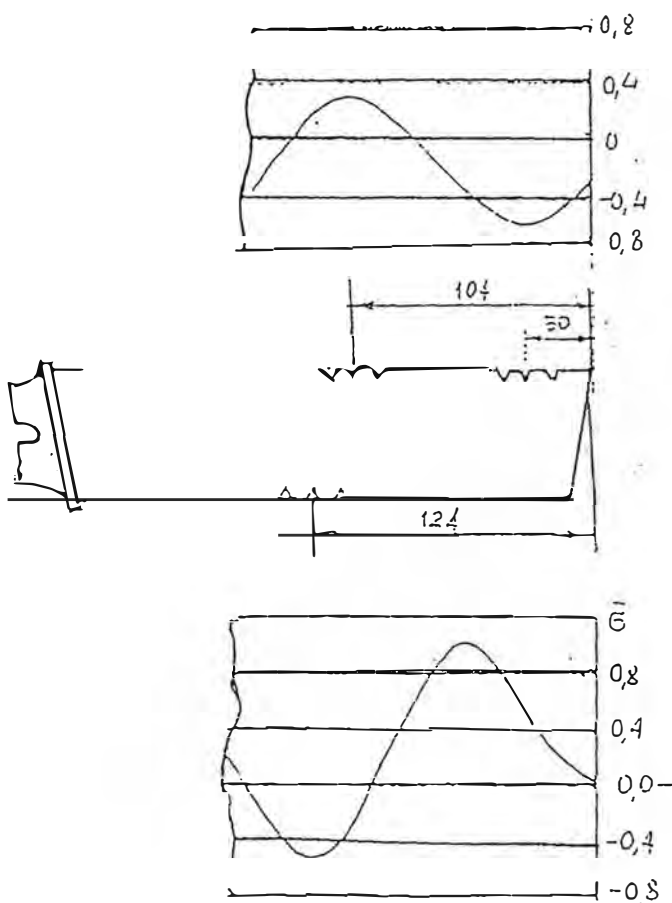


Fig. 2.16 Modelo de confección de las abolladuras en el álabo.

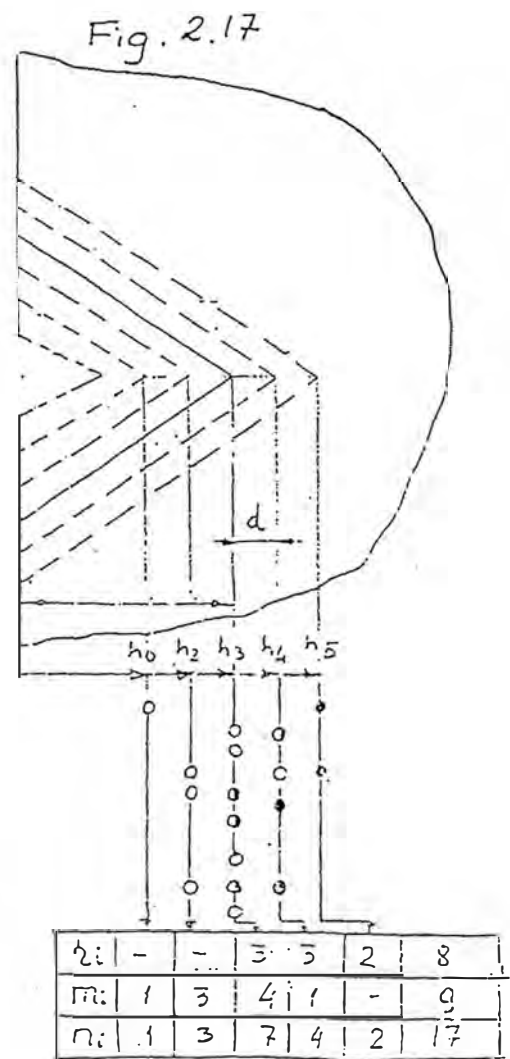


Fig. 2.17 Módulo de pruebas de los álabos con abolladuras según el "método de roturas" rajadura del concentrador (abolladura); rajadura en la zona del MNT ; rajadura en las 2 zonas.

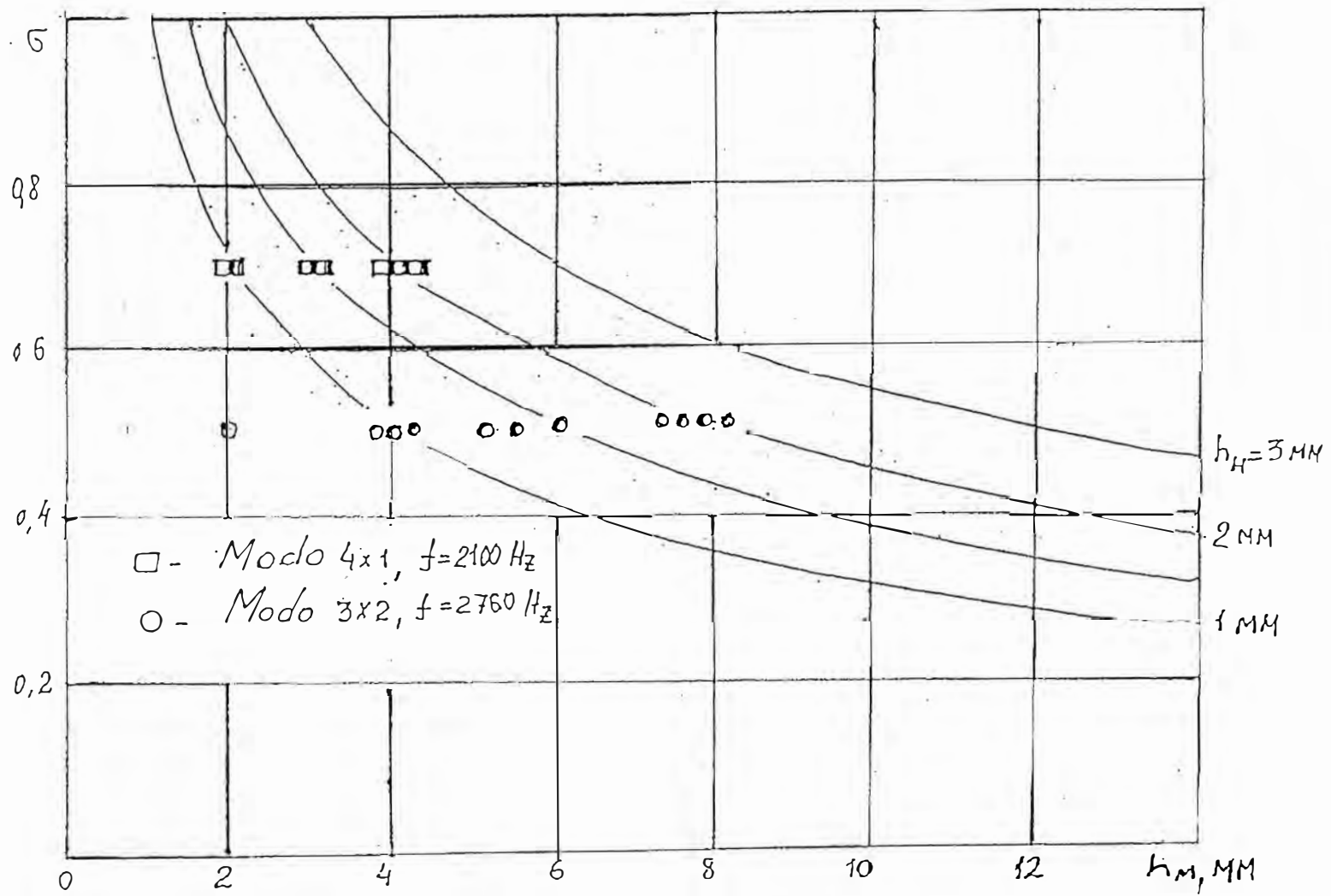


Fig. 2.18 Profundidad de los daños permitidos H_m en función
a Según el parámetro del defecto inicial h_m

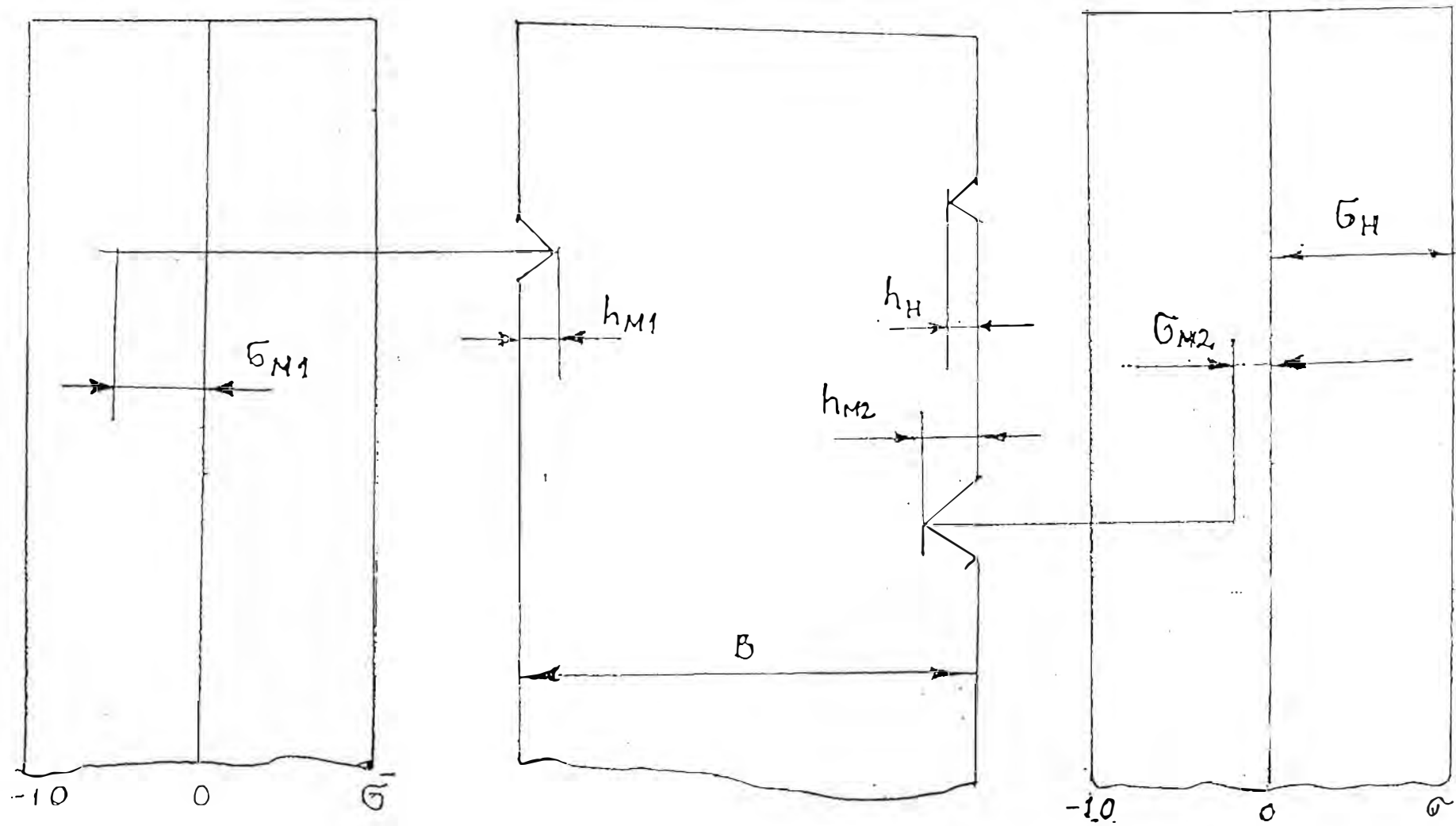


Fig. 2.19 Modelo de ubicación de lo cortes en el álabe.

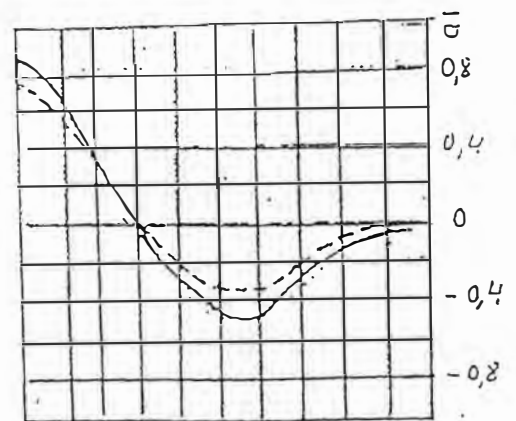
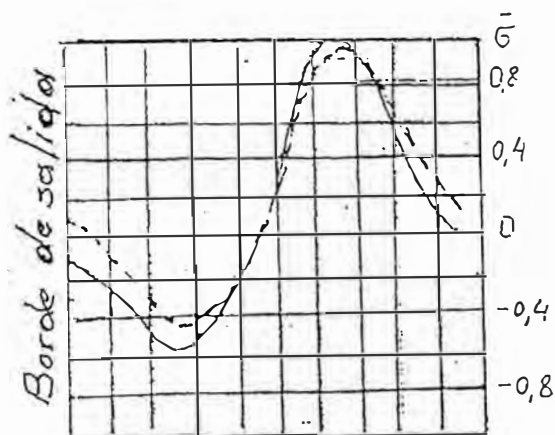
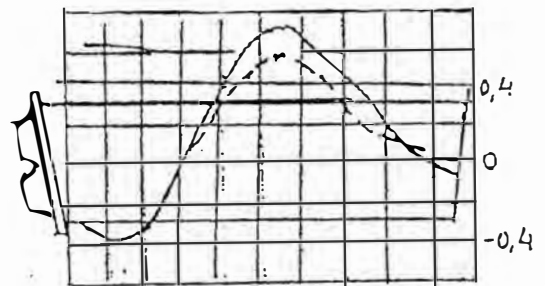
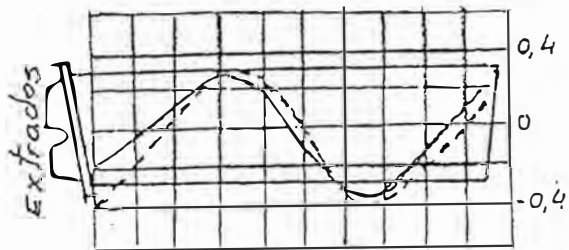
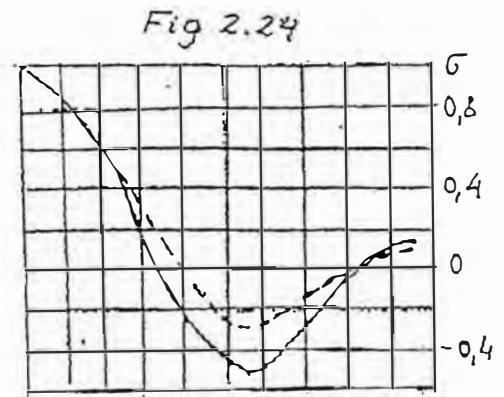
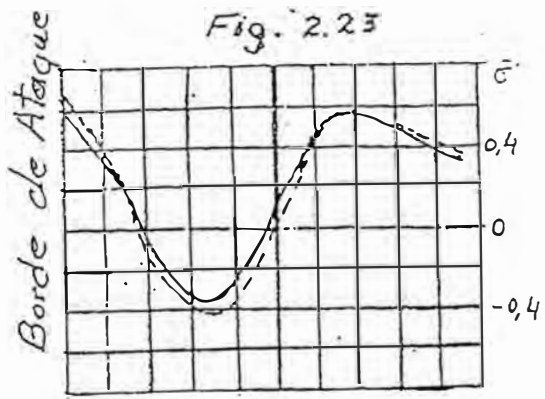


Fig. 2.20 Distribución de Tensiones durante las oscilaciones del álabe según el modo 2x2 ($n=0$, $f=1641$ Hz $n=832$ rad/seg, $f=1662$ Hz).

Fig. 2.21 Distribución de las tensiones durante las oscilaciones del álabe según el modo flexural (2x1) fijación acharnelada ($n=0$, $f=369$ Hz, $n=832$ rad/seg, $f=520$ Hz).

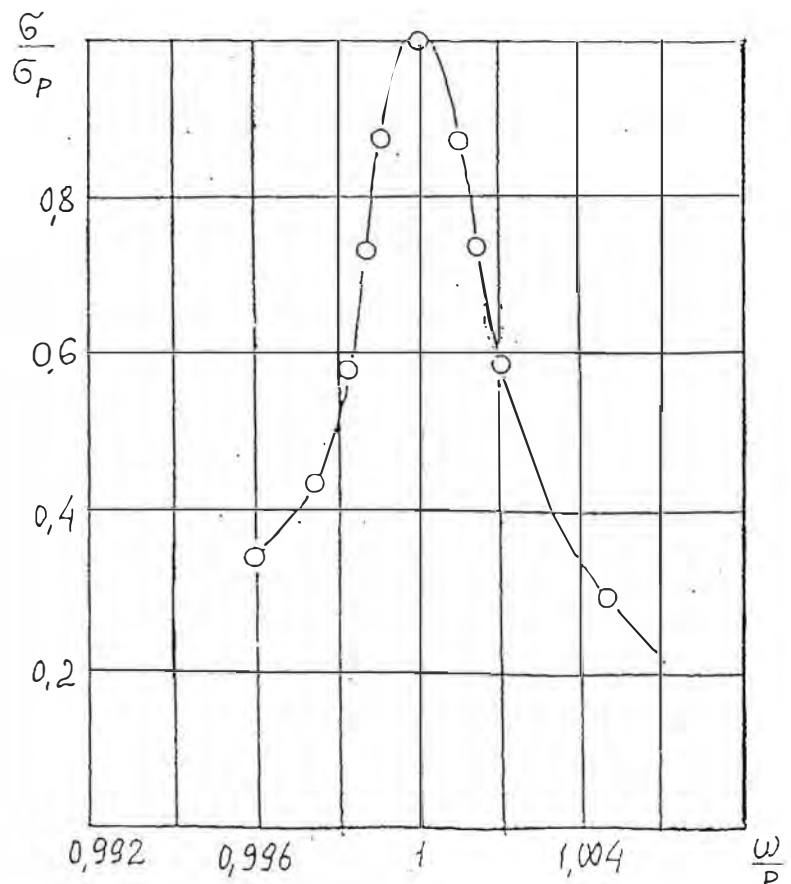
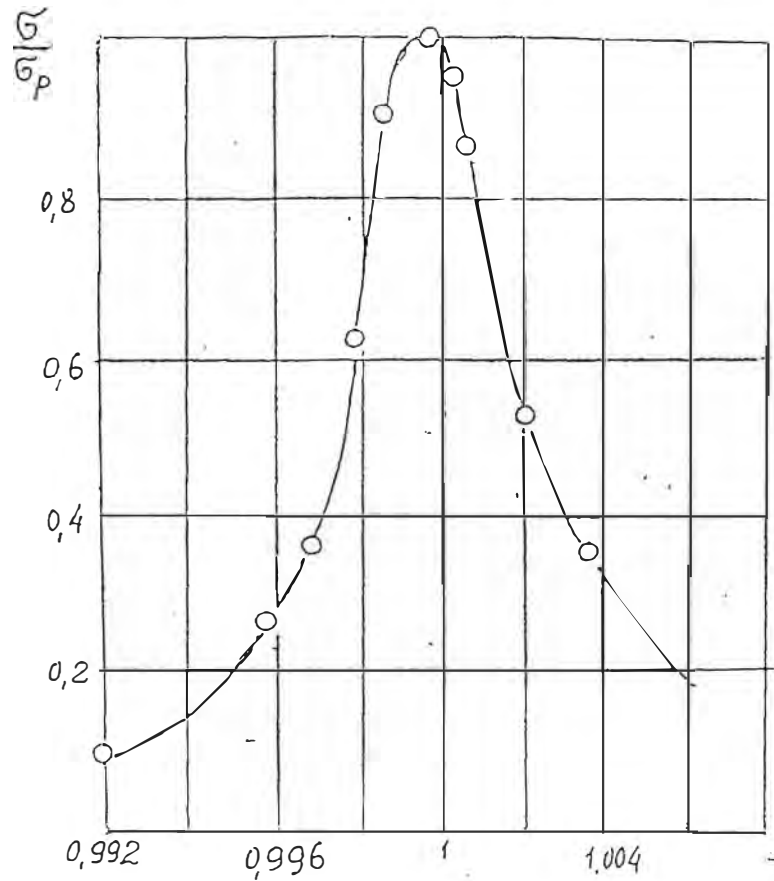
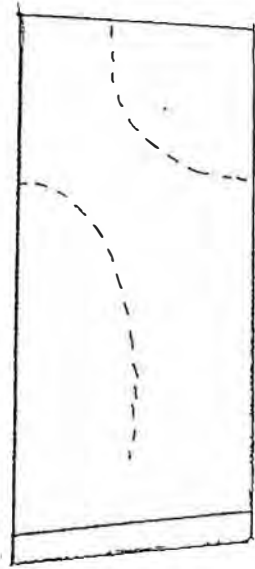


Fig. 3.1. Curvas de resonancia de los álabes a) de acero $f_p = 79 \text{ MPa}$, $\zeta = 0,006$
 b) de aleación de aluminio $f = 2761 \text{ Hz}$, $\zeta = 33 \text{ Mpa}$

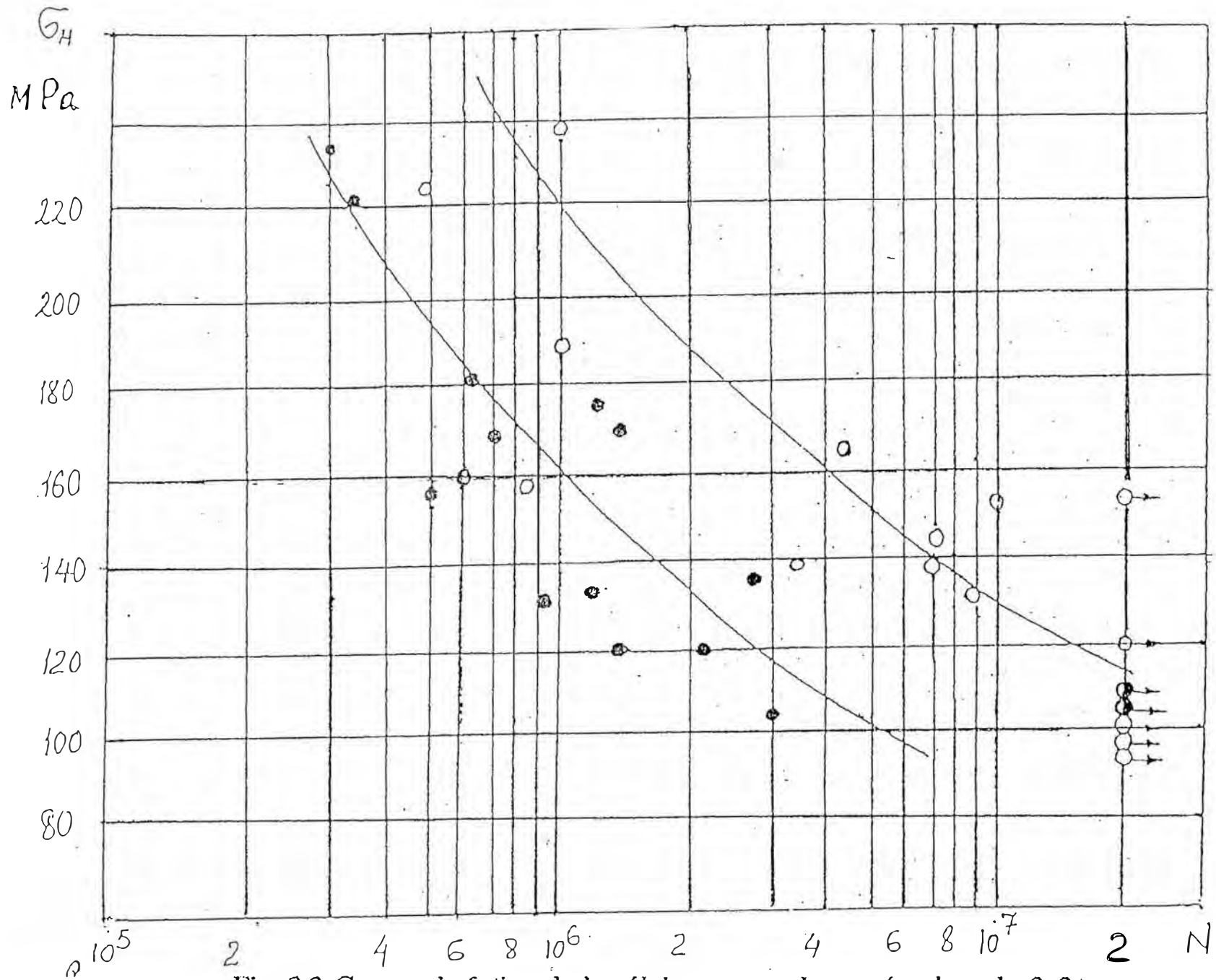


Fig. 3.2 Curvas de fatiga de los álabes ensayados según el modo 3x2, $f=2760$ Hz. 1. Alabes nuevos, ○ 2. Alabes con trabajo

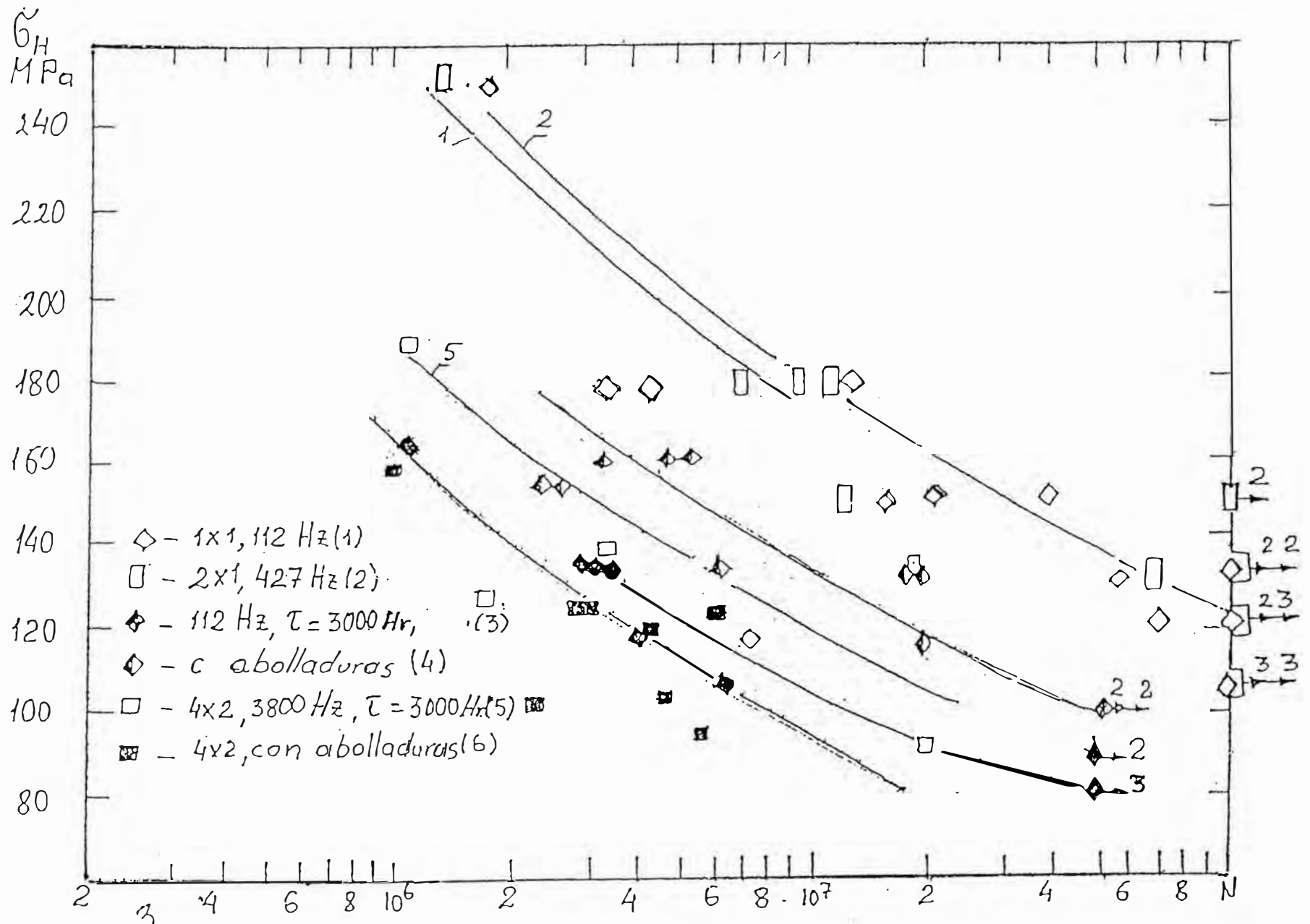


Fig. 3.3 Curvas de fatiga de los álabes durante las oscilaciones según modos distintos.

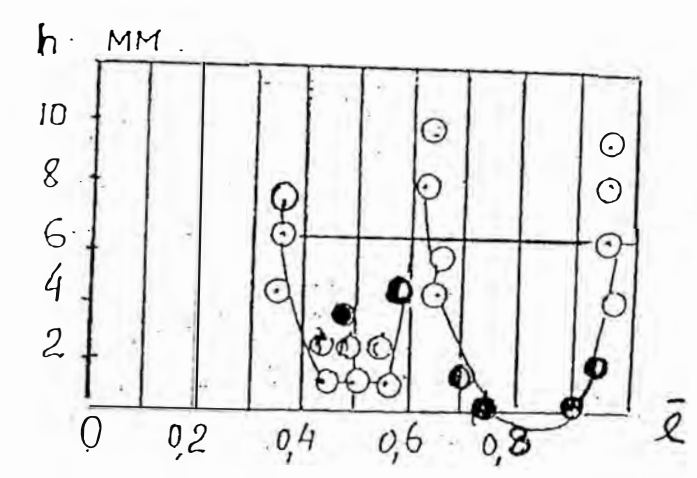
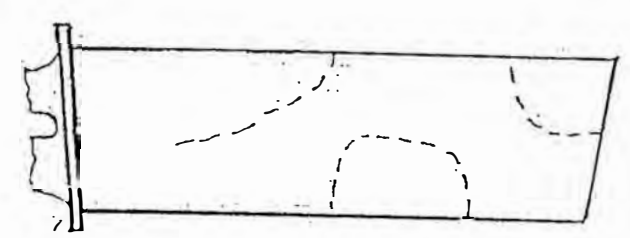
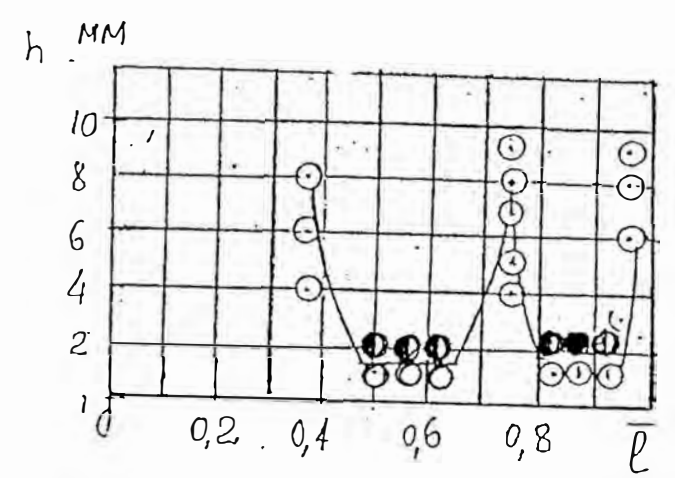
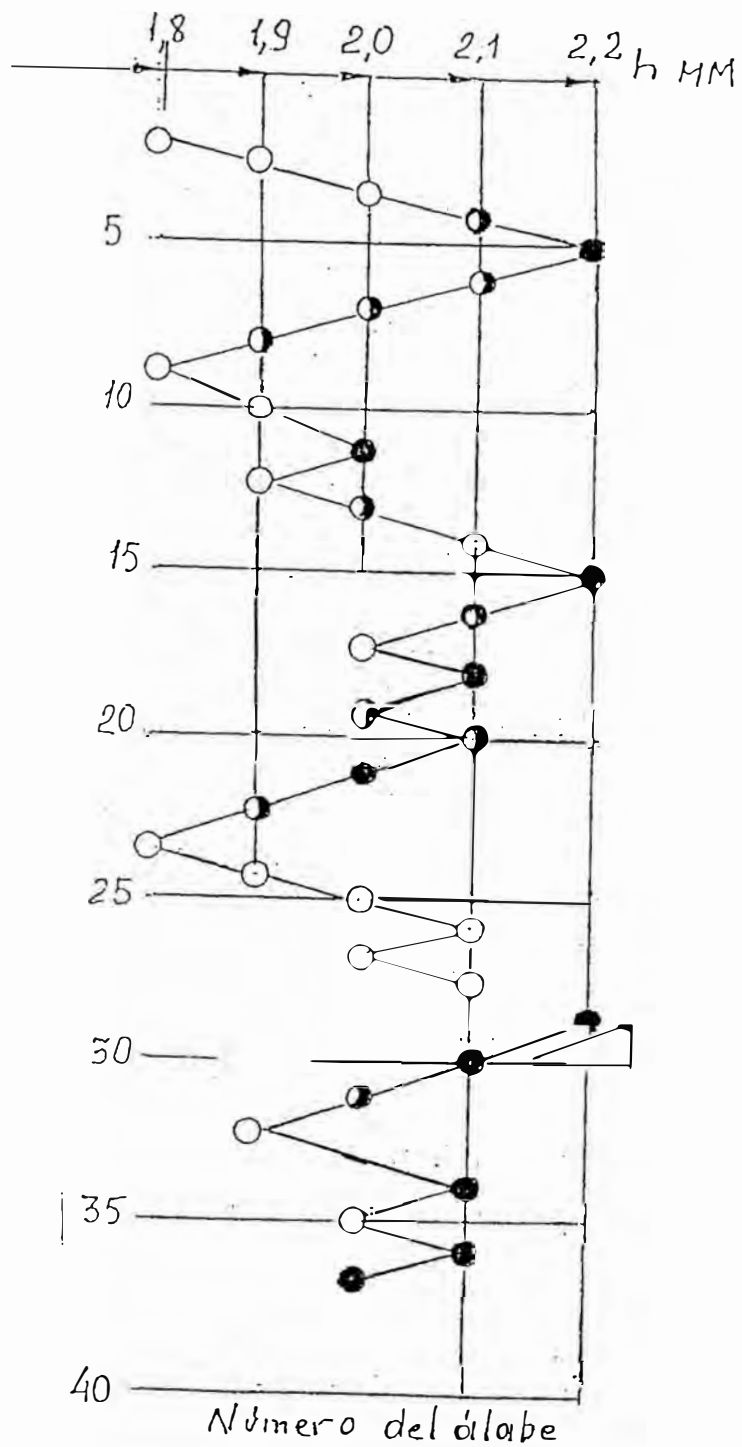


Fig. 3.4

Secuencia de las pruebas de los álaves según el método de roturas.

Fig. 3.5

Distribución de la profundidad permitida de los daños en los bordes del álabe.

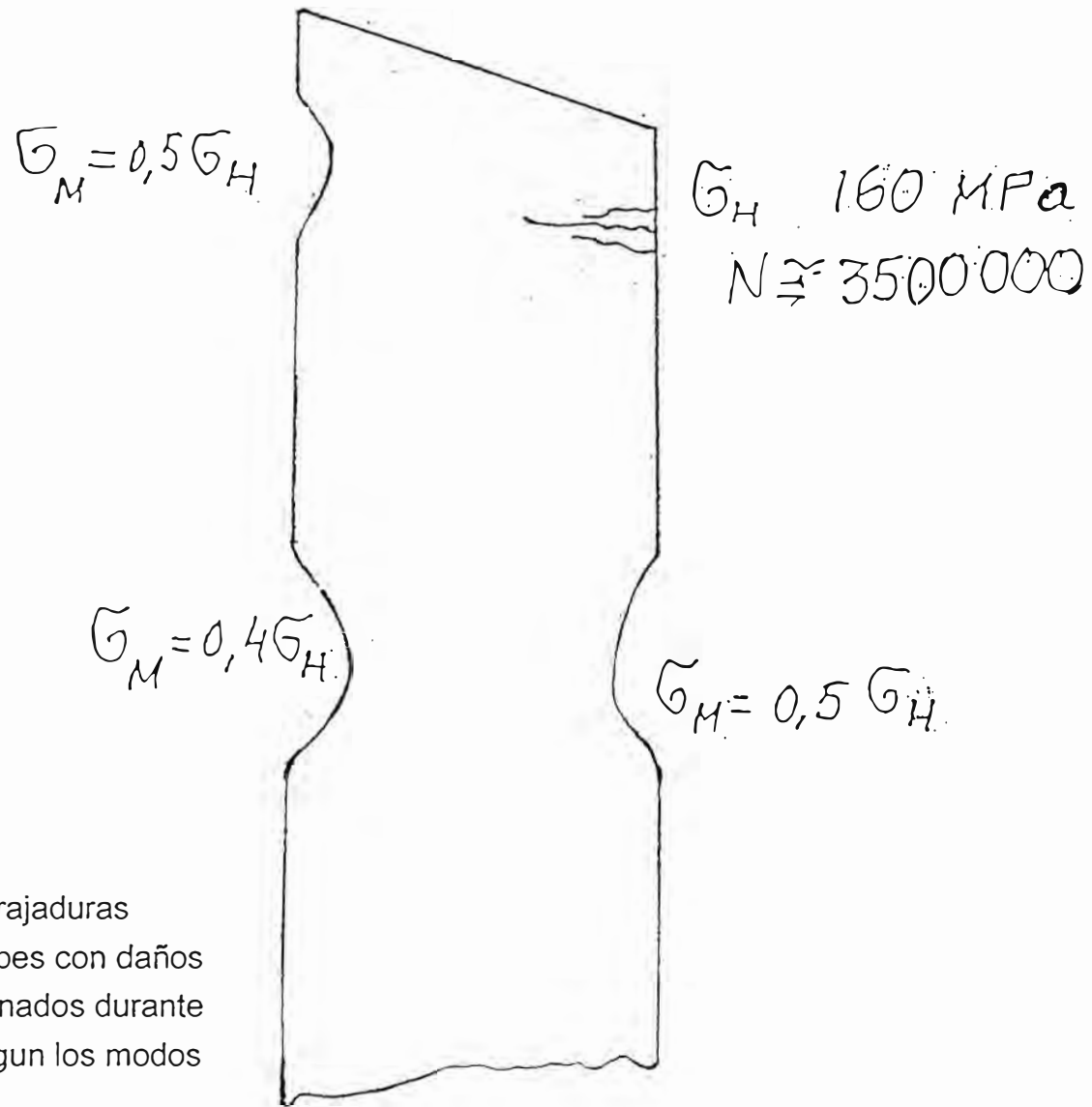


Fig. 3.6 Distribución de las rajaduras de fatiga en los álabes con daños operacionales eliminados durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia.

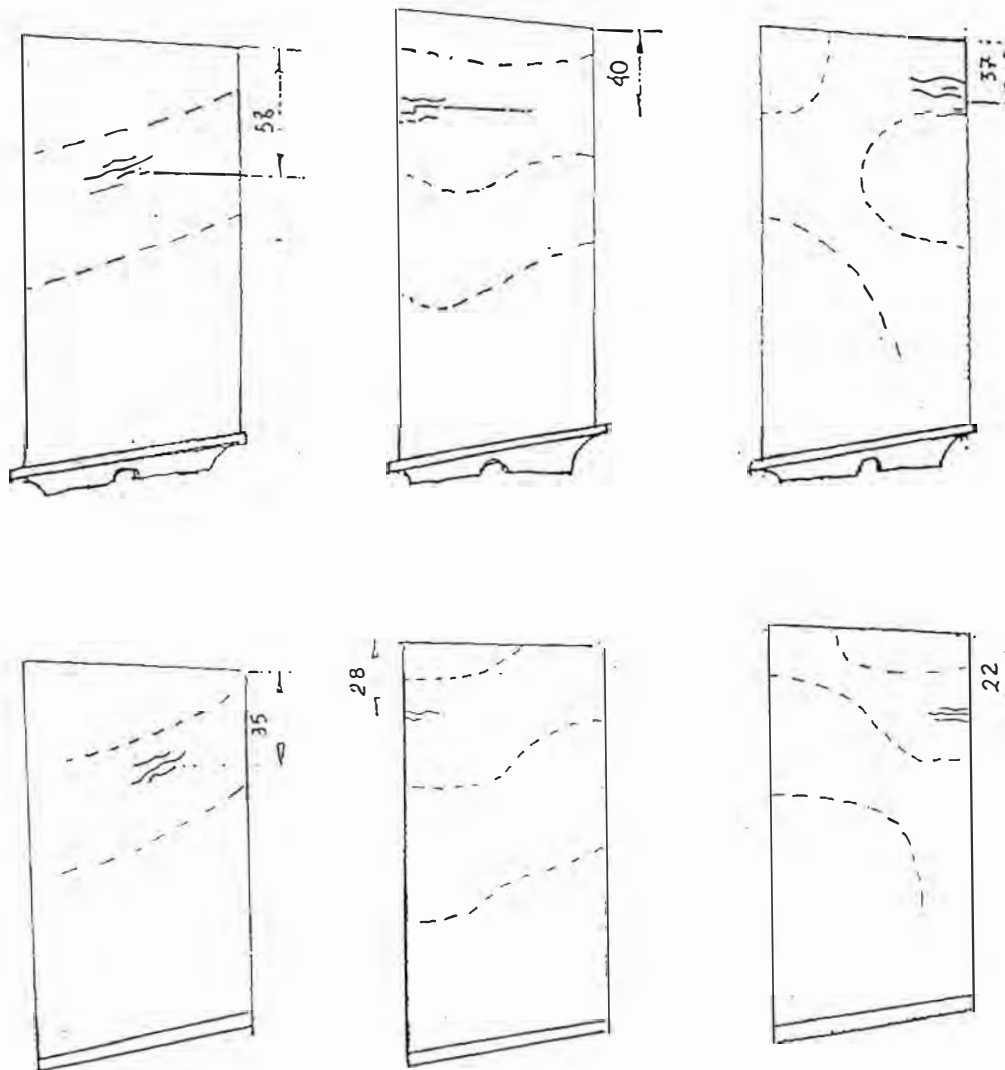


Fig. 4.1 Zonas de rotura local de los álabes de los compresores durante las oscilaciones según los modos de alta frecuencia.

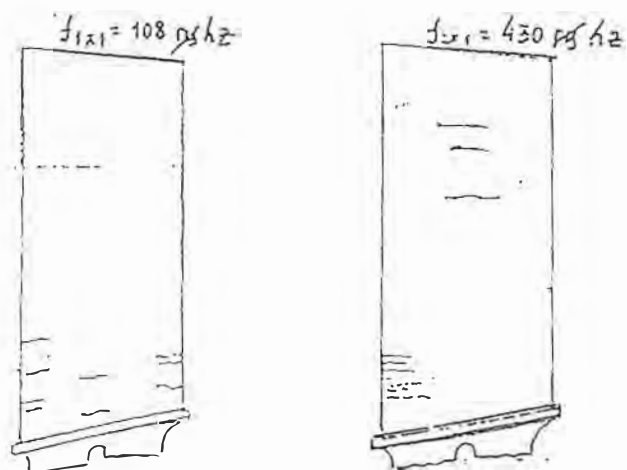


Fig. 4.2 Ubicación de las rajaduras por fatiga en los álabes durante las oscilaciones según los primeros modos.

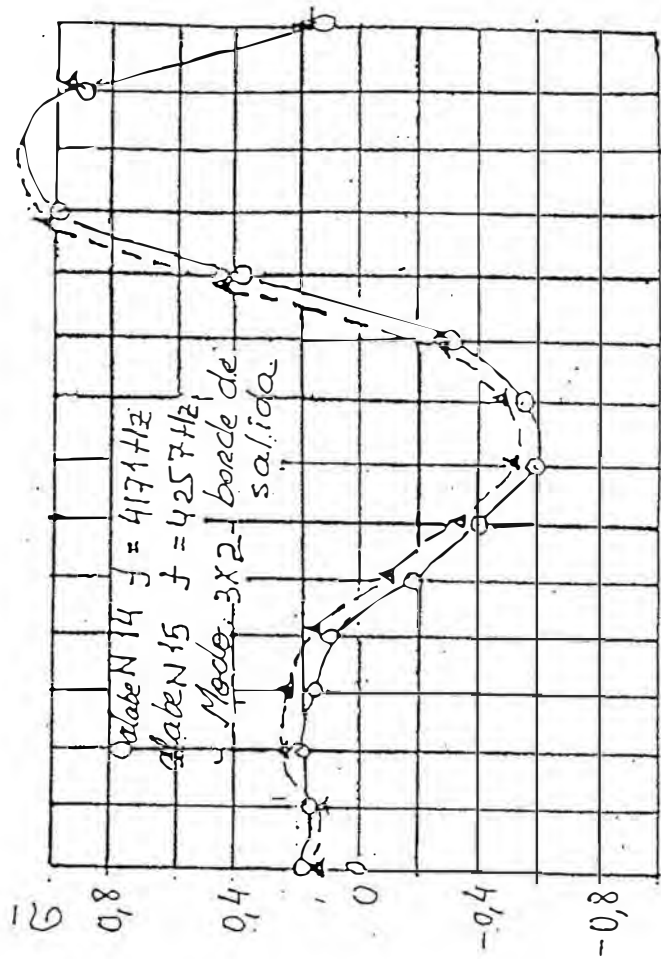
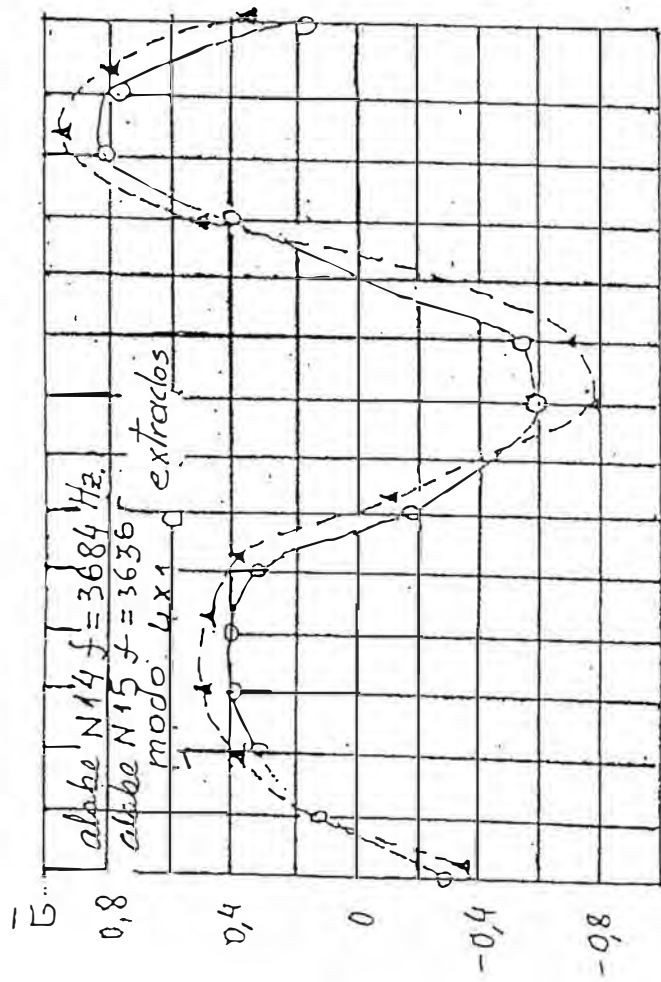
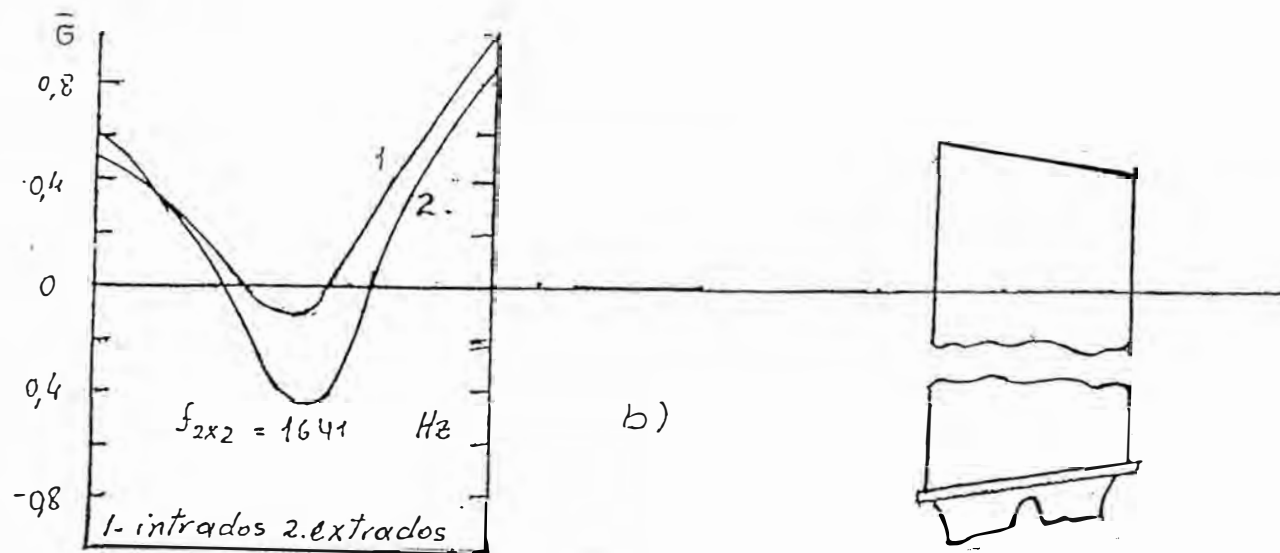
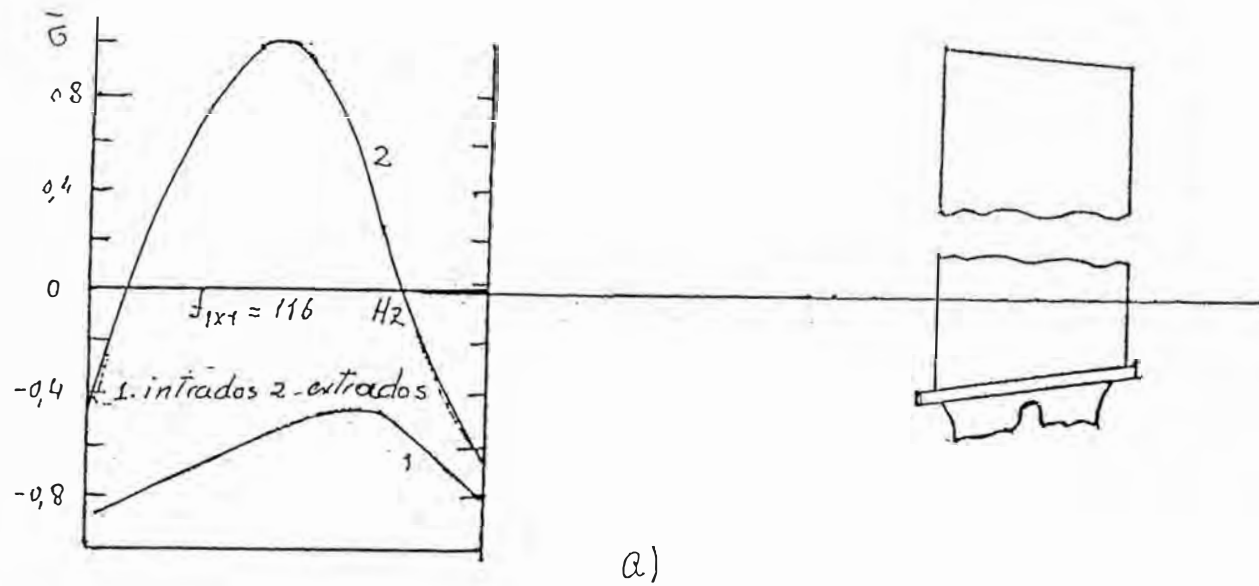


Fig 4 3 Distribución de las máximas tensiones durante las oscilaciones de los álabes de un mismo tipo según modos iguales



b. Según los modos de oscilaciones de alta frecuencia.

Fig. 4.4 Diferencia en las condiciones del desarrollo de las rajaduras en los álabes de los compresores

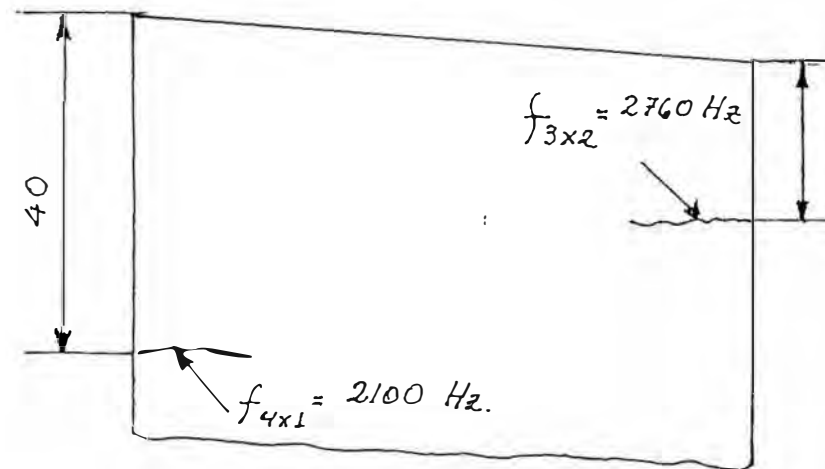
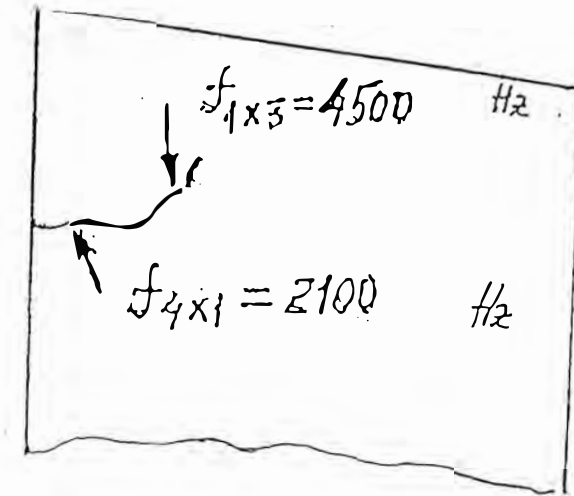
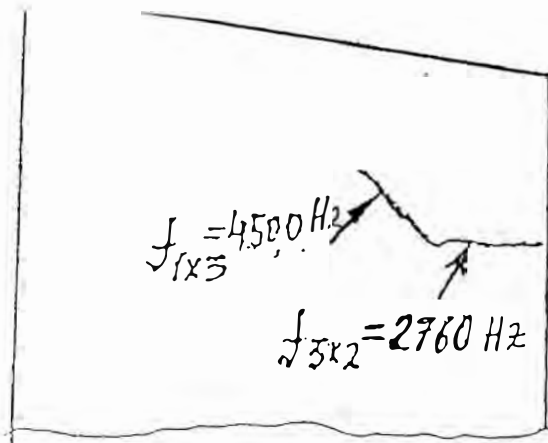
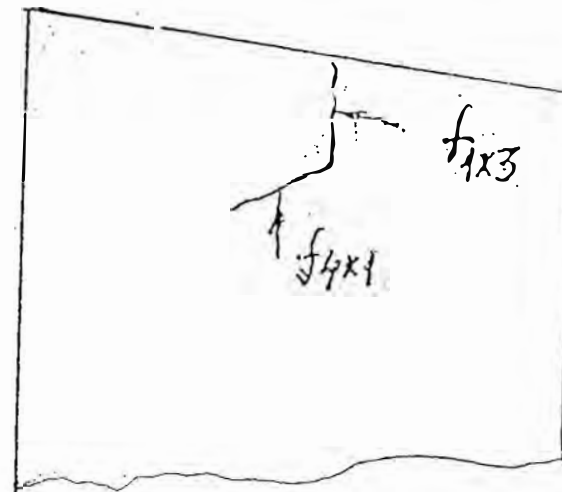
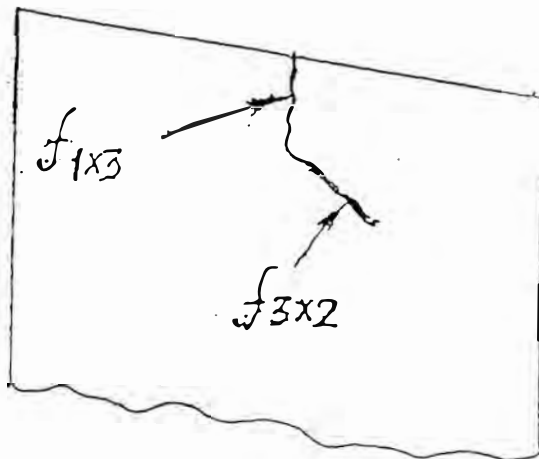


Fig. 4.5 Rajaduras de fatiga obtenidas en un álabo durante sus oscilaciones según los modos 3 x 2 y 4 x 1.



a)



b)

Fig. 4.6 Influencia de los modos de las oscilaciones en la dirección de las rajaduras de fatiga a) el modo 1 x 3 en la rajadura según modo 3 x 2 ó 4 x 1. b) modos 3 x 2, 4 x 1 y 1 x 3.

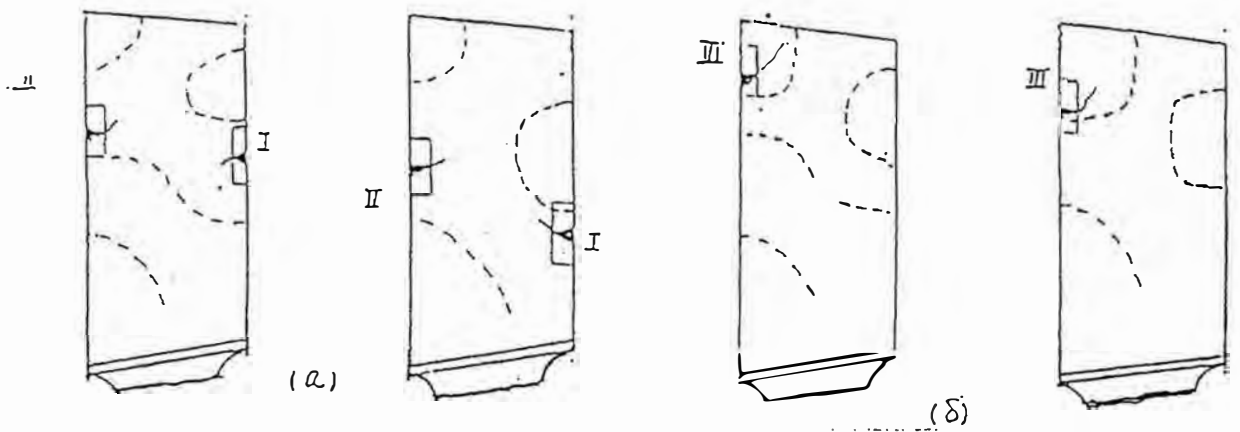


Fig. 4.7 Rotura de los álabes en diferentes zonas debido a las abolladuras permitidas límites a) Zonas de formación de las rajaduras de fatiga no desarrolladas. b) Zona de rajaduras desarrollables.



Fig. 4.8 Rotura de los álabes con abolladuras ubicadas cerca de los bordes o de la punta, con flechas se muestra la dirección del crecimiento de rajaduras.



Fig. 4.9 Rotura de los álabes debidos a la deformación de los bordes.

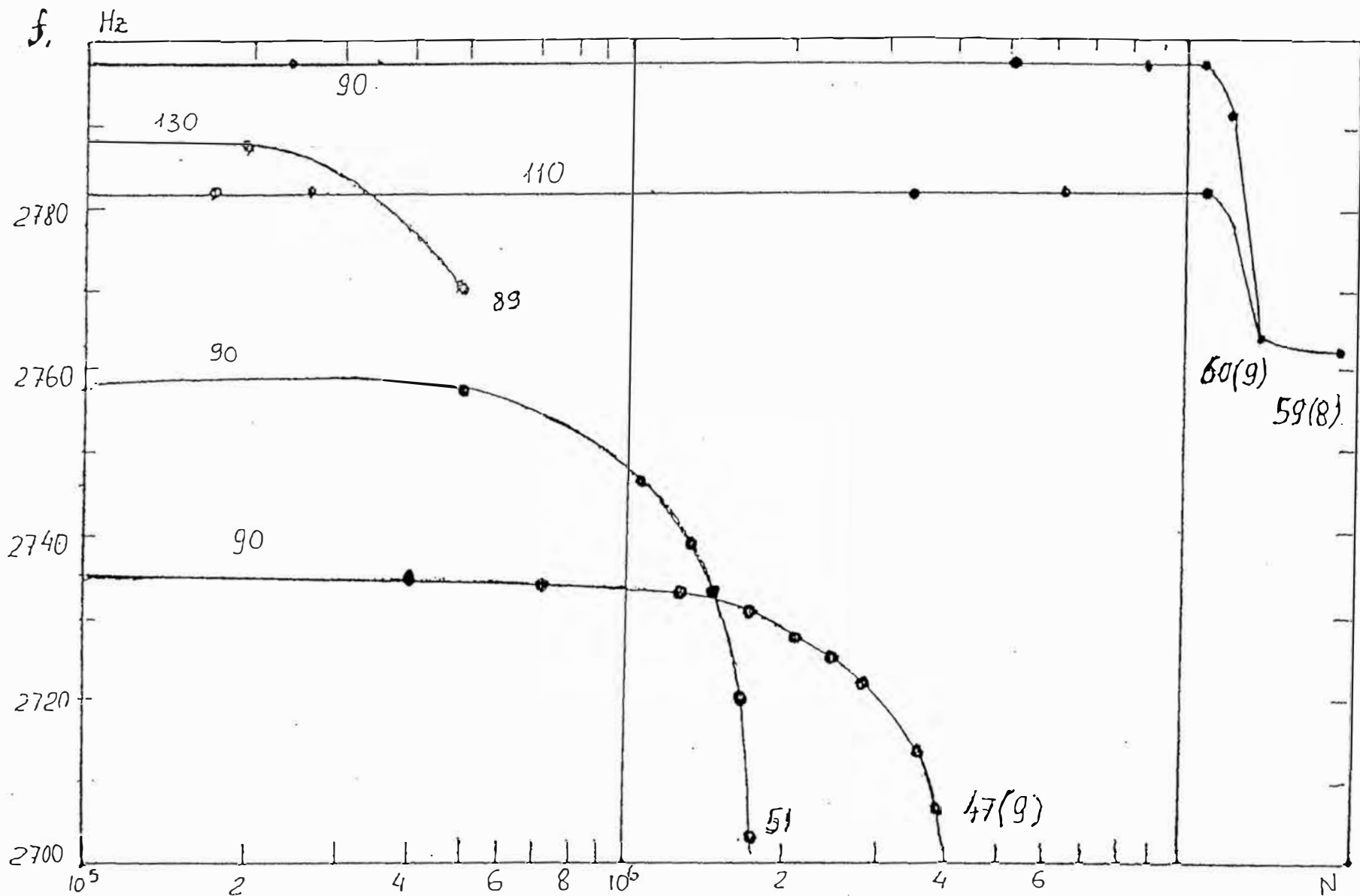


Fig. 4.10 Curvas de variación de la frecuencia de las oscilaciones naturales de los álabes durante su rotura debido a abolladuras en la zona MNT.

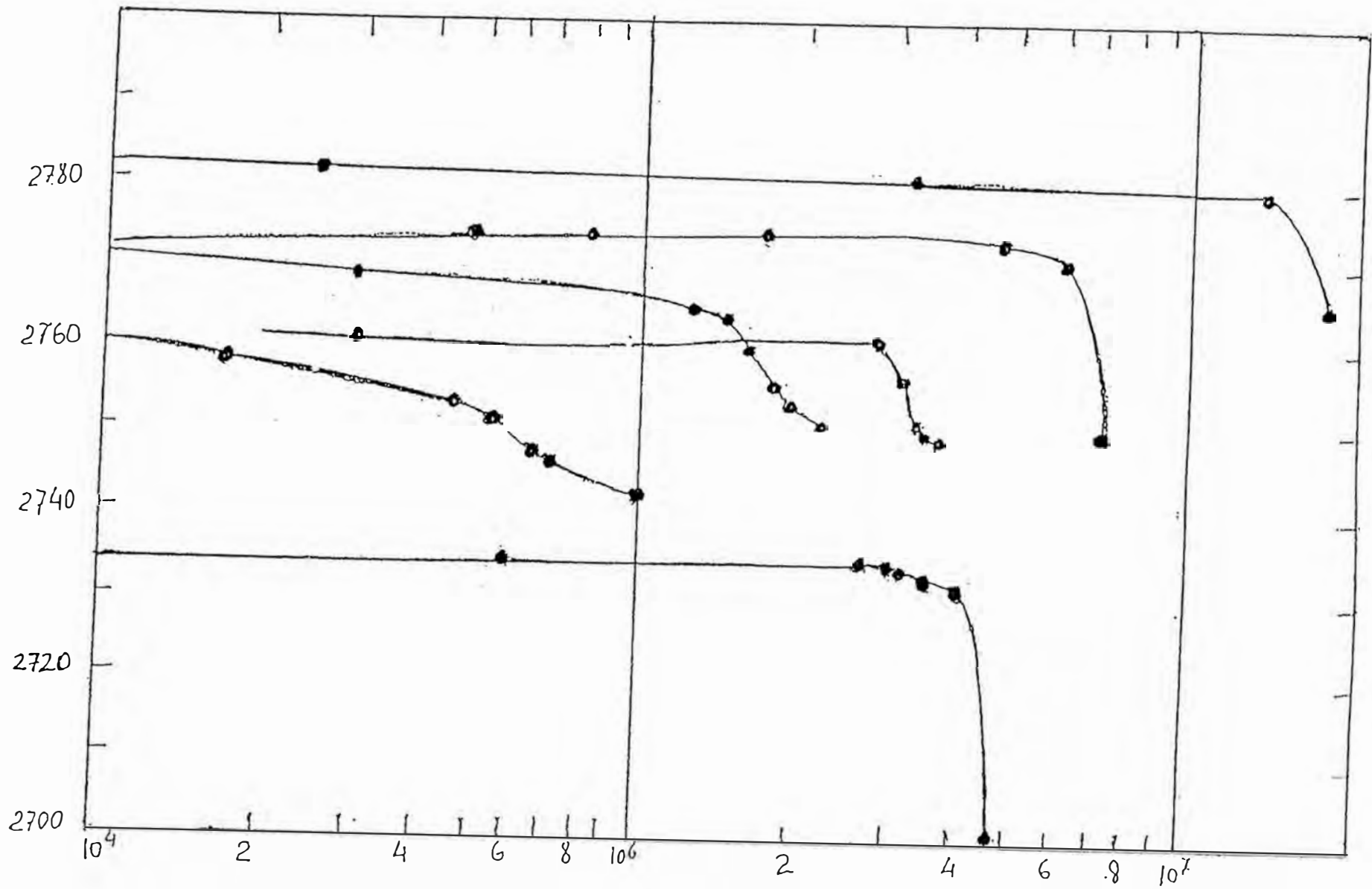
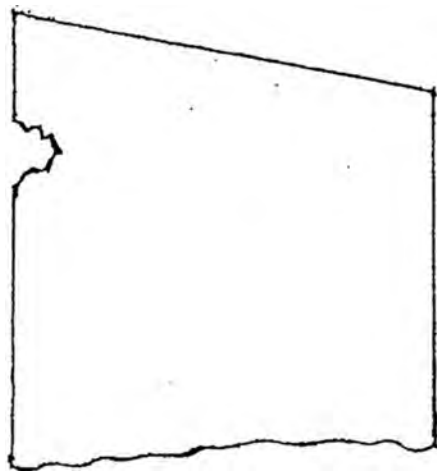
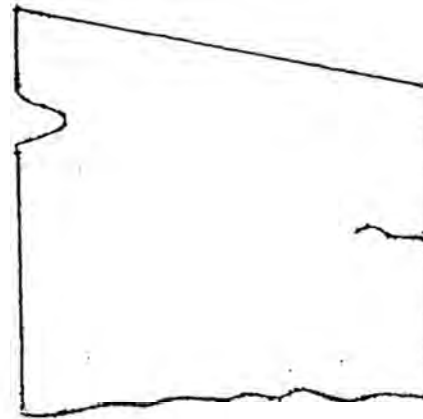


Fig. 4.11 Curvas de variación de la frecuencia de las oscilaciones naturales de los álabes durante una rotura simultánea debido a abolladuras puntiagudas y la zona MNT.



a.)



b.)

Fig. 4.12 Influencia del nivel de tensiones en el nivel de peligrosidad de las abolladuras
a - $G_h = 100 \text{ MPa}$; b. $= 160 \text{ Mpa}$.

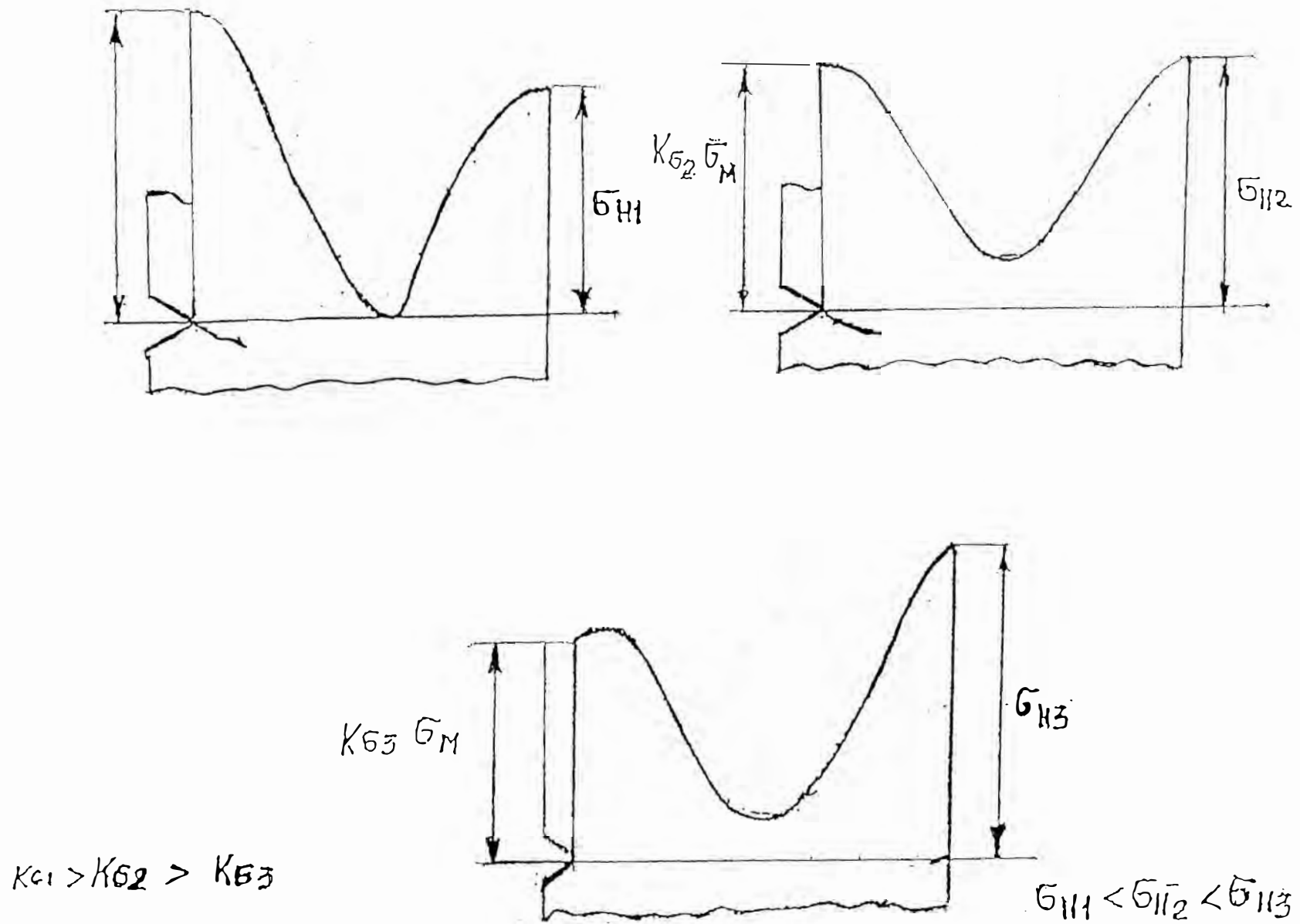


Fig. 4.13 Modelo que explica el mecanismo de formación de las rajaduras en la paleta del álabe con función del nivel de tensiones.

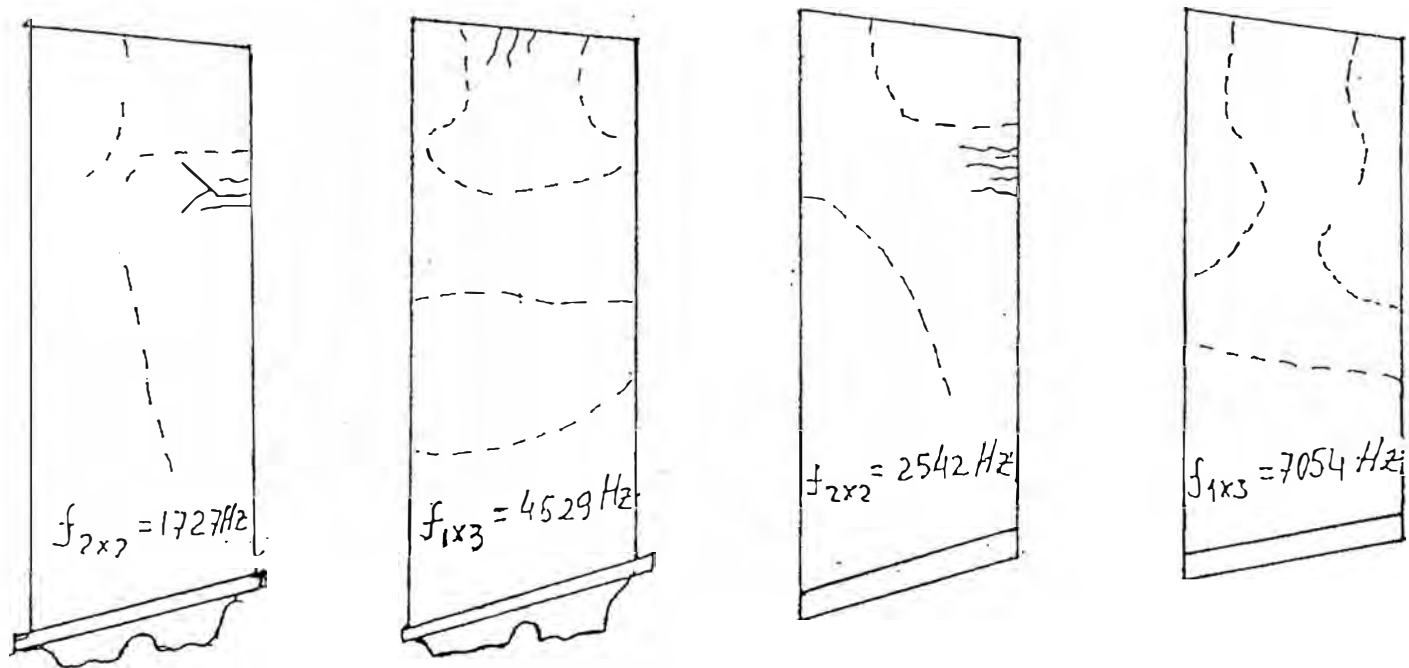


Fig. 4.14 Rotura por fatiga de álabes diferentes durante unas oscilaciones de modos iguales.

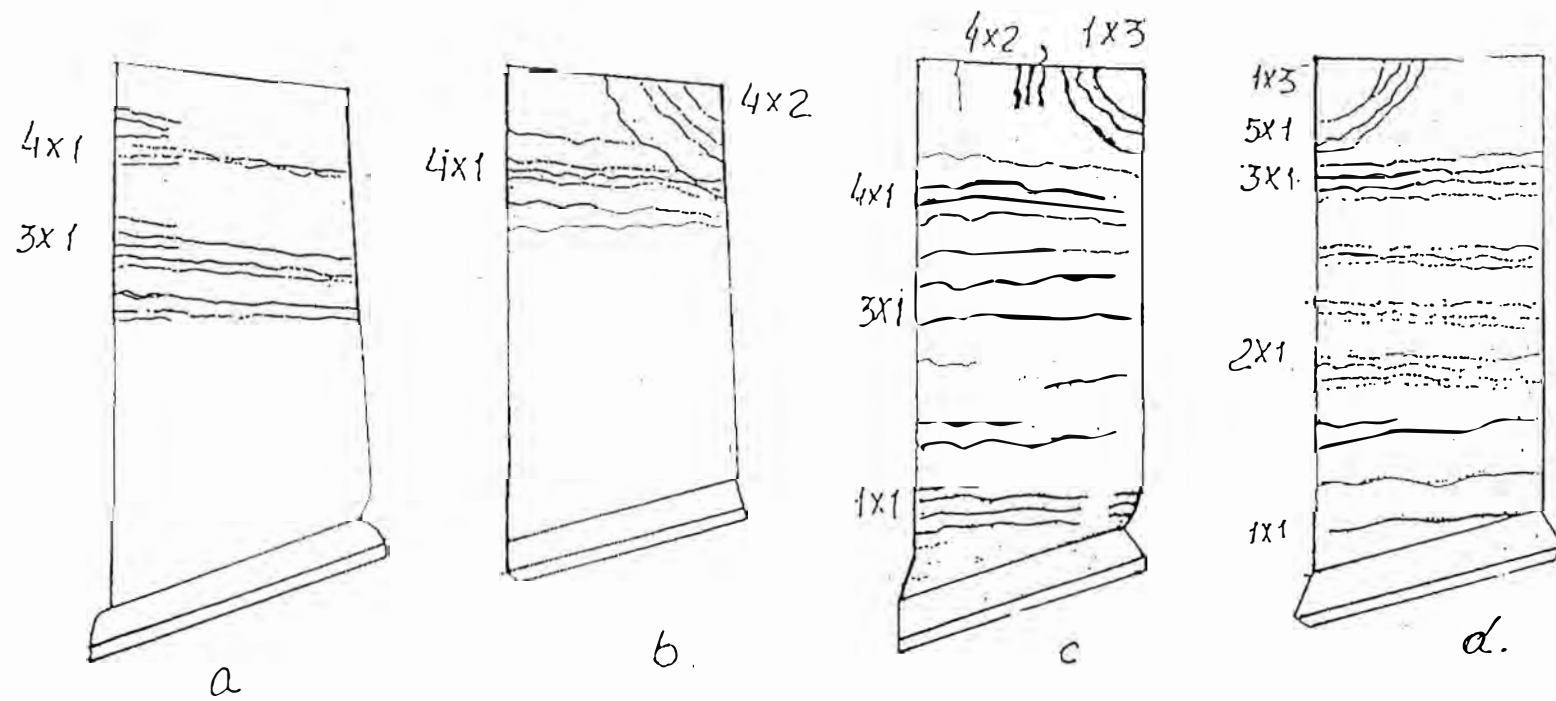


Fig. 4.15 Zonas de rotura de los álabes durante la operación. a) II etapa; b) IV etapa; c) V etapa; d) VII etapa.