

### **Inspección de motores y componentes: criterios, tolerancias, y datos especificados por el fabricante del motor.**

El espacio de tiempo entre revisiones generales (TBO) ha aumentado desde las 10 horas para el motor alemán Jumo 109-004B fabricado en 1945, hasta las más de 6.000 horas para el motor Pratt & Whitney JT3D. No debería olvidarse que entre estos períodos de revisiones mayores, a la mayoría de los motores se les requiere que pasen por una inspección de "zona caliente". Esta gran mejora en el TBO se ha conseguido principalmente por los logros significativos en el diseño del motor, en la metalurgia, en la fabricación, en las revisiones, en las inspecciones, y en los procedimientos de mantenimiento.

#### **Revisiones Generales (Overhauls)**

El TBO varía considerablemente entre los tipos de motor. Para los aviones civiles generalmente está establecido por el equipo operador y por el fabricante del motor, trabajando en conjunto con la Federal Aviation Administration (FAA). Teniendo en cuenta factores como el tipo de operación y el uso, las instalaciones para el servicio y la experiencia del personal de mantenimiento, y la experiencia total adquirida con el motor en particular. A medida que un modelo de motor específico acumula tiempo de funcionamiento y es enviado a la agencia de revisiones generales, las piezas se inspeccionan para comprobar el desgaste y/o signos de fallo inminente. Si las piezas críticas parecen estar gastándose correctamente, puede aprobarse una extensión del TBO. Uno de los factores más importantes en la determinación del tiempo entre revisiones es el uso que se le está dando al motor. Las paradas y arranques frecuentes o cambios de potencia (cambios de ciclos), necesarios en los aviones de vuelos cortos, resulta en cambios rápidos de temperatura que, como consecuencia, afectarán al TBO. En muchos motores modernos, el número de ciclos se registra automáticamente, normalmente como una función de los arranques y las paradas, o el paso por la potencia máxima.

La mayoría de los fabricantes han adoptado un sistema de marcación permanente de las piezas críticas del motor, tal como los discos de turbina y los álabes, los cuales están sujetos a deterioro a través de los límites de ciclos u horas de funcionamiento. Una pieza debe apartarse del servicio cuando quiera que bien el número de ciclos o de horas alcanza el límite máximo.

Los modernos motores de turbina de gas son caros, costando algunas versiones más de varios millones de dólares. Es esencial que los operadores en los talleres de revisiones generales mantengan unos registros completos y seguros para garantizar que un componente se desmonte o modifique cuando se requiera, y, por otra parte, que las piezas no se descarten prematuramente. Para esto, la mayoría de las piezas del motor deben ser identificables. Los métodos de marcación toman varias formas determinadas por la permanencia deseada, el tipo de material que se está marcando, y la localización de la pieza. Los métodos temporales de marcación incluyen los siguientes:

- Varias marcas de lápices de marcación (es extremadamente importante no usar ningún material que deje depósitos de plomo, cobre, zinc, o materiales similares sobre ninguna pieza de la sección caliente, ya que esto podría causar fallo prematuro debido a la carbocementación o ataque intergranular. Esto incluye lápices de grasa y plomo.)
- Tiza
- Varias marcas de tinta
- Jaboncillo

Las marcaciones permanentes deben realizarse de la siguiente forma:

- El grabado electrolítico aplicado a través de un estarcidor o con una pluma electrolítica especial (no es lo mismo que el trazador de arco eléctrico, que ha resultado ser inadecuado para el motor de turbina de gas. El grabado electrolítico no debería usarse sobre superficies anodizadas.)
- El troquelado del metal usando un martillo, prensa, o rodillo (limitado a las piezas que tienen menos de una dureza específica.)

- El martillado por vibración, que produce caracteres por medio de una vibración con herramienta de puntas curvas.
- El grabado con un cortador giratorio o muela.
- La impresión por raspado usando una herramienta de punta curva de libre rotación.
- El soplado con una sustancia abrasiva sobre un estarcidor.
- El marcado a fuego usado sobre piezas no metálicas tal como plástico, baquelita, etc.

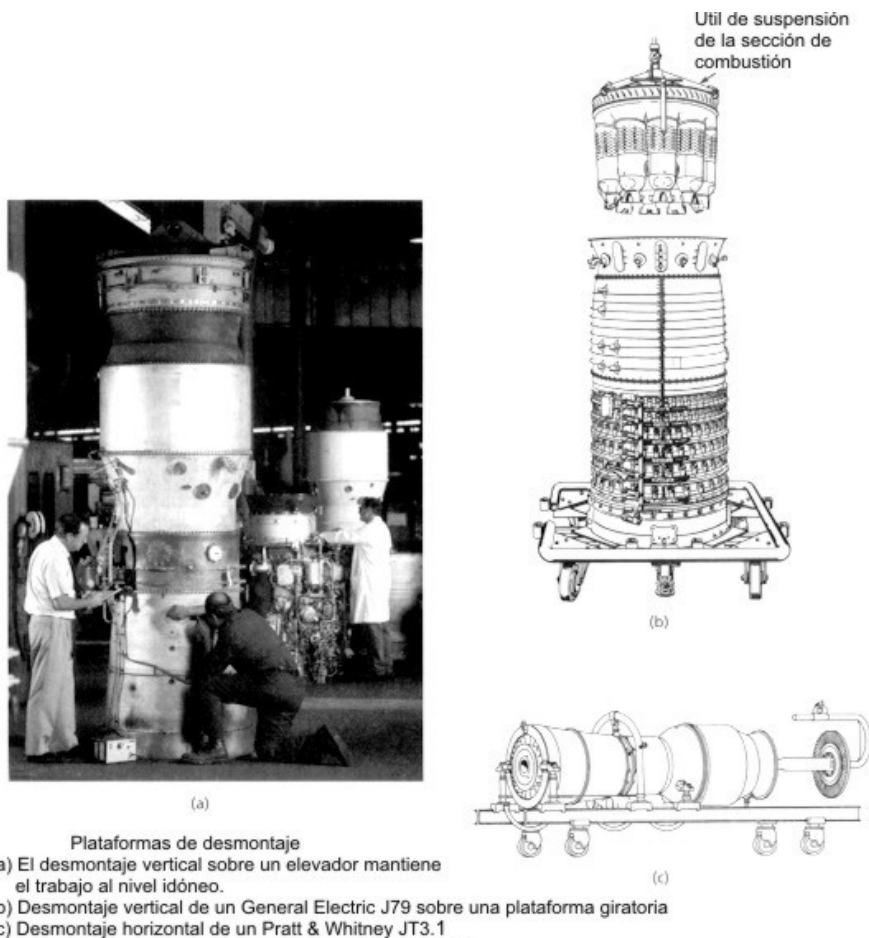
En todos los casos deben seguirse las recomendaciones del fabricante.

La revisión general del motor puede dividirse en las siguientes etapas:

1. Desmontaje
2. Limpieza
3. Inspección
4. Reparación
5. Montaje
6. Prueba
7. Almacenamiento

### Desmontaje

El desmontaje se puede llevar a cabo sobre una plataforma de desmontaje vertical u horizontal (Figura 21-12). Algunos motores pueden desmontarse usando uno u otro método, mientras que otros siguen un procedimiento particular. Después que el motor es descompuesto en sus componentes principales, muchos de los subconjuntos se instalan sobre plataformas individuales para trabajar sobre ellos posteriormente. Son necesarios una gran cantidad de



**Fig.21-12**

útiles especiales para asegurar el desmontaje sin dañar el material. Con frecuencia el conjunto de estos útiles puede costar tanto como el motor.

Cada fabricante edita un manual completo y detallado que debe seguirse, el cual da un procedimiento de desmontaje paso a paso y que también muestra donde y como usar los útiles especiales. Se incluyen los avisos y precauciones adecuadas donde son necesarios para minimizar posibles daños al personal y al motor. Para muchas piezas, tales como cojinetes y sellos de carbón, que requieren un manejo especial, se dan instrucciones especiales. Otras piezas deben volver a montarse en sus posiciones originales, por lo tanto deben etiquetarse y marcarse según sea el caso. Los sellos que no sean del tipo de carbón, no se pueden volver a usar, muchos sellos de goma están hechos para que se expandan en contacto con el combustible o el aceite. Una vez que estos tipos de sellos de goma se han desmontado, no se podrán volver a encajar en sus ranuras originales. En el proceso real de revisión, la información contenida en el manual está con frecuencia incluida en una serie de *tarjetas de trabajo*, o dentro de un programa de ordenador.

### **Limpieza**

La limpieza del motor está diseñada para llevar a cabo una serie de puntos:

1. Permitir un examen completo de los componentes en lo que respecta a defectos del uso y cambios en las dimensiones producidos por la erosión y el desgaste.
2. Eliminar los depósitos que afectan adversamente al rendimiento en el funcionamiento de las piezas del motor.
3. Preparación de las superficies para los procesos de reparación y recuperación, tal como chapado, soldadura, y pintura.
4. Eliminar los distintos revestimientos orgánicos e inorgánicos que requieren desplazamiento para la inspección de las superficies subyacentes, o eliminar los revestimientos deteriorados inadecuados para otro rodaje de motor.

La selección de los materiales de limpieza y de los procesos usados para cada pieza se determina por la naturaleza de la suciedad, tipo de metal, tipo de revestimiento, y el grado de limpieza necesario para una completa inspección y el subsecuente proceso de reparación. No a todas las piezas hay que quitarles el revestimiento hasta el metal base, ni hay que eliminar todas las manchas de las piezas chapadas. Es mas, algunas soluciones y/o procedimientos quitarán el revestimiento, atacarán a las piezas chapadas, o causarán reacciones indeseables con el metal base. Por ejemplo, el titanio no debería limpiarse con tricloroetileno u otros compuestos a partir del cloro para evitar la posibilidad de corrosión asociada con la acción de materiales que contienen cloro en áreas de ajuste prieto. Las soluciones para limpieza van desde los comúnmente usados disolventes orgánicos, tal como los lavados y pulverizados con petróleo para el desengrase y limpieza general, las soluciones de vapor desengrasante tal como el tricloroetileno, y los disolventes de carbón para los depósitos de carbón difíciles, hasta los materiales de limpieza menos familiares. La limpieza con vapor puede usarse en piezas que no requieren limpieza química o mecánica y donde no es necesario quitar los acabados de pintura y superficie. El método de limpieza con pulidora es también un método aprobado para usarse en piezas que tienen que ser inspeccionadas magnéticamente. El proceso de pulido tiende a oscurecer defectos si se usa el método de inspección de tintas penetrantes. La mayoría de estos materiales y métodos generalmente son apropiados para ser usados en la sección fría del motor. Un nuevo método de limpieza usa una corriente de agua a alta presión (hasta 55.000 psi) capaz de quitar revestimientos de cerámica de las cámaras de combustión y otras piezas revestidas.

La limpieza de la sección caliente requiere procesos que conllevan una serie de baños ácidos o alcalinos y enjuagados con agua en distintas combinaciones. El chorreo con cascadas, húmedas o secas, es otro método normalmente usado lo mismo en la sección fría que caliente del motor.

Algunas piezas, tal como cojinetes de bolas y rodillos, requieren un manejo especial. El cojinete se puede llegar a magnetizar en servicio y puede que tenga que ser desmagnetizado para limpiarle adecuadamente las partículas magnéticas. El cojinete no debe girarse durante la limpieza, y los cojinetes dobles deben permanecer como unidades.

Puesto que muchas soluciones atacarán la piel cuando se limpien las piezas, deben usarse paños de protección y dispositivos tales como gafas, guantes, delantales, cremas de manos, etc. mientras se trabaja con estos productos. En todos los casos, es imperativo seguir las recomendaciones del fabricante con relación a los materiales y procedimientos usados cuando se limpian piezas de turbinas de gas.

### Inspección

Cuando el motor está en periodo de fabricación, y durante el proceso revisión, es, por supuesto, necesario comprobar la calidad de las diferentes piezas. La sección de inspección del manual de revisión (*overhaul manual*) incluye información específica y detallada, mucha de ella obtenida a través de la experiencia operativa, resaltando si una pieza puede admitir reparación o no y hasta que punto, así como una tabla de límites dimensionales máximos y mínimos con la que cada pieza debe cumplir. Las áreas críticas especiales son advertidas al personal de revisión. Los límites de tiempo y/o ciclos se comparan con los límites de vida de piezas tales como los álabes y discos de compresor y turbina, y se guardan registros exactos de todos los trabajos realizados. El proceso de inspección puede dividirse en dos grupos amplios: no – dimensional y dimensional.

### Inspección no – dimensional

Los métodos de inspección no – dimensional incluyen el uso de partículas fluorescentes y no – fluorescentes que contienen polvo de óxido de hierro para aquellas piezas que pueden magnetizarse, y tinturas penetrantes fluorescentes y no – fluorescentes para las que no se pueden magnetizar. Pueden usarse aparatos de vibraciones ultrasónicas para detectar grietas ocultas, y los rayos X se emplean para las piezas críticas. Incluido en este método se encuentra la inspección ocular para comprobar el estado general. La inspección no – dimensional continuará incluso después de que el motor está montado por medio del uso de los boroscopos, como los mostrados en las figuras 21-8 y 21-9, o usando píldoras radioactivas de iridio 192 colocadas en el centro del motor y envolviendo con una película el cárter para comprobar la deformación (*warping*) de los álabes guías de entrada en turbina.

### Inspección dimensional

La inspección dimensional incluye el uso de herramientas mecánicas de medición, tales como micrómetros, palpadores, y otros medidores y sondas especiales, así como útiles que usan la luz, el sonido, o la presión del aire como medio de medición.

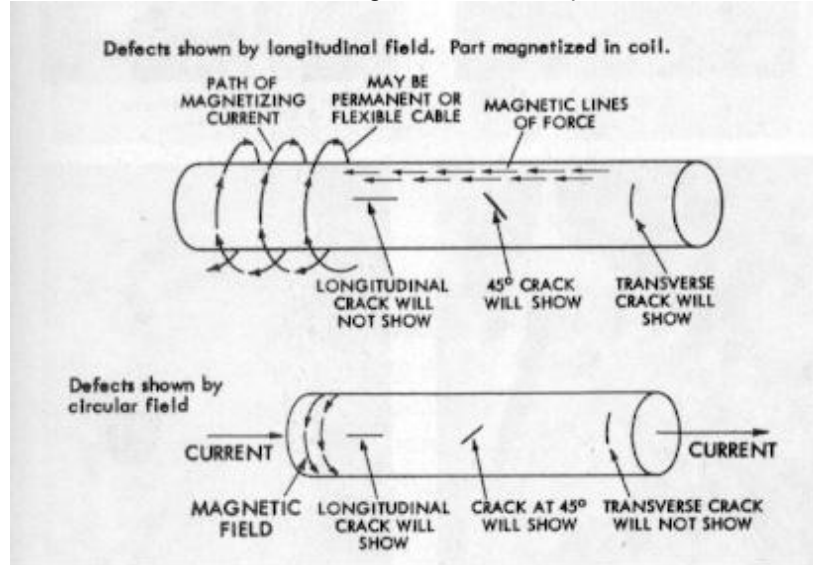


**Fig. 21-13**

Una típica máquina de prueba por partículas magnéticas

La inspección por partículas magnéticas (fig. 21-13) es un método no – dimensional de comprobación de grietas en superficie o bajo la superficie de materiales ferrosos magnetizables. Cuando una pieza se magnetiza al pasar una corriente a través de ella o colocándola en un campo magnético, las dos paredes de cualquier grieta en la pieza que se está comprobando se convierten en polos secundarios débiles. Si la pieza está inmersa en una solución que contiene finas partículas magnéticas de óxido de hierro, o si se hace fluir esta solución sobre la pieza, las partículas suspendidas tenderán a concentrarse a lo largo de las paredes de la grieta. La grieta quedará indicada por una línea oscura, si la suspensión también contiene partículas fluorescentes, la grieta se resaltarán como una línea brillante (normalmente amarillo verdoso) cuando se visualiza bajo una lámpara ultravioleta. Cada pieza a comprobar debe

magnetizarse usando una corriente de magnitud correcta aplicada en una dirección específica



**Fig. 21-14**

Las grietas se mostrarán mejor cuando están alineadas con el flujo de corriente y en ángulos rectos con el campo magnético.

(un proceso llamado magnetización circular o longitudinal) de manera que las líneas de flujo magnético pasarán a través de una sospechada grieta en ángulos rectos (fig. 21-14). Se presta atención particular a las protuberancias, pestañas, orejetas, rebordes, estriados, dientes, u otras áreas intrincadas. Es necesaria cierta habilidad para interpretar adecuadamente las indicaciones. Tras la comprobación, la pieza debe desmagnetizarse completamente haciéndola pasar lentamente a través de una bobina en la cual fluye corriente alterna. La desmagnetización completa es importante, y puede comprobarse usando un indicador de campo magnético o una brújula de buena calidad. Generalmente los procedimientos específicos están resaltados en el manual de revisión (*overhaul manual*). Los cojinetes no deben inspeccionarse nunca usando este método debido a la dificultad de desmagnetización.

La inspección por tintas penetrantes es un método no destructivo de comprobación de materiales no – magnetizables tal como el aluminio y el magnesio pero solo para grietas e imperfecciones en superficie. Aunque este proceso se desarrollo para materiales no – ferrosos, también puede usarse ventajosamente en productos hechos de hierro. Ya que este es un tratamiento de superficie, es esencial tener la superficie completamente limpia y libre de pintura. Un tinte penetrante, que puede o no puede ser fluorescente, se pinta o pulveriza sobre la pieza. Luego se lava la superficie y se aplica un revelador que sacará al penetrante desde el defecto. Las grietas aparecerán como líneas oscuras, o líneas brillantes por el material fluorescente, cuando se visualiza bajo la luz ultravioleta. Otra vez, igual que con la inspección magnética, es necesario cierto grado de habilidad para interpretar y evaluar las indicaciones.

La inspección visual juega un papel importante en la revisión del motor de turbina de gas. A continuación se exponen algunas casos que se pueden encontrar y sus causas.

**Abrasión** (*abrasion*) Un área basta. Pueden describirse distintos grados de abrasión tanto ligeros como acusados, dependiendo de la amplitud del reacondicionamiento requerido para restaurar la superficie. La causa habitual es la presencia de material extraño fino interpuesto entre superficies en movimiento.

**Arqueo** (*bend/bow*) Distorsión general en la estructura que se distingue por un cambio local de la forma. Las causas habituales son aplicación desigual del calor, excesivo calor o presión, o fuerzas concretas bajo cargas.

**Abultamiento** (*blistering*) Áreas levantadas que indican separación de la superficie desde la base. Encontrado normalmente en superficies chapadas o pintadas. Asociado con escamado o decapado. La causa habitual es una unión imperfecta con la base, normalmente agravada por la presencia de humedad, gas, calor, o presión.

**Rotura** (*break*) Separación completa en dos o mas trozos por la fuerza. Las causas habituales son la fatiga o carga repentina.

**Brinelado** (*brinelling*) Marcaciones encontradas algunas veces sobre la superficie de piezas de cojinetes de bolas o rodillos. Las causas habituales son técnicas inadecuadas de montaje o desmontaje de los cojinetes de bolas o rodillos, por la aplicación de fuerza sobre la pista libre.

Nota: los cojinetes que no tienen una rotación completa constante y están sujetos a cargas repentinas, tal como durante el transporte, tienen tendencias al brinelado.

**Combado** (*bulge*) curvatura o protuberancia hacia el exterior. La causa habitual es excesiva presión o debilitación debida al exceso de calor.

**Quemadura** (*burning*) Daño causado a las piezas por excesivo calor. Indicado por una decoloración característica o en casos severos, por una pérdida u ondulación del material. Las causas habituales son el excesivo calor debido a la falta de lubricación, inadecuada holgura, o distribución anormal de la llama.

**Bruñido** (*burnishing*) Alisado mecánico de la superficie de un metal por frotamiento, no va acompañado de eliminación de material, pero algunas veces conlleva decoloración alrededor de los bordes exteriores del área. El bruñido operacional no es perjudicial si cubre aproximadamente el área que porta la carga y siempre que no haya evidencia de acumulación o quemadura. La causa habitual es el funcionamiento normal de las piezas.

**Rebarba** (*burr*) Proyección cortante o borde áspero. Las causas habituales son desgaste excesivo, golpeteo, u operación de mecanizado.

**Roce** (*chafing*) Acción de frotamiento entre piezas que tienen movimiento relativo limitado. Interpretétese como una acción que produce una condición de la superficie más bien que la descripción de un daño.

**Desconchado** (*chipping*) desprendimiento de pequeños trozos de metal. No confundirlo con el escamado. La causa habitual es una concentración de carga debida a muesca, arañazo, inclusión, golpeteo, o manejo descuidado de las piezas.

**Corrosión** (*corrosion*) Descomposición de una superficie por la acción química. La causa habitual es la presencia de agentes corrosivos.

**Grietas** (*craks*) Fractura parcial. La causa habitual es excesivo esfuerzo debido a una sobrecarga repentina, extensión de un corte o arañazo, o sobrecalentamiento. Una grieta de ruptura por esfuerzo puede aparecer a lo largo del borde de ataque y/o borde de salida de los álabes rotatorios y de estator de turbina en ángulo recto al borde debido al proceso llamado fatiga de bajo ciclo.

**Abolladura** (*dent*) Hoyo pequeño suavemente redondeado en la superficie. Las causas habituales son las sobrecargas concentradas resultantes del golpeteo, la presencia de partículas entre superficies sometidas a cargas, o los impactos sobre las piezas.

**Acción electrolítica** (*electrolytic action*) Descomposición de las superficies por el intercambio de electrones entre piezas construidas de distintos metales. La causa habitual es la acción galvánica entre metales diferentes.

**Erosión** (*erosion*) Eliminación de material por el flujo de gases calientes, polvo de arena, o agentes químicos. Véase **surcos**. Las causas habituales son flujo de líquidos corrosivos, gases calientes, o aceite con polvo de arena.

**Fallo por fatiga** (*fatigue failure*) Pérdida progresiva de resistencia de una o mas áreas locales que están debilitadas, tal como marcas de herramientas, mellas pronunciadas, grietas diminutas, o inclusión, sometidas a cargas repetidas. A medida que la carga de trabajo sobre la pieza se repite, las grietas se desarrollan, al final se presentan las altas concentraciones de esfuerzos. Las grietas se extienden, normalmente desde la superficie, o cerca de la superficie de la zona. Tras un tiempo, queda tan poco metal sano que la carga normal es mayor que la resistencia del material restante, y la pieza quiebra. El fallo no es debido a la cristalización del metal, como muchos mecánicos creen. La aparición de un fallo por fatiga típico se explica fácilmente. A medida que el fallo se desarrolla las superficies separadas rozan y chocan una con otra, machacando los granos del material y produciendo una apariencia mate o lisa; la porción sin fracturar restante conserva la estructura granular normal hasta el momento del fallo. La naturaleza progresiva del fallo, normalmente está indicada por varias líneas mas o menos concéntricas, de cuyo centro o foco, se revela el punto original o línea de fallo. Las causas habituales son marcas de herramientas, esquinas pronunciadas, mellas, grietas, inserción, roce, corrosión, o insuficiente apriete de los elementos de fijación para obtener el adecuado alargamiento.

**Escamado** (*flaking*) Desprendimiento de trozos de una superficie chapada o pintada. Las causas habituales son incompleta adherencia, excesiva carga, o abultamiento.

**Corrimiento** (*flowing*) Esparcimiento de una superficie pintada o chapada. Normalmente acompañado por escamado. Las causas habituales son incompleta adherencia, excesiva carga, o abultamiento.

**Fractura** (*fracture*) Véase rotura y roce.

**Desgaste por corrosión** (*fretting corrosion*) Decoloración que puede ocurrir sobre superficies que están apretadas o atornilladas juntas bajo alta presión. En las piezas de acero el color es marrón rojizo y algunas veces le llaman "chocolate" o "sangre". En el aluminio o el magnesio, el oxido es negro. La causa habitual es el restregado de partículas finas de metal producido por ligero movimiento entre las piezas y consecuente oxidación de estas partículas

**Devastado** (*galling*) Transferencia de metal de una superficie a otra. La causa habitual es un fuerte roce o acción de desgaste originado durante el funcionamiento del motor por un ligero movimiento relativo de dos superficies sometidas a alta presión de contacto. No confundir con arrollado, rascado, desgarrado, o rayado.

**Vidriado** (*glazing*) Desarrollo de una zona dura y brillante sobre las superficies de los cojinetes. Condición con frecuencia beneficiosa. La causa habitual es una combinación de presión, aceite, y calor.

**Desgarro** (*gouging*) Desplazamiento del material de una superficie por la acción de corte o rasgado. La causa habitual es la presencia de cuerpos extraños relativamente grandes entre piezas en movimiento.

**Acanaladura** (*grooving*) Surcos redondeados y suaves, como marcas de rasgado cuyos afilados bordes han sido pulidos. Las causas habituales son desgaste concentrado, movimiento relativo de las piezas anormal, o piezas fuera de alineado.

**Inclusión** (*inclusion*) Material extraño en el metal. La inclusión en superficie está indicada por motas o líneas negras. La causa habitual es una discontinuidad en el material. Las inclusiones de superficie y próximas a la superficie pueden detectarse durante la inspección magnética por agrupamiento de las partículas magnéticas. El examen de una fractura por fatiga puede revelar una inclusión en el punto focal.

**Surcos** (*guttering*) Erosión concentrada y profunda. La causa habitual es el alargamiento de una grieta o defecto por quemadura debida a llama o gases calientes.

**Muesca** (*nick*) Marca pronunciada causada por impacto de una pieza contra otro objeto metálico. Las causas habituales son descuido en el manejo de las piezas o herramientas antes o durante el montaje, o arena o partículas extrañas finas dentro del motor durante el funcionamiento.

**Golpeteo** (*peening*) Deformación de la superficie. La causa habitual es el impacto de un objeto extraño como el que ocurre cuando se golpea repetidas veces con un martillo sobre una pieza.

**Arrollado** (*pickup*) Rodado del metal o transferencia de metal de una superficie a otra. Las causas habituales son el roce de dos superficies sin suficiente lubricación, la presencia de partículas de polvo entre las superficies bajo presión durante el montaje, piezas prietas con los bordes no dañados, o incipiente agarrotamiento de las piezas en rotación durante el funcionamiento.

**Acumulado** (*pileup*) Desplazamiento de partículas en una superficie desde un punto a otro. Se distingue del arrollado por la presencia de depresiones en el punto desde el cual el material ha sido desplazado.

**Picadura** (*pitting*) Pequeñas cavidades de forma irregular en una superficie de la cual el material ha sido eliminado por corrosión o desconchado. La picadura corrosiva normalmente está acompañada por un depósito formado por un agente corrosivo sobre el material base. Las causas habituales de la picadura corrosiva son destrucción de la superficie por la oxidación o agente químico, o por la acción electrolítica. Las causas habituales de la picadura mecánica son las superficies desconchadas debido a sobrecargas o inadecuada holgura, o la presencia de partículas extrañas.

**Rascado** (*scoring*) Arañazos profundos hechos durante el funcionamiento del motor por bordes pronunciados o partículas extrañas; marcas profundas alargadas. La causa habitual es la presencia de partículas entre superficies cargadas que tienen, movimiento relativo.

**Arañazos** (*scratches*) Marcas poco profundas y estrechas causadas por el movimiento de objetos o partículas ásperas a través de una superficie. Las causas habituales son descuidos en el manejo de las piezas o herramientas antes o durante el montaje, o arena o partículas extrañas finas dentro del motor durante el funcionamiento.

**Esfuerzos** (*Stresses*) Cuando se usa en la descripción de la causa del fallo de las piezas de una máquina, los esfuerzos generalmente se dividen en tres grupos – compresión, tracción, y cortadura. Estas fuerzas se describen como sigue:

**Compresión** Acción de dos fuerzas opuestas directamente que tienden a oprimir una pieza.

**Tracción** Acción de dos fuerzas opuestas directamente que tienden a separar una pieza.

**Cortadura** Acción entre dos fuerzas opuestas y paralelas.

La inspección es una parte vital de la revisión general del motor. Sin una inspección de calidad, no tienen sentido los otros procedimientos de la revisión.

### Reparación

Todas las piezas de motor utilizables (*serviceable*) deben repararse usando métodos aprobados por el fabricante. Las técnicas de reparación varían ampliamente. La soldadura se usa extensamente, con frecuencia en la reparación de las cámaras de combustión y otras



piezas del motor se emplea este método. Tras la soldadura, puede ser necesario tratar con calor a la pieza para eliminar las cargas inducidas por la soldadura y restaurar las propiedades originales del metal.

Otras piezas pueden restaurarse a sus dimensiones originales por medio de chapado. El rechapado por medios electroquímicos o endurecimiento de superficie con capas de plasma pulverizado o con capas de detonación de llama se usa para construir bujes y discos, y para proteger las piezas del motor que rozan una con otra. Por ejemplo, a los conductos de salida de la cámara de combustión en muchos motores se les permite un movimiento limitado para compensar la dilatación a medida que la temperatura del motor cambia. Los métodos de reparación conllevan operaciones de todo tipo, incluyendo esmerilado, armonización, y otros procesos abrasivos como trabajo en torno, taladrado, enderezado, pintura, etc.. Sí el motor contiene remaches, estos se reparan o sustituyen según se requiera. Los casquillos que se encuentran en la sección de accesorios y en otras piezas del motor se cambian si es necesario. Si algunos orificios roscados están pasados, se reparan taladrando, pasando la terraja, e insertando un casquillo roscado, un perno de sobremedida, o un helicoid.

De nuevo, el manual de revisión da un procedimiento de reparación detallado y aprobado que debe seguirse para asegurar una vida en servicio o tiempo entre revisiones razonables.

### Reparación del Compresor

El alcance de las reparaciones de los álabes del compresor permitido por el fabricante del motor se describe en detalle en el manual de servicios del motor (Engine Service Manual).

Los álabes se inspeccionan, y el daño se evalúa para determinar si está dentro de los límites de reparación permitidos. Si es excesivo, el módulo del compresor debe enviarse al fabricante o a una empresa de revisiones autorizada para ser reparado.



Fig. 21-15

Reparación de álabe de compresor

Los daños del tipo como el mostrado en la figura 21-15, que están dentro de los límites permisibles, pueden repararse por armonización. El daño se quita con una lima de joyero de corte fino, movida paralela a la longitud del álabe, y luego las marcas de la lima se eliminan con una piedra abrasiva fina. Un área adecuadamente armonizada debe estar tan suave como la porción sin dañar del álabe.

Los puntos de corrosión pueden quitarse con una lima fina, y las marcas de la lima pueden quitarse con papel de lija fino. Si los álabes están doblados, no los enderece; en su lugar, envíese el módulo de compresor para que se le efectúe una reparación mayor.

### Daños Típicos a los Elementos del Compresor

**Arqueo (Bow):** Álabe doblado ocasionado por objetos extraños.

**Quemadura (Burn):** Daño en la superficie con evidencia de decoloración originado por excesivo calor.

**Rebarba (Burr):** Borde desigual o mellado provocado por la acción del esmerilado o corte.

**Corrosión (Corrosion):** Picaduras y fallos en la

superficie causados por un ambiente corrosivo.

**Grieta (Crack):** Separación o fractura parcial motivado por esfuerzo excesivo debido a golpe, sobrecarga, o fallo de fabricación..

**Termofluencia** (*Creep*): Alargamiento de un álabe ocasionado por un calor excesivo y/o continuado y por la fuerza centrífuga.

**Abolladura** (*Dent*): Hoyuelo pequeño suavemente redondeado originado por el impacto con un objeto contundente.

**Rozadura** (*Gall*): Transferencia de metal de una superficie a otra provocada por un fuerte roce.

**Arrollamiento** (*Gouging*): Desplazamiento de material de una superficie; corte o desgarro causado por la presencia de un cuerpo extraño comparativamente grande entre dos piezas en movimiento.

**Muesca** (*score*): Arañazo profundo motivado por la presencia de partículas entre las superficies.

**Arañazo** (*scratch*): Marca estrecha superficial ocasionada por arena o partículas extraña entre las superficies.

### Inspección de la Sección Caliente

La sección caliente de un motor de turbina es el corazón del sistema. Es esta sección y sus componentes la que extrae la energía del flujo de gas a alta presión y extremadamente caliente.

La sección caliente consta de los inyectores de combustible, las cámaras de combustión, los álabes guías de entrada en turbina, los rotores de turbina y sus álabes, y el sistema de escape. Estos componentes están diseñados y construidos para extraer la máxima cantidad de energía del combustible, y cualquier daño o distorsión disminuirá el rendimiento del componente y del sistema lo suficiente para perjudicar la actuación del motor.

Las inspecciones de la sección caliente normalmente se requieren basándose en horas o ciclos de funcionamiento, pero en cualquier momento que la EGT se haga excesiva, debería efectuarse una inspección de sección caliente.

Normalmente la inspección de la sección caliente puede efectuarse con el motor montado en el avión. Esencialmente consiste en los siguientes puntos:

- Revisar los registros operativos del motor durante el período inmediato anterior a la inspección por si hubiese indicación de arranques calientes, arranques colgados, despegues que conlleven condiciones de sobretemperatura o sobrevelocidad, o fluctuaciones en la presión de aceite o del combustible.
- Conéctense instrumentos de prueba exactamente calibrados, y ruédese el motor para comprobar su actuación real. Regístrense los resultados.
- Síganse las instrucciones del fabricante al detalle, y utilícese las herramientas adecuadas para desmontar la sección de potencia del motor.
- Desmóntense las bujías y los inyectores. Compruébese el espectro del flujo de los inyectores y límpiense si el espectro no es el especificado en el manual de mantenimiento del motor. Un inyector de combustible parcialmente obstruido será causa de manchas calientes localizadas en la cámara de combustión.
- Desmóntese la cámara de combustión e inspecciónese por grietas e indicación de manchas calientes localizadas. Si existen grietas que exceden el límite permisible, la cámara tendrá que ser reparada por un equipo autorizado por el fabricante del motor.
- Desmóntese el anillo de álabes guías de entrada en turbina, y cuidadosamente examínese el estado de todos los álabes guías.
- Mídase la holgura entre la punta de los álabes de turbina y el alojamiento, y la holgura entre el disco de turbina y el cono de escape; ambas medidas son críticas.

- Desmóntese la rueda de turbina, y examínense todos los álabes por si hubiese trazas de daños y erosión en las puntas. Las grietas de ruptura por esfuerzo que aparecen perpendiculares a los bordes de ataque y salida son uno de los tipos de daño más comunes. La ondulación de los bordes de ataque o salida es una indicación de sobretemperatura. Las ruedas de turbina dañadas no pueden repararse al nivel de campo, pero pueden repararse en talleres autorizados especializados en este tipo de trabajo.

Cuando todas las piezas dañadas se han reparado o se va instalar un módulo de sustitución, compruébense las piezas de sustitución cuidadosamente, y móntese el motor. Hágase un rodaje de calibración con la misma instrumentación de prueba usada en el rodaje de preinspección. Esta nueva información compara los parámetros actuales con los anteriores a la inspección y proporciona una nueva línea de partida a utilizar en el control de la tendencia (*Trend Monitoring*).

Las siguientes indicaciones son importantes cuando se trabaja en la sección caliente de un motor:

- Cuando desmonte el motor, marque la posición de las piezas con el tipo de marcador aprobado para este propósito. Los marcadores con punta de fieltro son aceptables, pero nunca use un lápiz de plomo, de cera o grasa. El carbón del grafito, la grasa o la cera se funde en el metal caliente haciéndolo quebradizo y siendo causa de grietas.
- Sustituya todos los elementos, tales como juntas y frenos, especificados por el fabricante del motor. Use solo componentes nuevos, preparados e instalados de acuerdo con las instrucciones en el manual de servicios.
- Siga al detalle el manual de servicios del fabricante del motor cuando realice cualquier inspección. El daño permisible varía de un modelo de motor al siguiente. Solo deberían efectuarse reparaciones específicamente permitidas por el fabricante.
- Cuando envíe ruedas de turbina al fabricante del motor o a una empresa de revisiones autorizada, asegúrese de usar el contenedor de transporte correcto para esa rueda en particular. Estas ruedas son extremadamente caras y pueden dañarse fácilmente debido a una manipulación descuidada durante el transporte.

### **Consideraciones en la Reparación**

La alta precisión con que están contruidos los motores de turbina y las altas temperaturas a las que funcionan exige reparaciones de máxima calidad. Los técnicos no están autorizados bajo ninguna justificación a desviarse de los procedimientos detallados en los manuales de mantenimiento proporcionados por el fabricante del motor y aprobados por la FAA y la JAR.

Es extremadamente importante que todos los elementos de fijación roscados en un motor de turbina estén adecuadamente torquados y frenados. Aquí, consideraremos la importancia de los torquímetros (llaves dinamométricas) y observaremos algunos requisitos para un adecuado frenado con alambre.

### **Torquímetros**

La precisión con que está construido un motor de turbina y la enorme cantidad de potencia desarrollada por dispositivos de tan poco peso hace obligatorio que cada elemento de fijación este apretado al par de torsión exacto especificado por el fabricante. Para obtener el máximo esfuerzo de un elemento de fijación roscado, la carga aplicada a las roscas debe ser mayor que la carga máxima aplicada a la unión.

Si un elemento de fijación roscado no falla mientras se le está dando el apriete, no fallará durante el funcionamiento en servicio. Mientras se le está dando el apriete, el elemento de

fijación está sujeto a ambos esfuerzos, el de torsión y el de tracción. Tras la instalación, solo queda sujeto al esfuerzo de tracción.

Los torquímetros son herramientas de precisión y deben tratarse con cuidado. Compruébese su calibración dentro de un programa regular comparándolo con un patrón, cuya exactitud está controlada por el National Institute of Standards and Technology (NIST).

A menos que se diga lo contrario en el manual de servicio, los valores especificados de apriete son para roscas limpias y secas. Cuando se requieren roscas lubricadas, se especificará el tipo y cantidad de lubricante.

Existen algunas aplicaciones en las que una serie de elementos de fijación deben apretarse en una cierta secuencia y a un bajo valor especificado, y luego reapretado a un valor más alto final. Siga cuidadosamente el manual de servicios cuando se especifiquen instrucciones especiales tal como esta.

Cuando use un torquímetro de salto o micrométrico, deje de tirar tan pronto como la llave salte. La acción del salto es una indicación de que se ha alcanzado el apriete deseado, pero esto no impide seguir tirando y aplicar mas apriete.

Algunas aplicaciones miden el apriete aplicado a un elemento de fijación roscado midiendo la cantidad que la tuerca gira después de hacer contacto con su superficie de apoyo. El apriete medido por este método no está afectado por el apriete real de la tuerca, o por la lubricación o falta de lubricación de las roscas.

Hay veces que es necesario usar adaptadores especiales en un torquímetro. Cuando se usan adaptadores tales como los de las figuras 21-16, puede calcularse la indicación del torquímetro necesaria para obtener el apriete específico en el adaptador usando la formula adecuada.

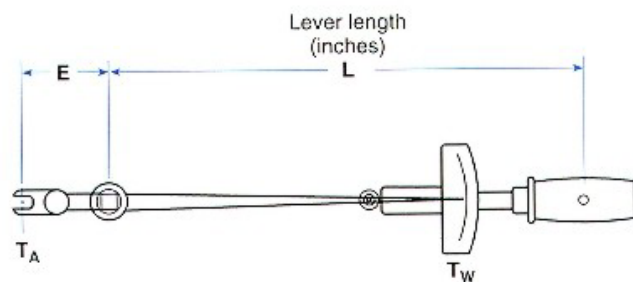


Fig. 21-16 El adaptador alarga el brazo de la llave

Cuando se usa un adaptador que añade longitud al brazo del torquímetro, la indicación necesaria del torquímetro para un apriete específico en el adaptador se calcula usando la formula:

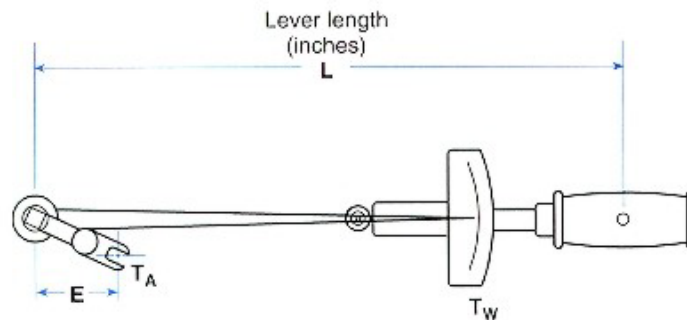
$$T_W = \frac{T_A \cdot L}{L + E}$$

$T_W$  = Apriete indicado en el torquímetro.  
 $T_A$  = Apriete aplicado en el adaptador.  
 $L$  = Longitud de palanca del torquímetro.  
 $E$  = Brazo del adaptador.

Cuando el adaptador acorta el brazo del torquímetro, la indicación necesaria para el apriete específico en el adaptador se calcula usando la formula:

$$T_W = \frac{T_A \cdot L}{L - E}$$

$T_W$  = Apriete indicado en el torquímetro.  
 $T_A$  = Apriete aplicado en el adaptador.  
 $L$  = Longitud de palanca del torquímetro.  
 $E$  = Brazo del adaptador.



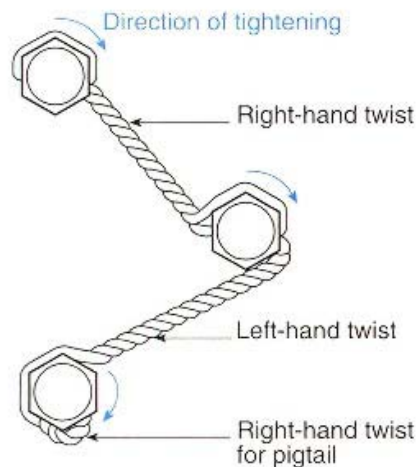
**Fig. 21-17 Este adaptador acorta el brazo de la llave**

**Frenado con Alambre**

El efecto de la vibración sobre la estructura ligera de peso usada en un avión y sus motores hace que el frenado de todos los elementos de fijación sea una función importante del mantenimiento en aviación. Los principios del frenado con alambre son bastante simples, pero la habilidad se desarrolla solo con la práctica. En la figura se muestra uno de los procedimientos más comúnmente usados.

Las siguientes son algunas reglas básicas del frenado que deben observarse:

- Antes de frenar un elemento de fijación, asegúrese de que está adecuadamente torqueado.
- Asegúrese de usar el método de frenado especificado en el manual de mantenimiento del motor. Cuando se especifica el frenado con alambre, debe usarse el tipo y tamaño de alambre requerido.
- Instálese el alambre de manera que siempre tire del elemento de fijación en la dirección de apriete. Esto evitará que el elemento de fijación se gire en sentido contrario si acaso se aflojase.
- Dirija el alambre alrededor del exterior del elemento de fijación de manera que pase por debajo del alambre que sale del orificio de frenado. Esto hace que la vuelta alrededor del elemento de fijación permanezca ajustada y evita que el alambre se afloje. La dirección del trenzado debería cambiarse de tramo a tramo, o de tramo a remate.
- Asegúrese de que los trenzados están apretados y uniformes, y que el alambre trenzado entre los elementos de fijación está tenso pero no demasiado tirante. El número



**El alambre de frenar debería tirar siempre del tornillo en la dirección de apriete**

**Fig. 21-18**

Wire diameter (inch)	Twists per inch
0.020 – 0.025	8 – 14
0.032 – 0.041	6 – 11
0.051 – 0.060	4 – 9

**Fig. 21-19**

recomendado de vueltas por pulgada depende del diámetro del alambre. Véase la tabla (Fig. 21-19). Una vuelta se considera la mitad de un giro completo del trenzador.

- Asegúrese de que el remate al final del alambre no tiene mas de  $\frac{3}{4}$  de pulgada de largo y un mínimo de 4 vueltas. Córtese y dóblese hacia atrás y por debajo el extremo de remate de manera que no corte o enganche cualquier cosa que se roce con él.



Fig. 21-20 Trenzador reversible

El frenado con alambre puede hacerse con unos alicates de punta de pico de pato, pero el uso de una herramienta de trenzado como la de la figura 21-20 hará que el trabajo sea más rápido y uniforme.

### Limpeza y Lavado de los Compresores

La sección fría de un motor turbofan, que incluye el fan, los compresores, y el difusor, determina la cantidad de aire suministrado a la cámara de combustión. Cualquier interferencia con el movimiento del aire disminuirá seriamente la cantidad de potencia o empuje que el motor puede producir.

La acumulación de suciedad sobre los álabes del compresor disminuye el rendimiento aerodinámico y deteriora la actuación del motor. Los álabes de compresor sucios normalmente originan alto EGT y una aceleración insatisfactoria.

Los compresores pueden limpiarse de cualquiera de las dos formas: bombardeo con cáscara de almendras o lavado líquido.

El bombardeo con cáscara de almendras se hace tapando ciertos orificios y válvulas en el paso del aire e inyectando en el conducto de entrada un material autorizado blando a partir de cáscaras de almendras mientras se gira el motor con la puesta en marcha. Cuando se usa este método debe tenerse sumo cuidado para evitar dañar las superficies protegidas contra la corrosión dentro del motor.

El lavado líquido es sin duda el método usado más ampliamente para la limpieza del compresor. Hay dos tipos de lavado líquido: el lavado de desalinización y el lavado para la recuperación de la actuación.

Cuando un motor se opera en un ambiente altamente cargado de sal, normalmente se recomienda lavar el compresor en un programa regular pulverizando agua desmineralizada a través del motor mientras se gira con la puesta en marcha hasta aproximadamente del 15% al 20% de r.p.m.. Este lavado quita los depósitos de sal antes de que se acumule lo suficiente para provocar deterioro de la actuación. Cuando se use la puesta en marcha para girar el motor, asegúrese de no actuarla mas tiempo del permitido por el fabricante, ya que puede calentarse en exceso y dañarse permanentemente.

Si la actuación se ha deteriorado, al motor se le puede dar un lavado para la recuperación de la actuación. El motor se gira con la puesta en marcha o se rueda a ralentí, mientras que por medio de una boquilla pulverizadora sujeta a mano o un anillo incorporado de boquillas pulverizadoras se inyecta en el conducto de entrada una corriente de agua desmineralizada y líquido limpiador. El agente activo en el líquido limpiador desprende los contaminantes de

manera que puedan pasar inofensivamente a través del motor. El agente deja sobre el compresor una película inhibitoria de corrosión para evitar la posterior acumulación de depósitos. Luego se enjuaga el agente limpiador pulverizando agua desmineralizada a través del motor. Córtese el agua y ruédese el motor hasta unas RPM específicas, para secarle completamente.

### **Daños por Ingestión de Objetos Extraños (FOD)**

Además de las inspecciones rutinarias, otras inspecciones deben efectuarse cuando surgen ciertas condiciones anormales. Estas condiciones, especificadas en el manual de operaciones, pueden ser tan obvias como daños por ingestión de objetos extraños (FOD), o tan sutiles como alteraciones de los parámetros observadas por el control de la tendencia (*trend monitoring*).

El FOD (*Foreign Object Damage*) es una de las principales condiciones de las que salvaguardarse durante la operación del motor de turbina. El conducto de entrada de aire actúa como un enorme aspirador e ingiere pequeños objetos tal como partículas de cemento y piedras de la rampa, o utensilios que descuidadamente se han dejado a su alcance. Durante el vuelo pueden ingerirse aves e hielo.

FOD en el fan, álabes guías de entrada, o etapas visibles del compresor es justificación suficiente para el desmontaje del motor y la realización de una revisión general. Es imposible determinar el alcance total del daño sin desmontar el motor.

Los daños menores que son obvios que originan alteración de la actuación requieren un examen del interior del motor con boróscopos o videocópios. La alteración de la actuación que pudiera estar originada por FOD puede detectarse por un aumento en la EGT con una correspondiente disminución de las RPM, o por un cambio en la relación normal entre las r.p.m. de los compresores de baja y alta presión ( $N_1$  y  $N_2$ ).

El FOD a los álabes de fan puede provocar álabes mellados, arañados o solapados.

Las mellas y arañazos sobre algunos álabes y en ciertas localizaciones sobre los álabes pueden repararse por medio de un cuidadoso limado y armonización. Si el daño está dentro de los límites especificados en el manual de servicios, puede quitarse cuidadosamente con una lima de joyero limando paralelo a la longitud del álabe. Señale el área según se especifica en el manual de servicio, y quite todas las marcas de la lima con una piedra abrasiva de 150. Si el daño se sale de los límites permitidos para la reparación en campo, el fan debe desmontarse y enviarse a reparar, los álabes se sustituirán o repararán y el fan se equilibrará.

Muchas ruedas de fan tienen un anillo de refuerzo o absorbedor de cargas hacia la mitad del álabe formado por proyecciones a ambos lados del álabe que tocan las proyecciones en los álabes adyacentes, para formar un aro envolvente alrededor de la porción central del fan (*mid-span*). Véase la figura 4-14. Esta envolvente da rigidez a los álabes y evita el flapéo. Si hay una repentina desaceleración del fan, tal como la provocada por el impacto de un ave, o si el motor entrase en sobrevelocidad, los álabes pueden moverse de manera que el segmento del envolvente de un álabe solapa al segmento del álabe adyacente muy parecido a las tejas sobre un tejado. A este tipo de daño se le llama solape (*shingling*). Los álabes solapados deben examinarse por si existiese daño.

Una causa de daño por FOD que a los técnicos no nos gusta pensar en ello es el daño originado por nuestro propio descuido. Los conductos de entrada de los motores se prestan a servir de estanterías para colocar herramientas y piezas, pero colocar cualquier cosa en el conducto es una mala práctica. Un tornillo, tuerca, o llave dejados en el conducto cuando se arranca el motor puede destruir al motor.

Cuando termines el trabajo asegúrate de contar toda tu herramienta, y deposita los trozos de alambre de frenar, trapos y material de empaquetado en el lugar apropiado.

**Socorridas técnicas boroscópicas que puedes aplicar**

Un boroscopio rígido es fácil de usar y ofrece imágenes claras y brillantes del área de inspección – siempre que el área pueda verse con un acceso en línea recta.

Cuando el acceso en línea recta no es posible, el fiberscopio o videoscopio es la solución. No obstante, dirigir la punta de la sonda visora al lugar de trabajo es complicado a veces por la gravedad, el recorrido, y dificultades de acceso en general. A continuación se exponen dos ideas socorridas.

Puede usarse un cordón o hilo de tracción para superar ciertos problemas. En este ejemplo, el cordón se introduce en el área y se usa para tirar de la sonda visora y vencer el peso hasta situarla en el área de inspección. Esta técnica también puede usarse para dirigir la sonda visora dentro de un tubo largo. El cordón o útil de trabajo trucado debería atarse detrás del área de articulación de la sonda visora.

El sistema de inspección de la cámara de combustión de bote anular del motor JT8D es un ejemplo de utilización de un tubo guía de articulación hueco, el cuerpo de la sonda visora recorre de un bote a otro a través de los tubos de interconexión de llama.