

Taubaté, 12/09/15 a 28/11/15

## **TTEM 005/15**

### **INSPEÇÕES BOROSCÓPICAS APLICADAS A MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES AERONAUTICOS**

#### **BORESCOPE INSPECTIONS APPLY TO ENGINE MAINTENANCE PREDICTIVE AERONAUTICAL**

Signatários:

- Ormino Luiz de Oliveira Rangel Sigagna<sup>1</sup>
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP
- Prof. Dr. José Rui de Camargo – Universidade de Taubaté

Finalidade: A finalidade desse trabalho técnico é descrever as aplicações do ensaio não destrutivo de boroscopia como processo eficaz de manutenção corretiva, preventiva, preditiva em motores aeronáuticos e motores estacionários derivados.

Duração: 3 meses

1 – Aluno do curso de Especialização em Engenharia Aeronáutica da Universidade de Taubaté (UNITAU/SP) - [ormindo.oliveira@wdfaviation.com](mailto:ormindo.oliveira@wdfaviation.com)

Palavras chave: Engenharia aeronáutica, boroscópio, boroscopia, Motores aeronáuticos, Motores estacionários.

**Resumo.** Este trabalho técnico apresenta uma visão geral da utilização do ensaio não destrutivo (END) por boroscopia e videoscopia como processo eficaz de manutenção corretiva, preventiva, preditiva em motores aeronáuticos e motores estacionários derivados. Este processo em especial, detecta áreas danificadas no interior dos motores. Esses ensaios de boroscopia devem ser utilizados para avaliar danos, esses que podem ser ocasionados por diversos fatores externos ou internos, tais como ingestão de pássaros durante fases do voo, ingestão de materiais estranhos (FOD), ingestão de granizo, desprendimento de alguma peça interna durante a operação, etc. As inspeções acessam e monitoram áreas críticas dos motores, sendo utilizado como meio auxiliar no julgamento de aprovação ou não para o retorno ao serviço.

## **1. INTRODUÇÃO**

Uma inspeção boroscópica é a mais importante e simples intervenção de monitoramento de um motor sem a remoção do mesmo, de seu local de instalação.

No programa de manutenção de um motor, seja ele aeronáutico ou derivado de motor aeronáutico é uma eficaz ferramenta de controle de performance.

Mais de 90% das remoções de motores de aeronaves ou de interrupção no serviço de motores estacionários são resultados de uma má qualidade da inspeção durante um cheque on-site em uma manutenção preventiva.

Baseado em uma inspeção boroscópica imediata das partes internas, rotativas e a análise de tendência dos parâmetros das condições de operação, um operador tem capacidade de monitorar as condições internas desses motores, sem a necessidade de desmontagem ou remoção dos mesmos de seus locais de serviço.

Neste trabalho técnico serão abordados a aplicação das técnicas e recursos de inspeção boroscópicas e videoscópicas, como importante meio de manutenção corretiva, preventiva e preditiva em motores aeronáuticos e motores estacionários derivados, propiciando significativa economia de recursos e otimização das operações para esses importantes componentes.

## **2. APLICABILIDADE DO ENSAIO**

Essa técnica de inspeção é classificada como END, no grupo das inspeções visuais e vem sendo usada para realização e verificação dimensional, detecção de defeitos e até reparos existentes em componentes internos de motores aeronáuticos ou derivados, montados, reduzindo-se assim consideravelmente os custos de manutenção e os tempos fora de serviço desses motores.

Este processo em especial, detecta áreas danificadas no interior dos motores. Danos esses que podem ser ocasionados por diversos fatores externos ou internos, tais como ingestão de pássaros durante fases do voo, ingestão de materiais estranhos (FOD), ingestão de granizo, desprendimento de alguma peça interna durante a operação, etc.

São divididas em dois tipos: inspeção programada e aquelas que fazem por ser parte integrante do programa de manutenção do motor, aeronave ou unidade geradora de energia e inspeção não programada, aquelas ocasionadas por algum acontecimento anormal a operação do motor.

Ambas as inspeções acessam e monitoram áreas críticas dos motores, sendo utilizado como meio auxiliar no julgamento de aprovação ou não para o retorno ao serviço.

### 3. VANTAGENS DA ESCOLHA DESSE MÉTODO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO

- Evita-se a remoção e desmontagem do motor;
- Permite o diagnóstico de eventos de ingestão e danos por elas causados;
- Permite a mensuração desses danos e fornece subsídios para a decisão de se fazer ou não um reparo ou mesmo liberar o motor para permanecer em operação;
- Permite a captação e o registro de imagens fotográficas e filmadas de todo o processo de inspeção, propiciando a confecção de relatórios detalhados acerca da inspeção realizada;
- Permite a detecção de vazamentos ou qualquer outra anomalia internas no funcionamento regular dos motores;
- Permite o controle de falhas prováveis e amplia o tempo entre revisões dos motores;

### 4. OBJETIVO DE NOSSO TRABALHO

O objetivo de nosso trabalho técnico será a inspeção boroscópica nos motores Pratt & Whitney LM 6000 / CF6-50, O CF650, motor aeronáutico que equipa aeronaves comerciais como Airbus A300, 310, 330, Boeing 767, McDonnell Douglas MD-11. Já o LM 6000 é um motor estacionário utilizado para produção de energia elétrica em usinas termoeletricas.

Serão abordadas as peculiaridades técnicas desse **Ensaio Não Destrutivo** e será explicitada a forma adequada para sua realização, bem como a forma regulamentada da apresentação dos resultados, laudos e documentação aplicada.

Será feita uma aplicação prática para esse ensaio através de um estudo e desenvolvimento de caso.

### 5. GLOSSÁRIO DE TERMOS E SIGLAS

LPC - Low Pressure Compressor  
HPC - High Pressure Compressor  
LPT - Low Pressure Turbine  
HPT - High Pressure Turbine  
SAC - Single Annular Combustor  
DAC - Dual Annular Combustor  
FOD - Foreign Object Damage  
ANAC - Agencia Nacional da Aviação Civil  
CHT - Certificado de Habilitação Técnica  
GMP - Grupo Moto Propulsor  
MMA - Mecânico de Manutenção Aeronáutica  
S0 à S20 - Identificação dos pontos de inspeção  
N1 - Eixo do compressor de baixa pressão  
FASE – Disco de Turbina

## 6. APRESENTAÇÃO SUMÁRIA DO MOTOR CF6 50 / LM 6000

CF6 50 é um motor [turbofã](#) produzidos pela [General Electric](#) desde o final dos anos 70. Desenvolvido a partir do motor [TF39](#), o CF6 50 é operado em grandes variedades de [aeronaves civis](#), conforme apresentado na Figura 1 e aplicação na Usina Termelétrica de Juiz de Fora conforme apresentado na Figura 2.



Figura 1 - LM 6000 é um motor estacionário derivado do seu “irmão” aeronáutico CF6 50. Sua aplicação se dá em unidades de produção de energia termo elétricas.

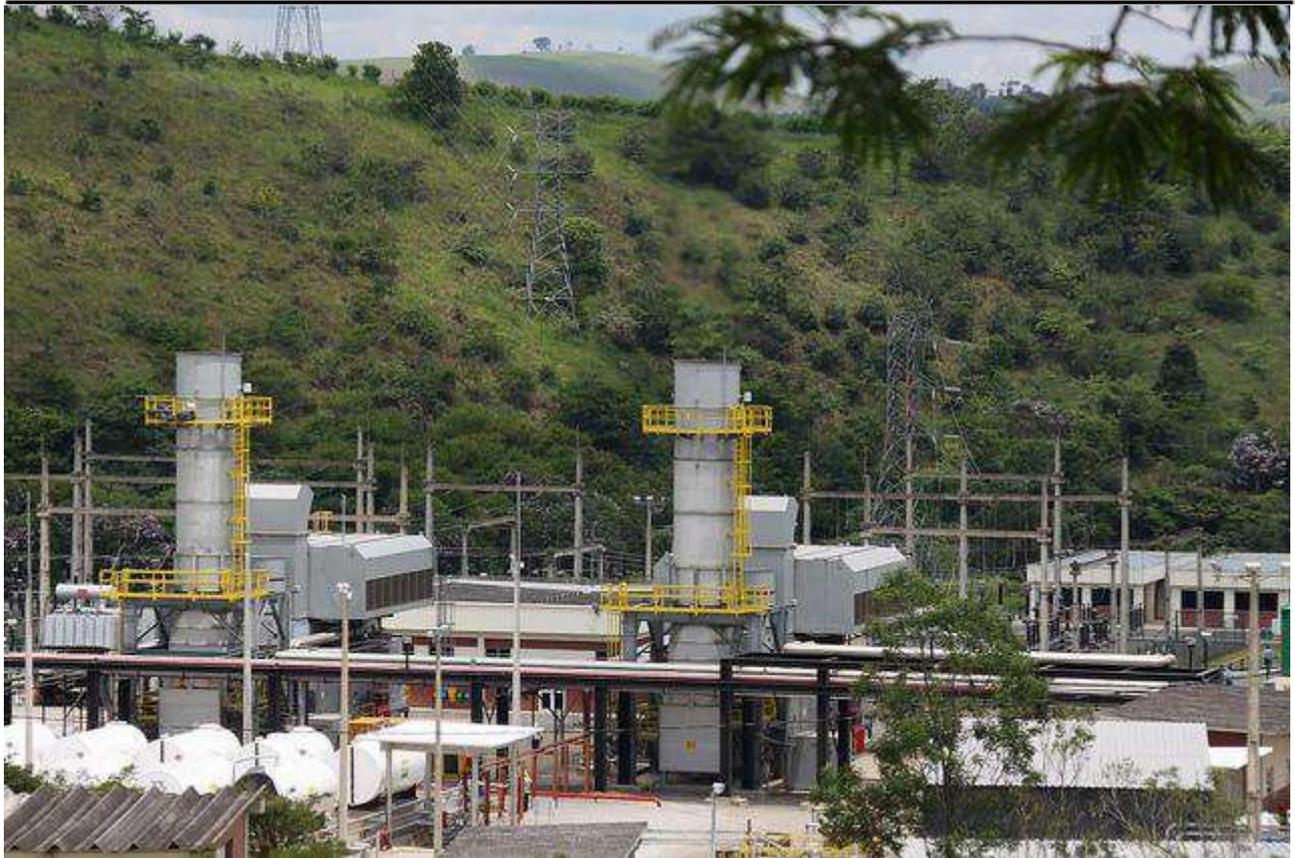
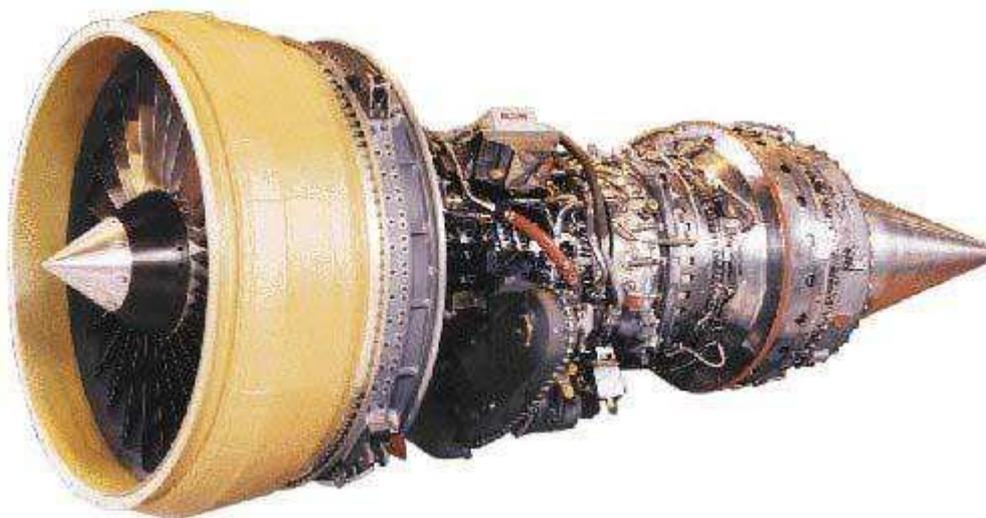


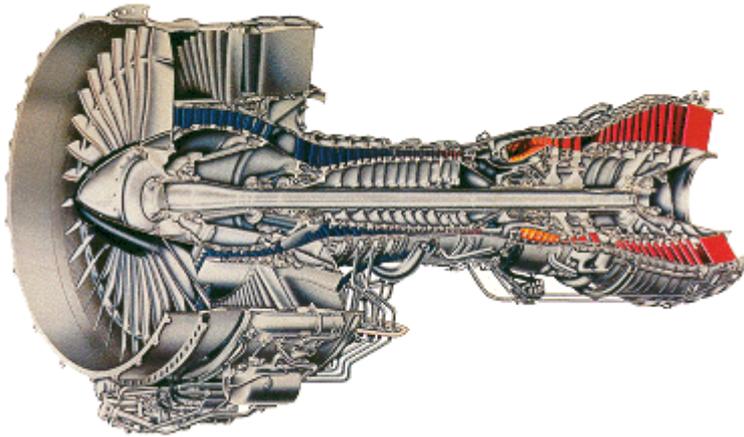
Figura 2 - Usina Termelétrica de Juiz de Fora em 2010.

## 7. INSPEÇÃO BOROSCÓPICA NO MOTOR LM 6000 OU CF6-50

Por se tratarem de motores derivados os procedimentos de ENDs, as inspeções boroscópicas são os mesmos para ambos os modelos CF6 50 e LM 6000.



(A)



(B)

Figura 3 (A e B) - Turbina LM 6000 / CF6-50.

A turbina LM 6000 / CF6-50 (Figuras 3 A e B) pode ser operada com gás ou combustíveis líquidos. Ela consiste de dois estágios mecânicos que podem transferir a carga, tanto da LPR (Baixa Pressão Rotor) dianteira e traseira.

Duplo rotor de turbina (dual-rotor) compreende:

- O regime variável de palhetas (VIGV)
- Um compressor de baixa pressão (LPC) 5 fase
- 14 fases de geometria variável compressor de alta pressão (HPC)
- Um combustor angular
- Uma turbina de alta pressão (HPT) das duas fases
- A turbina de baixa pressão (LPT) de 5 fases
- A caixa de acessórios (AGB) e acessórios.

## 8. INTRODUÇÃO A INSPEÇÃO BOROSCÓPICA (BSI)

A inspeção boroscópica é uma tarefa difícil e exige que seja realizada por um profissional altamente capacitado.

Quase sempre esse ensaio é possível de ser realizado com o motor instalado na aeronave ou em sua unidade de produção, ou seja, em serviço. Isso significa dizer que os componentes on conditions são agora acessíveis sem desmontar a máquina, através de um ensaio boroscópico, regular ou conforme demanda.

O técnico no ensaio de boroscopia tem que possuir muita concentração e conhecimento do seu trabalho por causa das particularidades de cada imagem e a necessidade de fazer todas as medições necessárias e classificar os defeitos conforme os limites e localizações descritas na documentação técnica do motor.

Ele também deve estar em plena condição de saúde, sobretudo no que tange a sua acuidade visual, deve possuir bom preparo físico, visto que os acessos às vezes são localizados em locais de difíceis.

Para identificar os danos, o inspetor deve ter conhecimento técnico e experiência de trabalho com o motor.

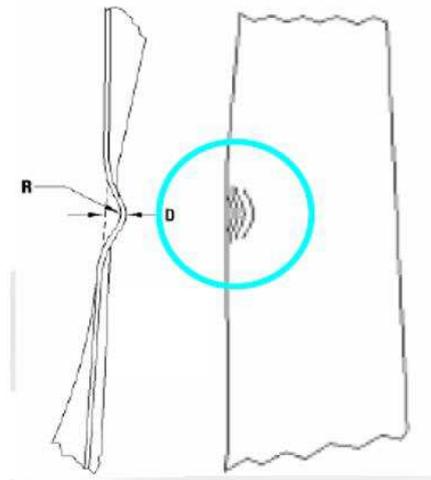
## 9. DANOS MAIS COMUNS

A seguir serão apresentados os danos mais comuns que podem ser encontrados nos motores aeronáuticos e estacionários em inspeção por boroscopia ou videoscopia.

### 9.1 - ENTALHES OU MORSA

DE = profundidade do entalhe (morsa)

R = raio do entalhe (morsa)

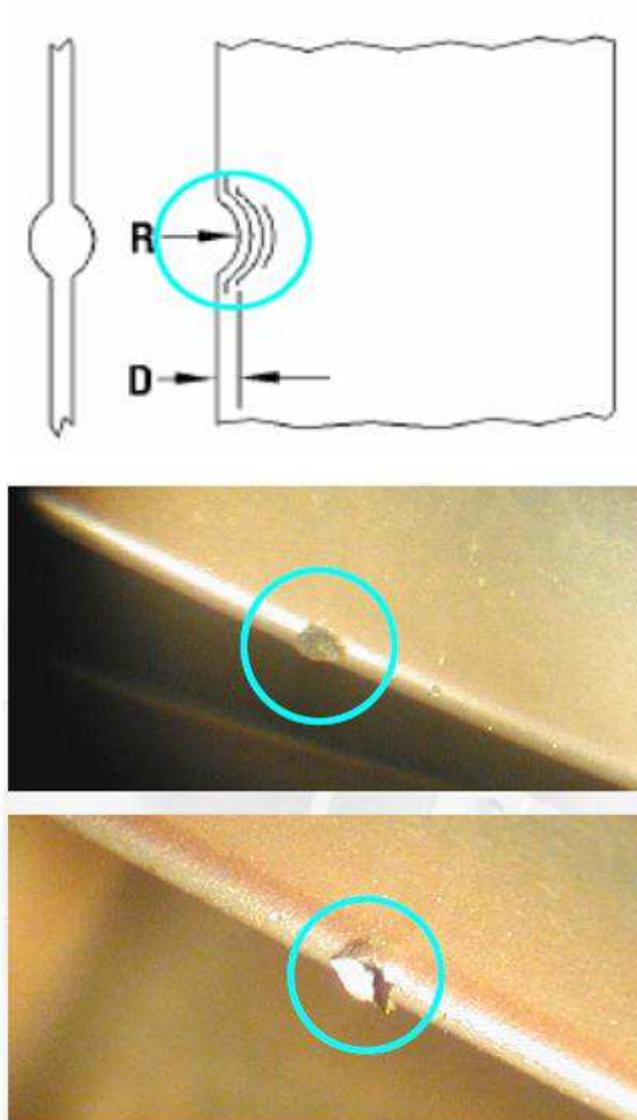


Como e onde encontrar esse tipo de defeito ou dano?

Nos seguintes componentes:

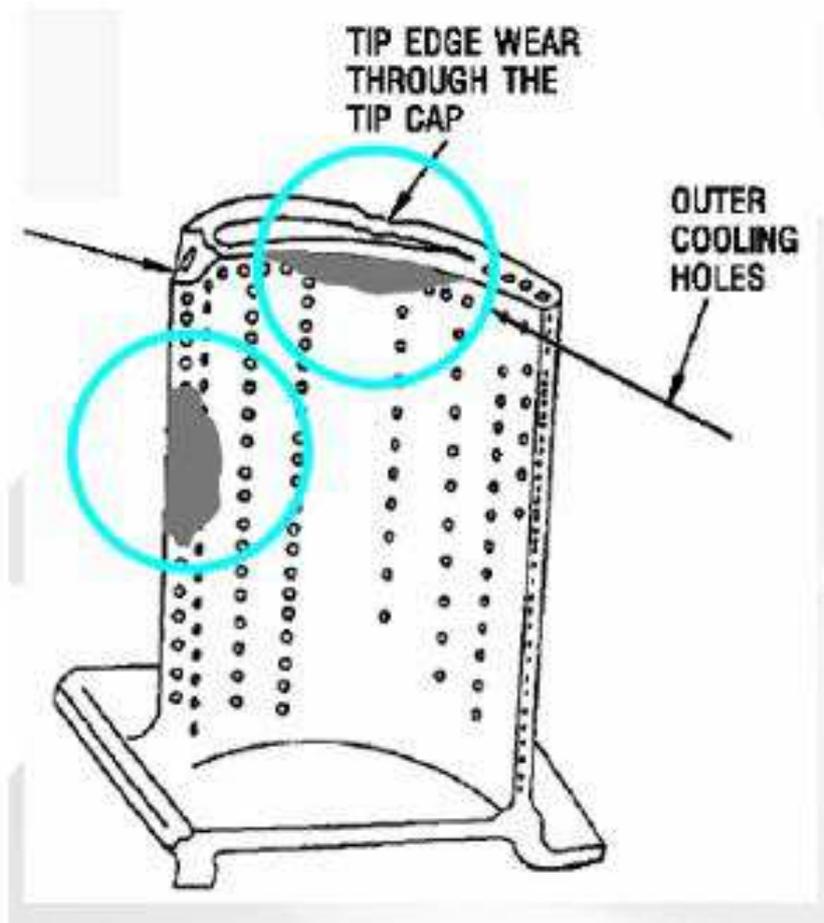
- Compressor de baixa pressão (LPC)
- Compressor de alta pressão (HPC)
- A fim de encontrar a falta de material, no bordo de ataque e o bordo de fuga:
- Blades Rotoras o LPC - Fase 0-4
- Vanes Estatoras LPC - Fase 0-4
- Blades Rotoras HPC - Fase 1 a 14
- Vanes Estatoras LPC - Fase IGV, 1-14

## 9.2 - DANO POR CHOQUE OU AMASSAMENTO



Nos seguintes componentes:

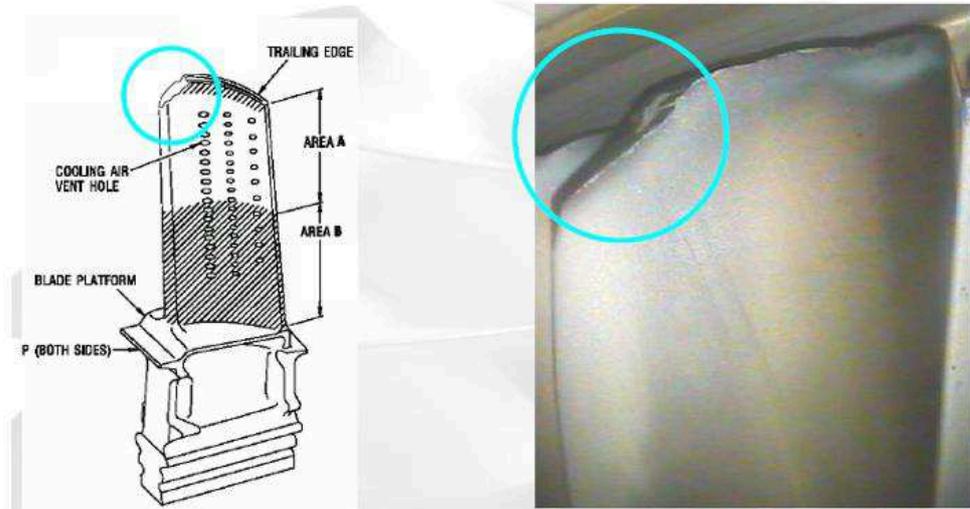
- Compressor de baixa pressão (LPC)
- Compressor de alta pressão (HPC)
- Turbina de baixa pressão (LPT)
- A fim de encontrar a falta de material, no bordo de ataque e o bordo de fuga:
- Blades Rotoras o LPC - Fase 0-4
- Vanes Estatoras LPC - Fase 0-4
- Blades Rotoras HPC - Fase 1 a 14
- Vanes Estatoras LPC - Fase IGV, 1-14
- Blades Rotoras LPT - Stage 1-5
- Vanes Estatoras LPC - Fase IGV, 1-5



Nos seguintes componentes:

- Compressor de baixa pressão (LPC)
- Compressor de alta pressão (HPC)
- A fim de encontrar a falta de material, no bordo de ataque e o bordo de fuga:
- Blades Rotoras o LPC - Fase 0-4
- Vanes Estatoras LPC - Fase 0-4
- Blades Rotoras HPC - Fase 1 a 14
- Vanes Estatoras LPC - Fase IGV, 1-14

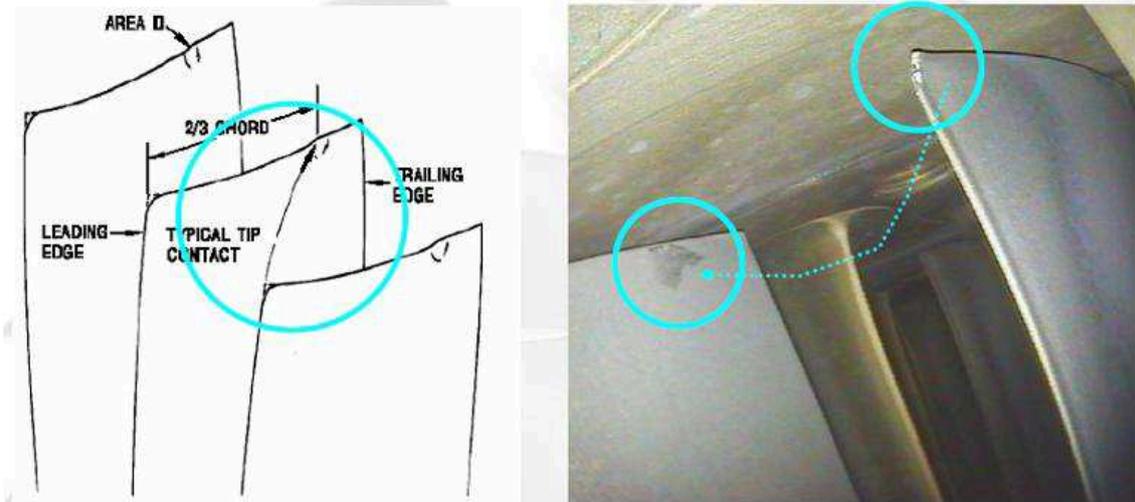
### 9.3 - PERDA DE MATERIAL



Nos seguintes componentes:

- Compressor de baixa pressão (LPC)
- Compressor de alta pressão (HPC)
- Turbina de alta pressão (HPT)
- Turbina de baixa pressão (LPT)
- A fim de encontrar:
- Blades Rotoras o LPC - Fase 0-4
- Vanes Estatoras LPC - Fase 0-4
- Blades Rotoras HPC - Fase 1 a 14
- Vanes Estatoras LPC - Fase IG, 1-14
- Rotoras HPT Blades - Fase 1-2
- Vanes Estatoras HPT - Fase 1-2
- Blades Rotoras LPT - Fase 1-5
- Vanes Estatoras LPC - Fase IG, 1-5

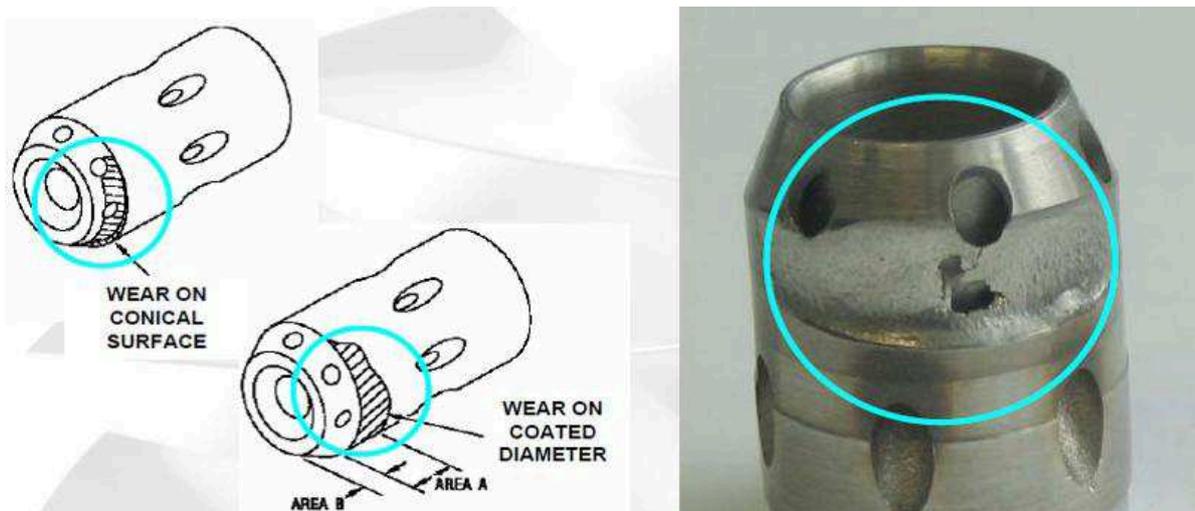
## 9.4 - RUÍDO ANORMAL DAS BLADES



Nos seguintes componentes:

- Turbina de alta pressão (HPT)
- A fim de encontrar: Rotoras HPT Blades - Fase 1-2 Vanes Estatoras HPT - Fase 1-2

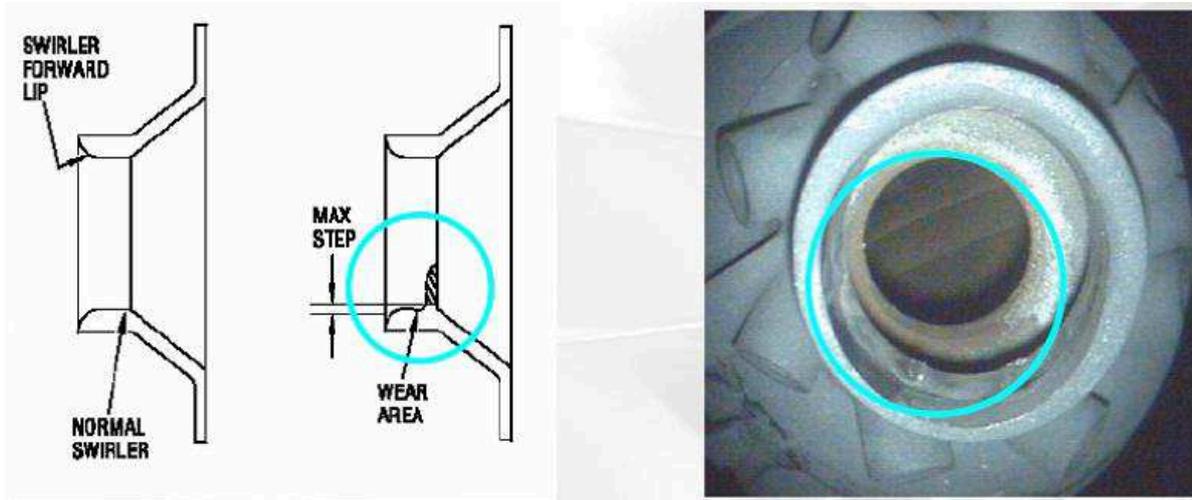
## 9.5 - DESGASTE NOS INJETORES



INSPEÇÃO VISUAL:

- Injetores de combustível
- A fim de encontrar: Área com desgaste nos injetores de combustível

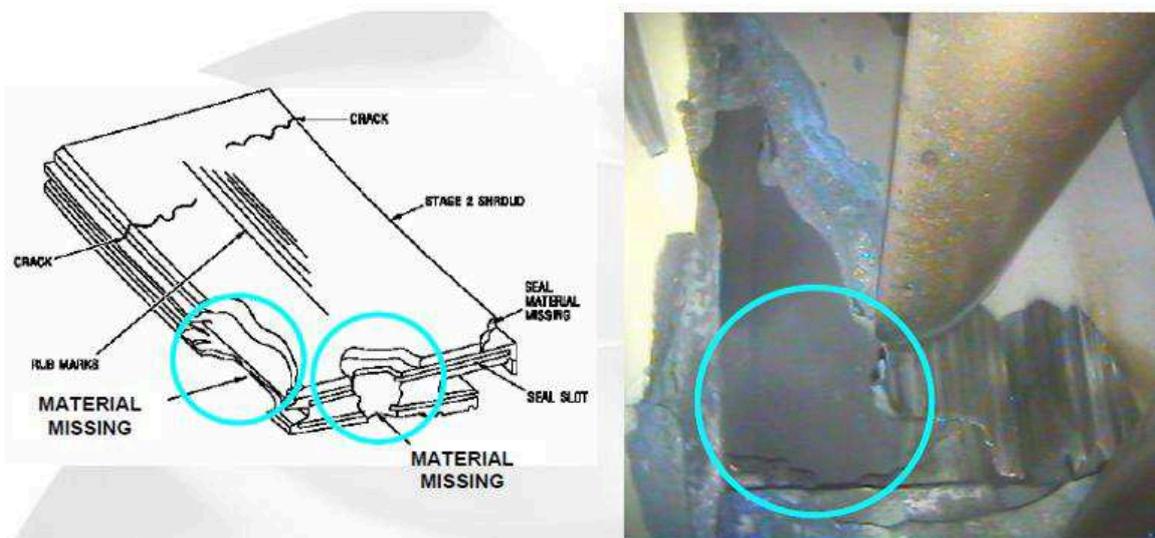
## 9.6 - DESGASTE NO TURBILHONADOR



### INSPEÇÃO BOROSCÓPICA:

- Combustor
- A fim de encontrar: Defeitos na frente de turbilhonador

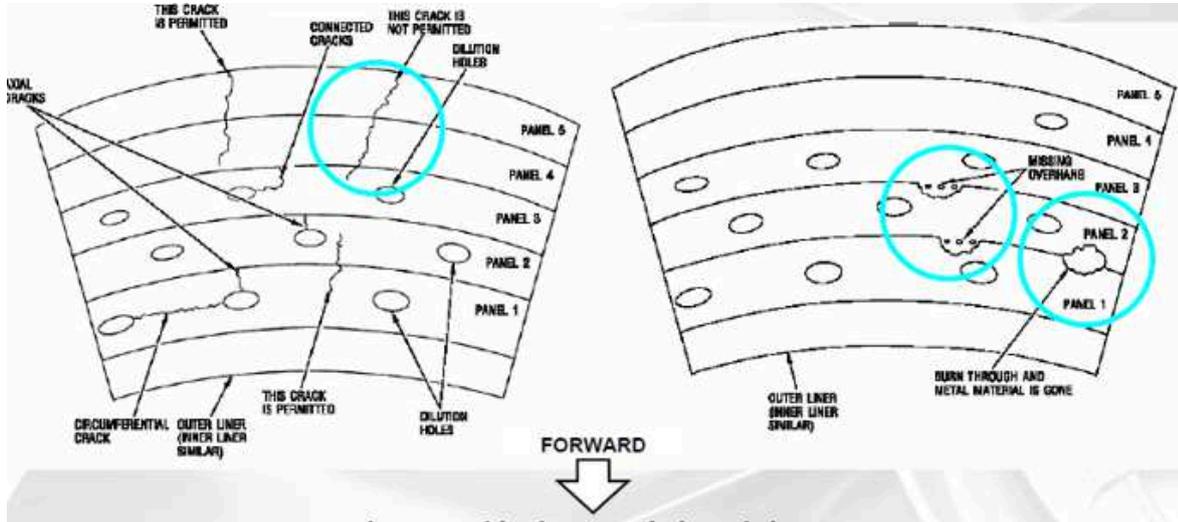
## 9.7 - DESGASTE COM PERDA DE MATERIAL ENTRE AS BLADES E A CARÇAÇA



### INSPEÇÃO BOROSCÓPICA:

- Turbina de alta pressão (HPT)
- A fim de encontrar: Desgaste do anel turbina de alta pressão case do (HPT) - Fase 1 e 2

## 9.8 - DANOS AO REVESTIMENTO INTERNO E EXTERNO DA CAMARA DE COMBUSTÃO



### INSPEÇÃO BOROSCÓPICA:

- Câmara de combustão
- A fim de encontrar: Dano em revestimentos interno e externo no combustor

## 10. EQUIPAMENTOS DE BOROSCOPIA

Existem vários equipamentos para boroscopia no mercado.

Em seguida, serão apresentados 2 modelos de boroscópios diferentes que são certificados e geralmente usados em inspeções boroscópicas de um motor, da marca Olympus (figuras 4 e 5).

Os equipamentos contam com acessórios adicionais para permitir o registro das imagens e vídeos dos ensaios de boroscopia - por exemplo, cartões Compact Flash, adaptador de cartão de memória flash.

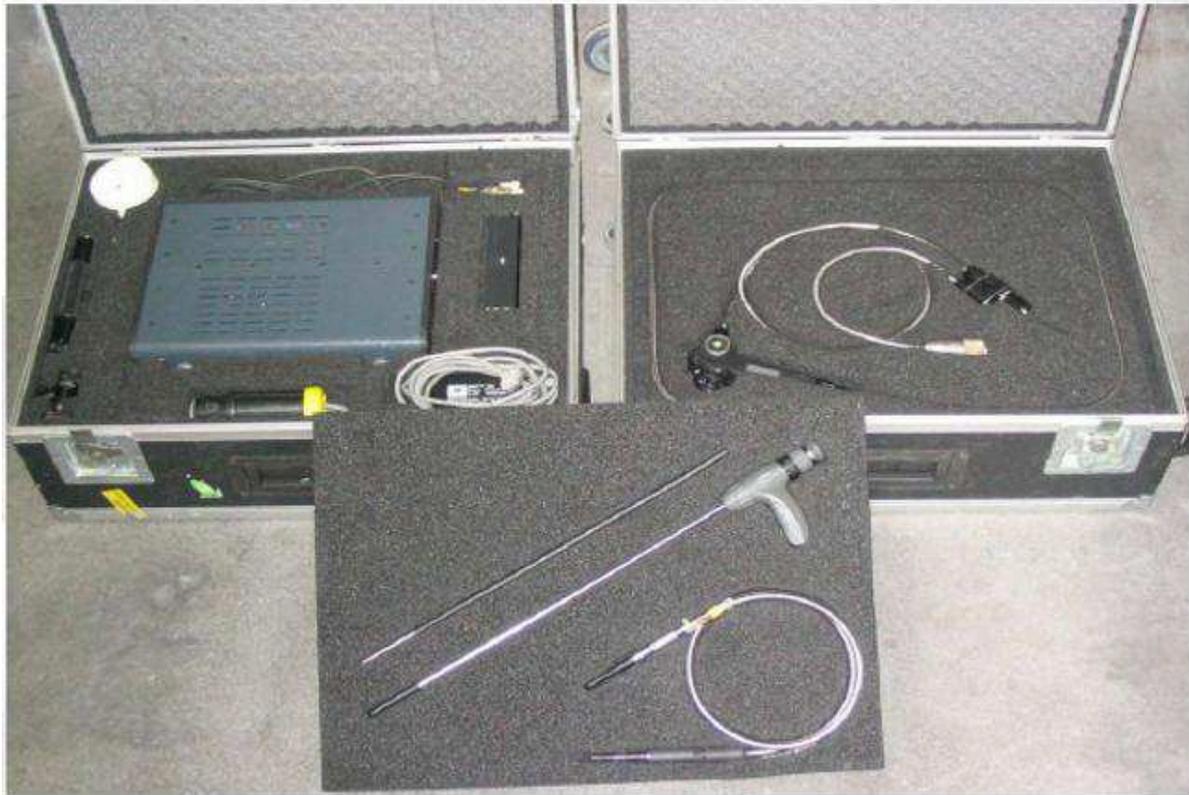


Figura 4 – Boroscópio com visor em alta definição com possibilidade de realizar medições, filmagens, fotografias e sondas flexíveis.

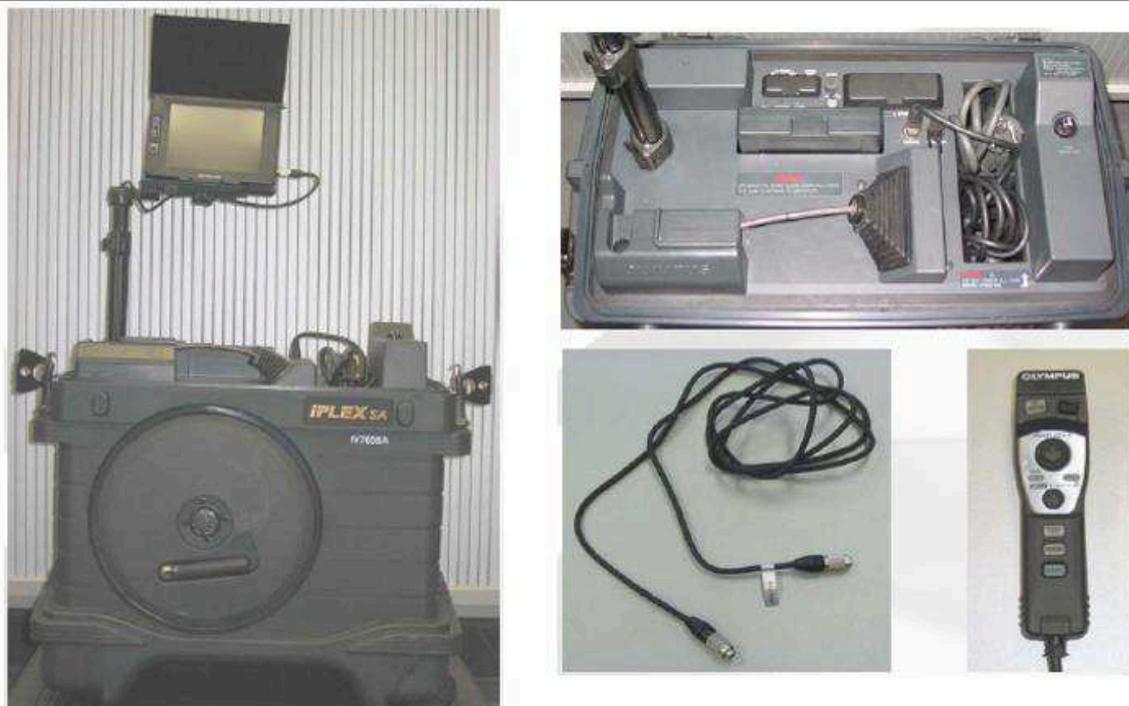
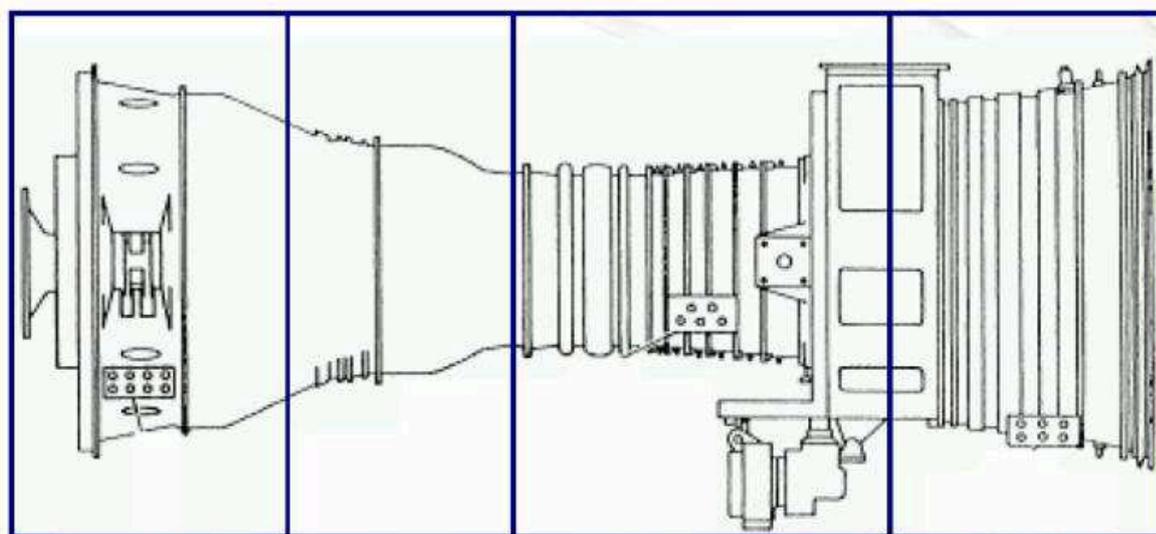


Figura 5 – Boroscópio equipado com visor e sondas flexíveis.

## 11. REFERENCIAS FISICAS DO MOTOR



4

3

2

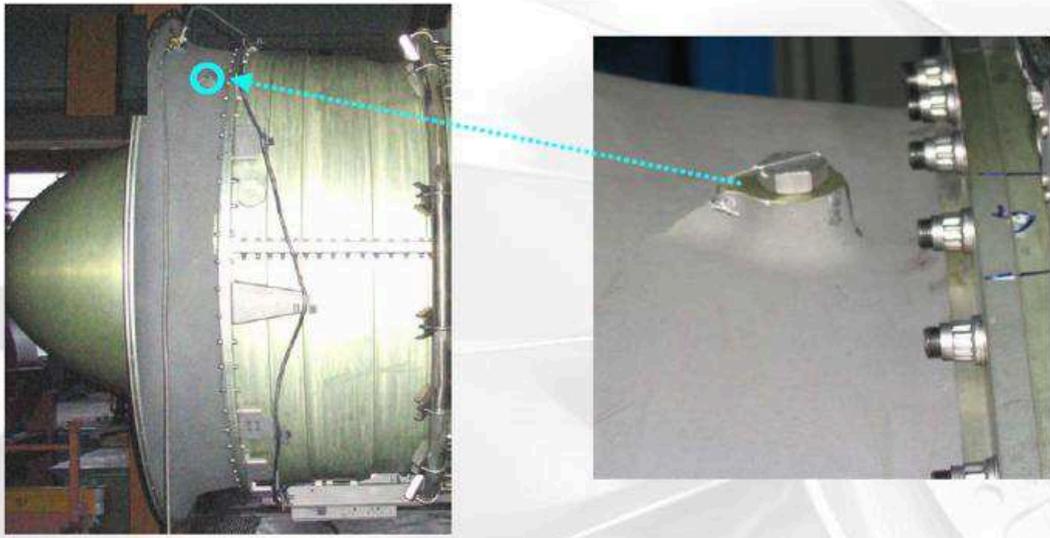
1

Como descrito no Manual de Referência de Manutenção a área da turbina deverão ser acessadas e inspecionadas através dos portais de inspeção instalados nos seguintes locais:

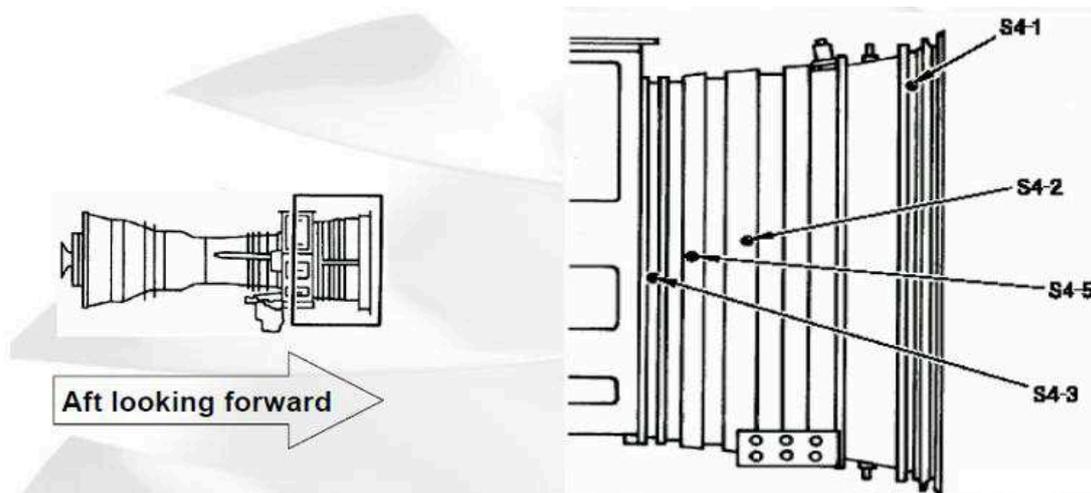
- 1- Compressor de baixa pressão (LPC)
- 2- Compressor de alta pressão (HPC)
- 3- Combustor
- 4- Turbina de alta pressão (HPT)
- 4- Turbina de baixa pressão (LPT)

## 11.1 - LOCALIZAÇÕES DOS PORTAIS DE ACESSO PARA ENSAIO POR BOROSCOPIA NOS MOTORES LM 6000 CF6 50

- Compressor de baixa pressão (FLA)
- Localização do Portal: Lado Esquerdo do Motor identificado S4-4
- Permite o Ensaio no Compressor de baixa pressão

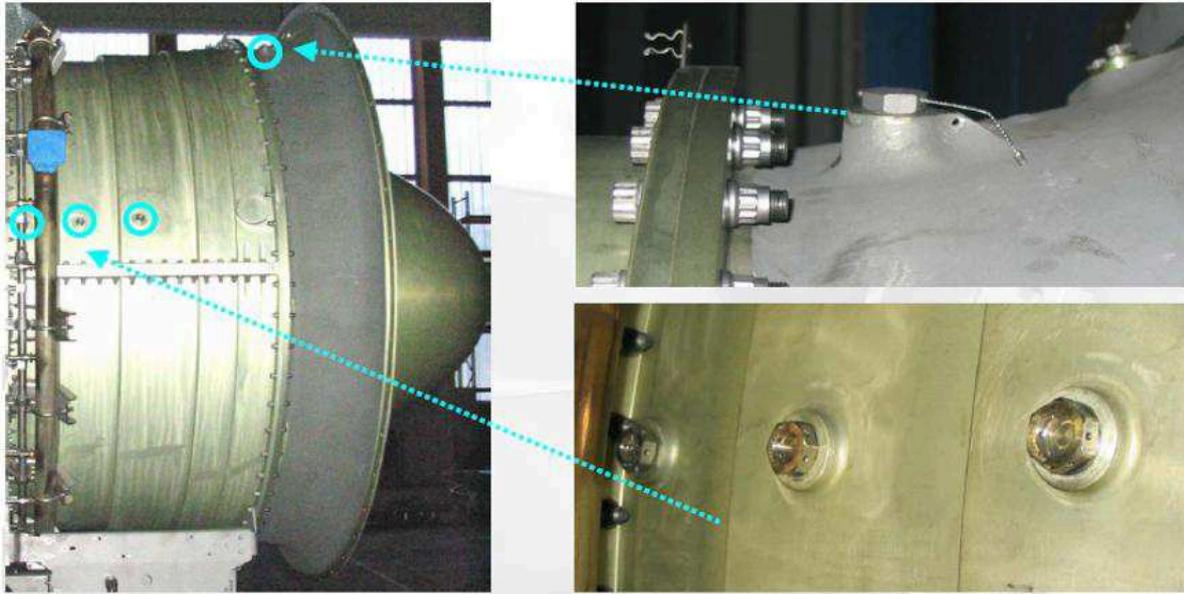


### COMPRESSOR DE BAIXA PRESSÃO - PORTICOS DE ACESSO



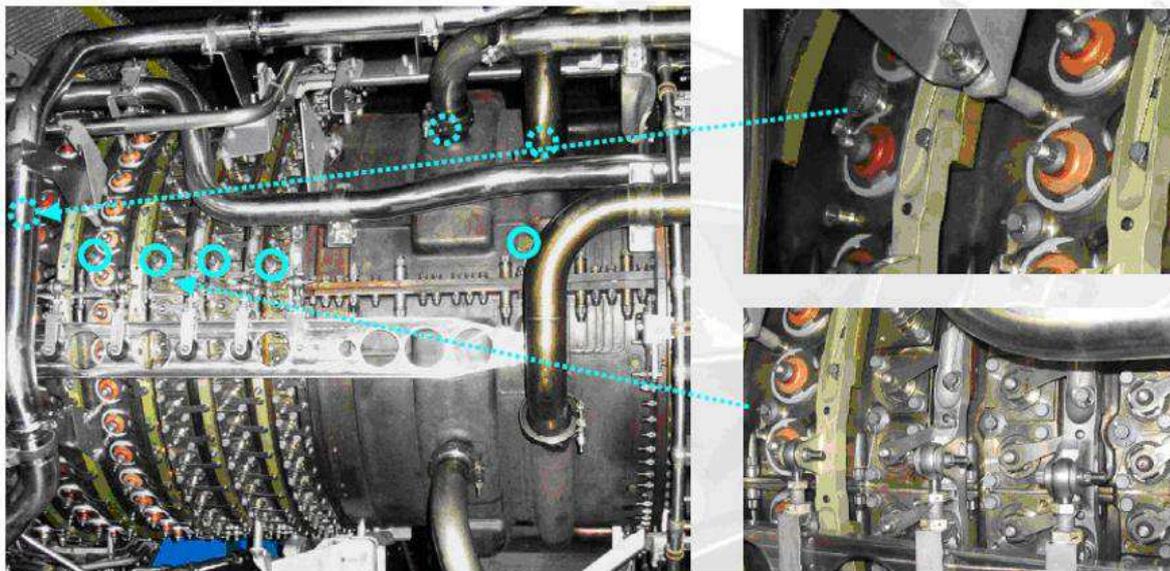
- S4-1 - Disco rotor FLA 0
- S4-2 - Disco 1 rotor ALF  
- Disco 2 do rotor FLA
- S4-3 - Disco 3 rotor ALF  
- Disco 4 rotor FLA
- S4-5 - Disco 2 rotor ALF  
- Disco 3 do rotor FLA

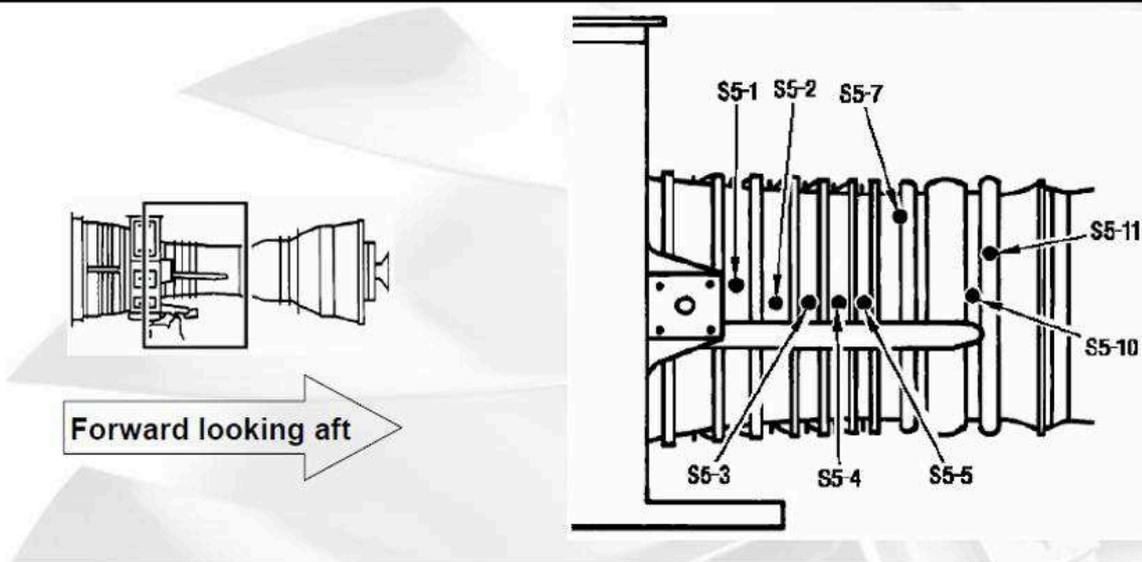
### PORTAIS DE INSPEÇÃO DO COMPRESSOR DE BAIXA - LADO DIREITO



Por onde são possíveis os acessos e inspeção dos mesmos componentes que pelo lado esquerdo. Esses acessos existem para facilitar a inspeção quando os motores estão instalados no avião.

### COMPRESSOR DE ALTA PRESSÃO - PORTAIS DE ACESSO PARA INSPEÇÃO BOROSCÓPICA

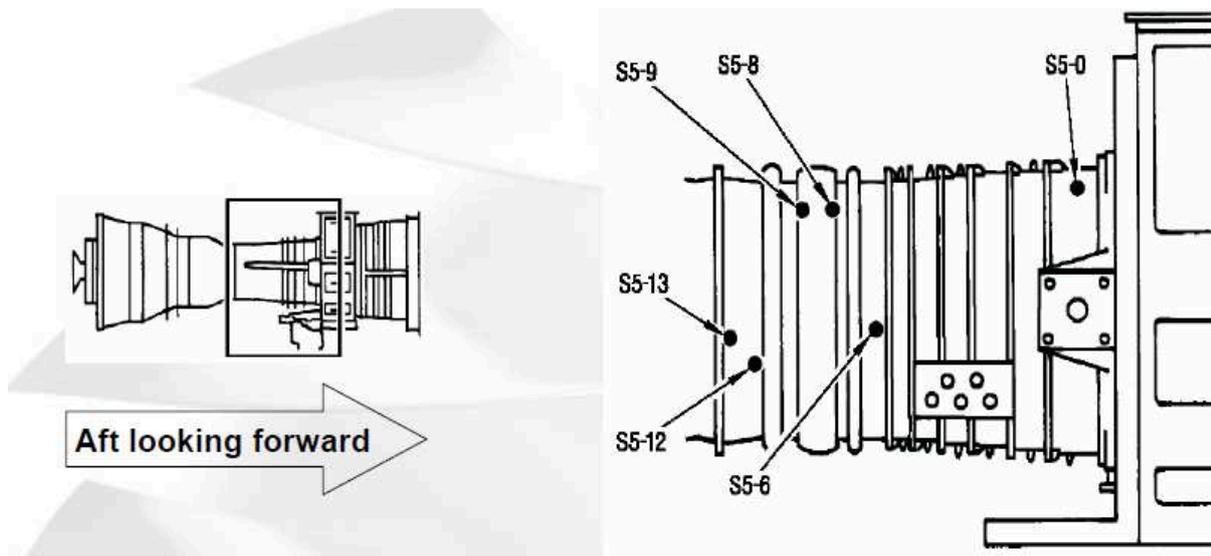
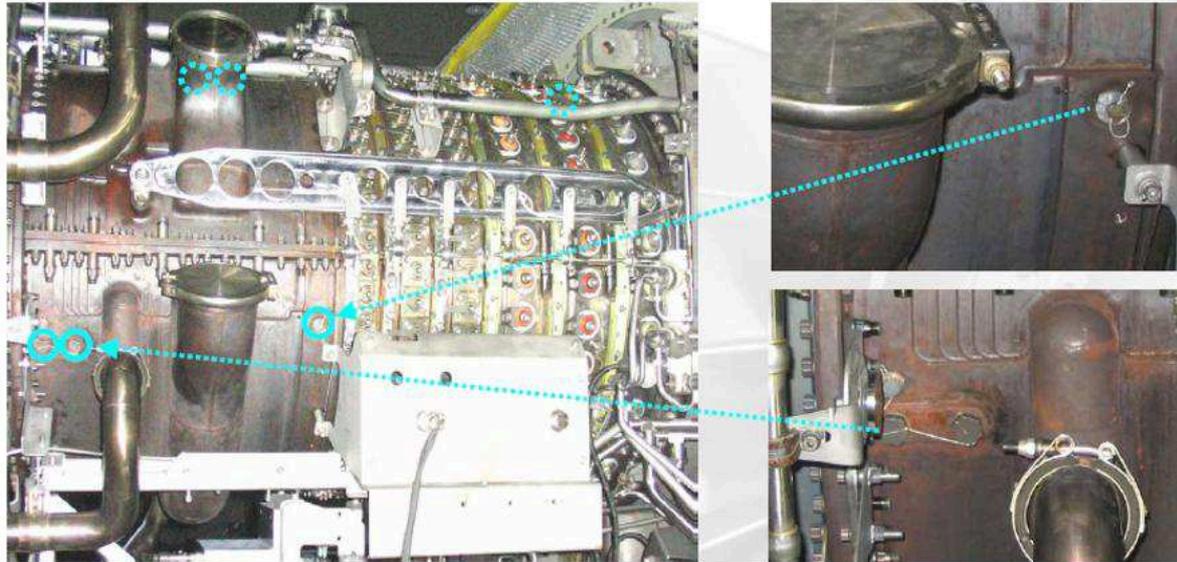




Acesso a inspeção dos seguintes componentes:

- S5-1 - Disco 1 rotor ALF
- - Disco 2 rotor FLA
- S5-2 - Disco 2 rotor ALF
- - Disco 3 rotor FLA
- S5-3 - Fase 3 rotor ALF
- - Fase 4 rotor FLA
- S5-4 - Fase 4 rotor ALF
- - Fase 5 rotor FLA
- S5-5 - Fase 5 rotor ALF
- - Fase rotor FLA
- S5-7 - Fase 7 rotor ALF
- - Fase 8 rotor FLA
- S5-10 - Fase 10 rotores ALF
- - Fase 11 rotores FLA
- S5-11 - Fase 11 rotores ALF
- - Fase 12 rotor FLA

## COMPRESSOR DE ALTA - PORTAIS DE INSPEÇÃO BOROSCÓPICAS DO LADO ESQUERDO

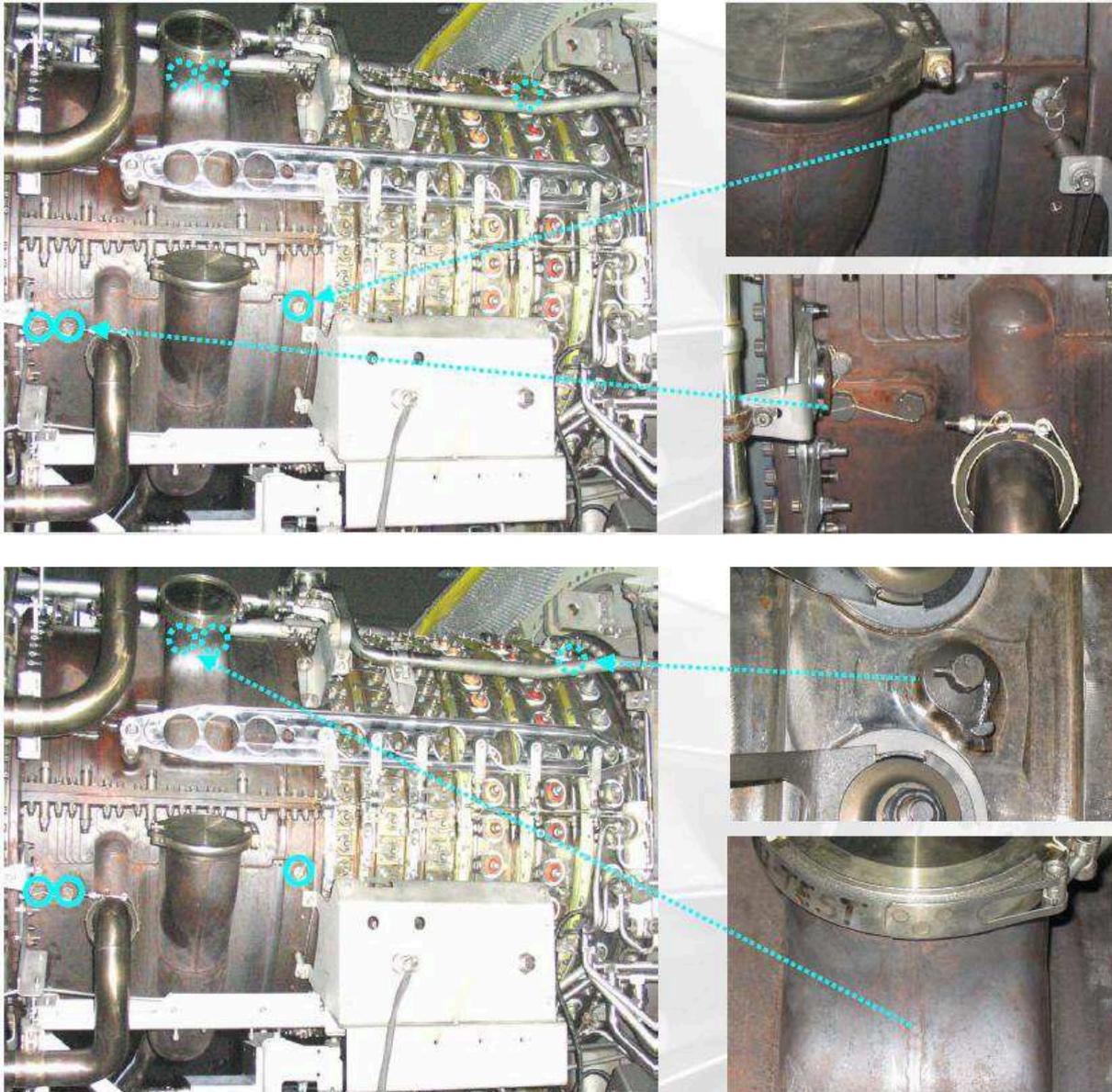


Acesso a inspeção dos seguintes componentes:

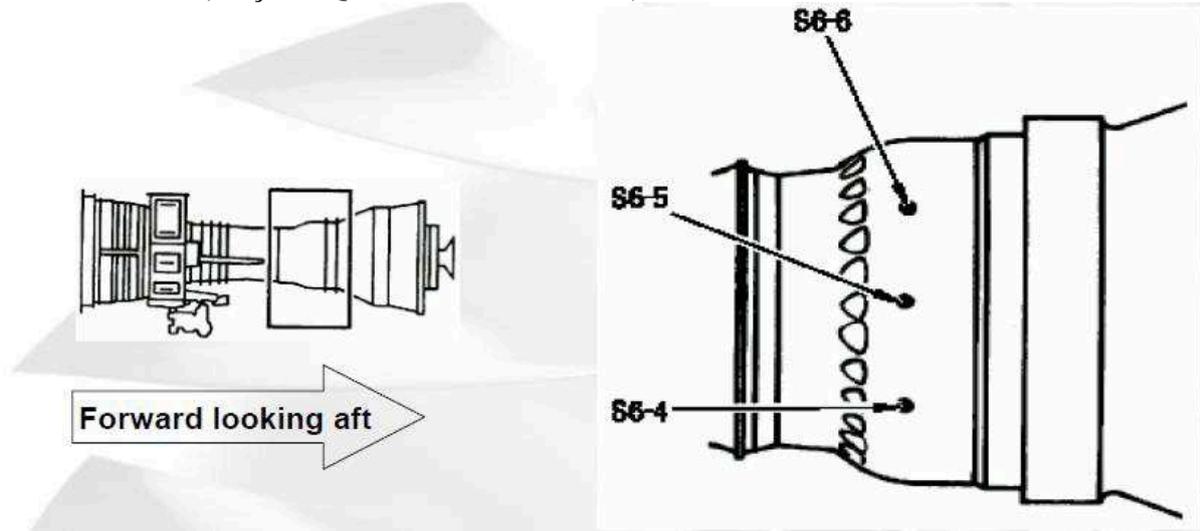
- Compressor de Alta Pressão
- S5-0 - Fase rotor 1 FLA
- S5-6 - Fase rotor 6 ALF
- - Fase rotor 7 FLA
- S5-8 - Fase rotor 8 ALF
- - Fase rotor 9 FLA
- S5-9 - Fase rotor 9 ALF

- - Fase rotor 10 FLA
- S5-12 - Fase rotor 12 ALF
- - Fase rotor 13 FLA
- S5-13 - Fase rotor 13 ALF
- - Fase rotor 14 FLA

### COMPRESSOR DE ALTA - PORTAIS DE INSPEÇÃO BOROSCÓPICAS DO LADO DIREITO

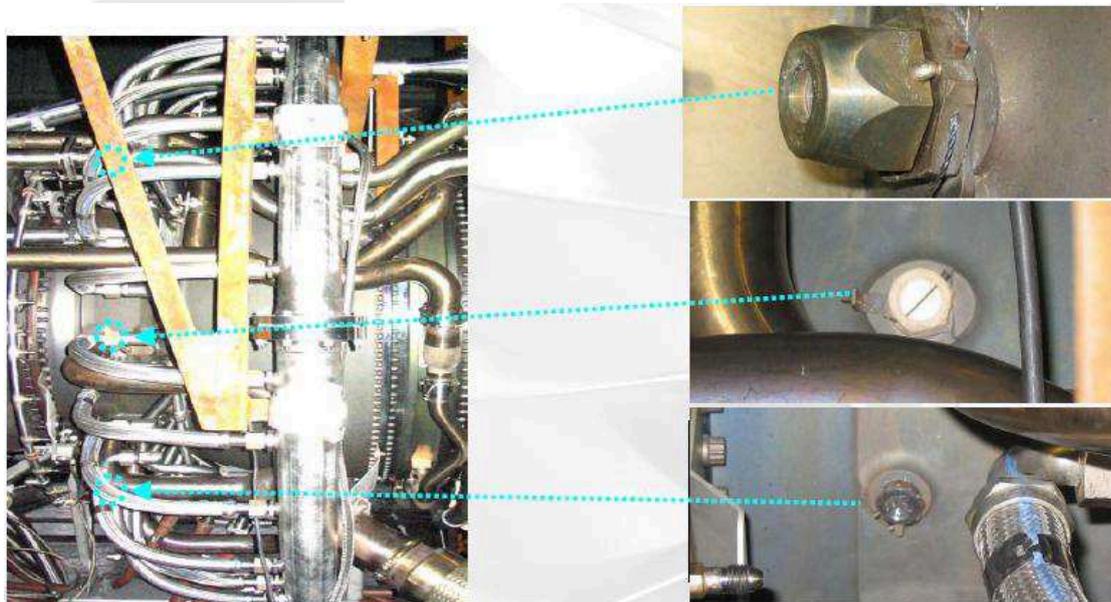


**COMBUSTOR (SEÇÃO QUENTE DO MOTOR)**

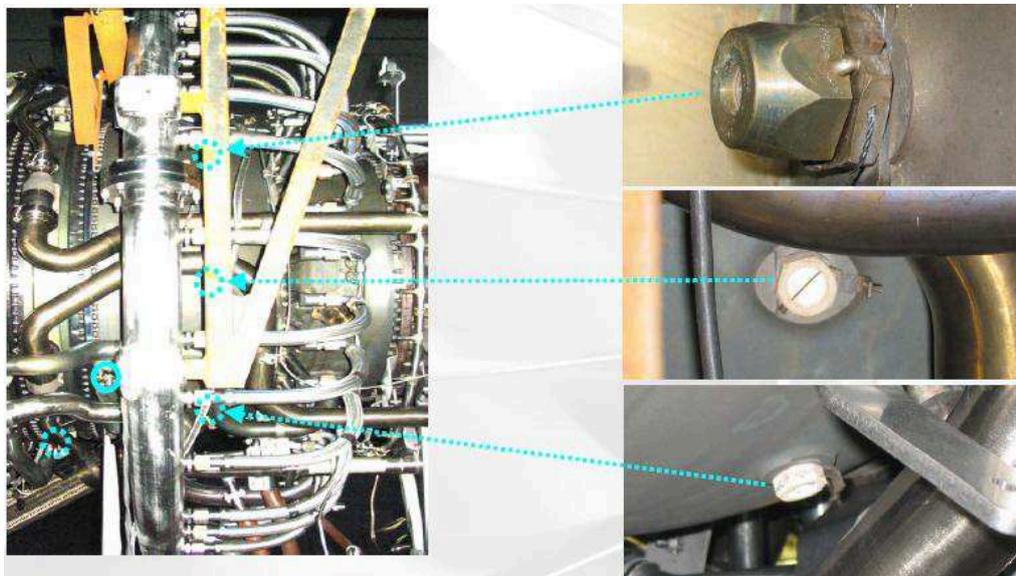
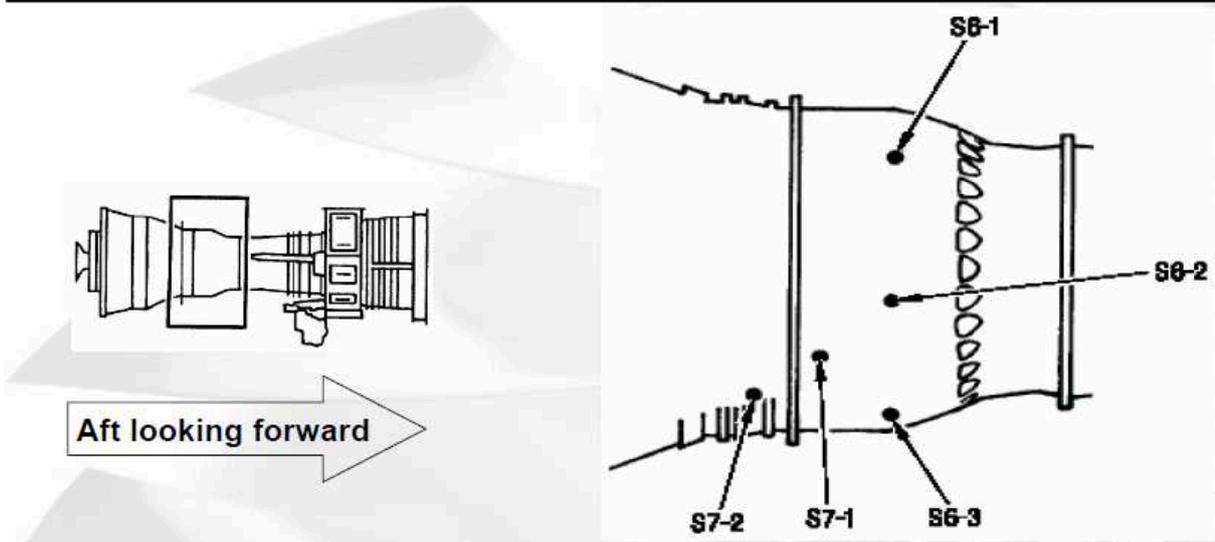


**PORTAIS DE INSPEÇÃO DO LADO ESQUERDO DO COBUSTOR (SEÇÃO QUENTE)**

- |      |   |   |
|------|---|---|
| S6-4 | - | } |
| S6-5 | - |   |
| S6-6 | - |   |



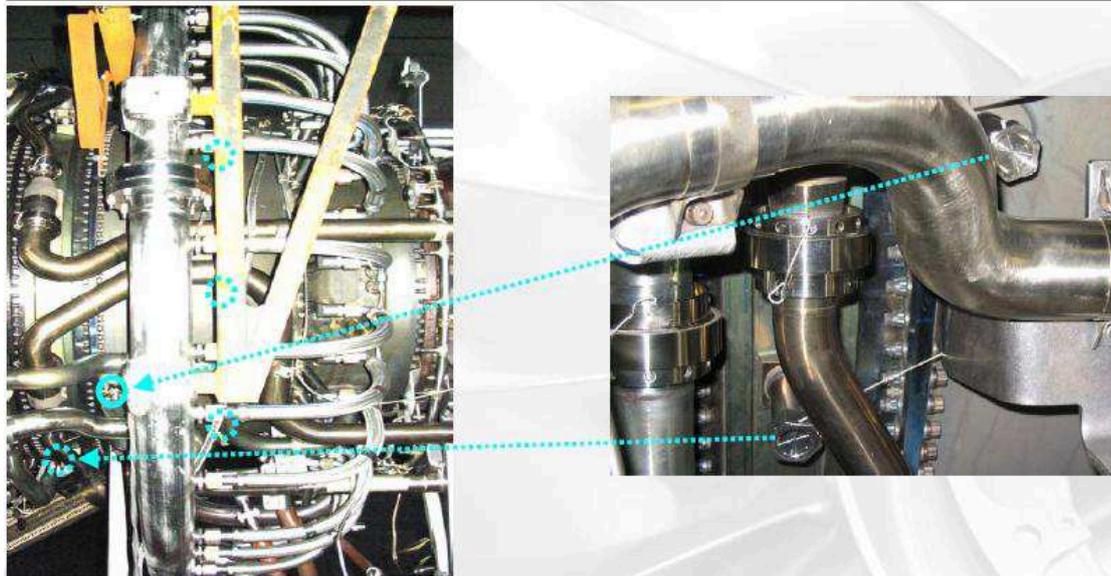
**PORTICOS DE INSEÇÃO DO LADO DIREITO DO COMBUSTOR (SEÇÃO QUENTE)**



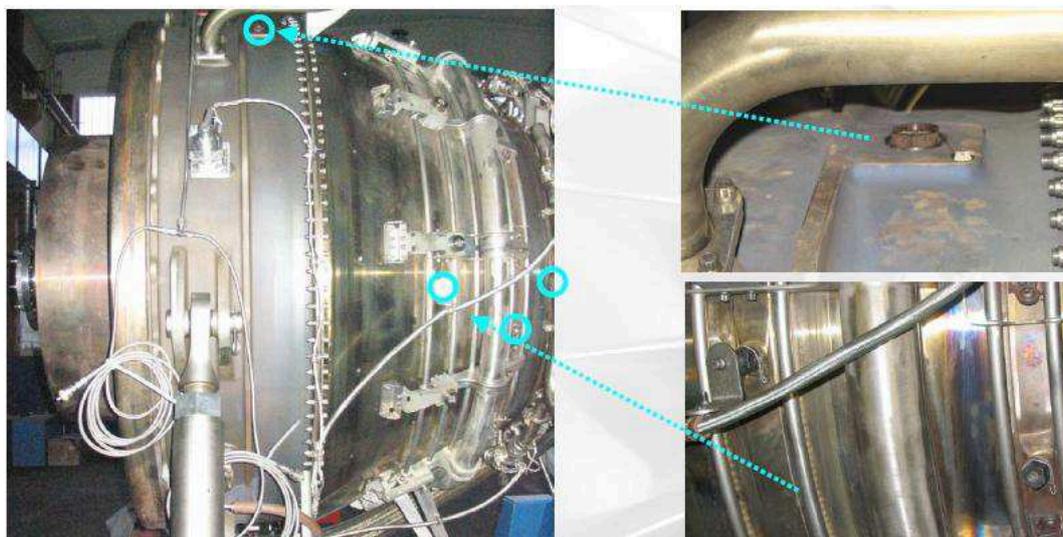
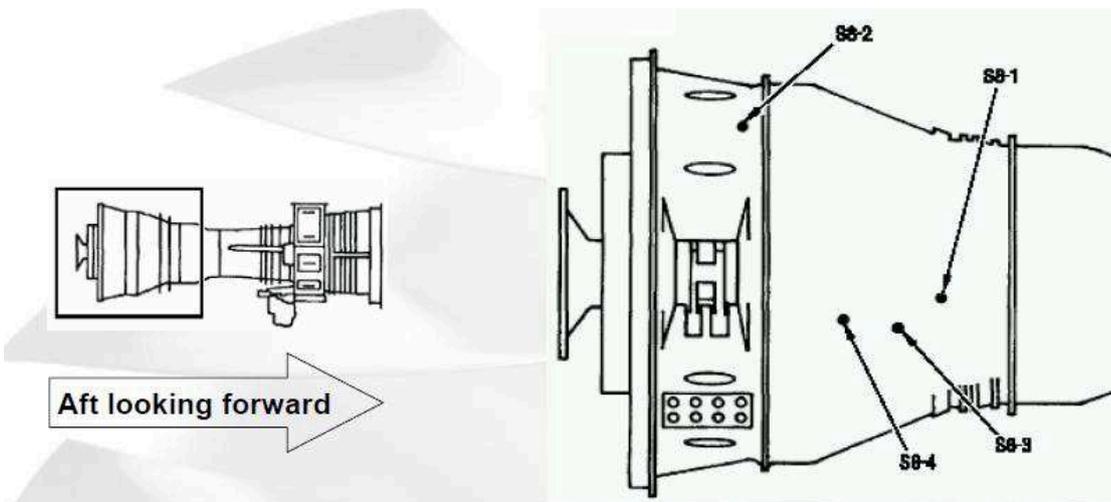
Acesso a inspeção dos seguintes componentes:

Turbina de alta pressão

- |                      |     |
|----------------------|-----|
| S7-1 - Rotor Stage 1 | FLA |
| - Rotor Stage 2      | ALF |
| S7-2 - Rotor Stage 2 | FLA |



**TURBINA DE BAIXA PRESSÃO**



Acesso a inspeção dos seguintes componentes:

Turbina de baixa pressão

- S8-1 - Rotor Stage 1 FLA
- S8-2 - Rotor Stage 5 ALF
- S8-3 - Rotor Stage 2 FLA
  - Rotor Stage 3 ALF
- S8-4 - Rotor Stage 3 FLA
  - Rotor Stage 4 ALF

## 12. CONCLUSÕES

Tendo em vista que o Brasil apresenta-se entre os grandes países fabricantes de aeronaves do mundo, é importante que os profissionais estejam sempre atualizados nessa relação homem-máquina-tecnologia. O ensaio por boroscopia ou videoscopia demonstra uma importantíssima ferramenta para o controle e manutenção corretiva, preventiva ou preditiva dos motores aeronáuticos. Com isso, foi possível conhecer os diferentes tipos de defeitos e portais de acessos nesses motores de aeronaves e estacionários.

## 13. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Pesquisa de campo nas operações da Empresa WDF Aviation Service Ltda COM/ANAC 1303-02 e Empresa Tropical Serviços de Manutenção Ltda. CHE/ANAC 0603-004

## 14. Comunicado de responsabilidade

O autor é o único responsável pelo material pesquisado.

**Abstract.** This white paper presents an overview of the use of non-destructive testing (NDT) by boroscopia and videoscopia how effective process of corrective maintenance, preventive, predictive in aircraft engines and derivatives stationary engines. This procedure in particular, detects damaged areas within the engine. These boroscopia tests shall be used to assess damage, those that can be caused by various external or internal factors such as intake of birds during flight phases, ingestion of foreign material (FOD), hail ingestion, shedding some internal parts during operation, etc. Inspections access and monitor critical engine areas, being used as an aid in judging approval or not to return to service.