



# INSPEÇÃO POR LÍQUIDO PENETRANTE NA HASTE DE COMANDO E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DO ROTOR DE CAUDA DA AERONAVE AIRBUS AS350 ESQUILO<sup>1</sup>

**José Rubens de Camargo | José Gildenys Charll dos Santos | Cristian Cley Paterniani Rita  
Emerson Augusto Raymundo | Jorge Luiz Rosa | Francisco José Grandinetti**

## RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de realizar uma inspeção por líquido penetrante na haste de comando do rotor de cauda e posteriormente analisar a vibração do rotor de cauda na aeronave AIRBUS AS350 (Esquilo). Sendo o helicóptero conhecido como uma máquina que possui elevados níveis de vibração e ruído, o processo de balanceamento de seus eixos e rotores, tarefa rotineira realizada principalmente após intervenções de manutenção, torna-se ainda mais importante. Sabe-se que uma manutenção de controle de vibração deve ser realizada para melhorar a eficiência da tripulação, proporcionar uma operação com segurança, fornecer conforto aos passageiros, garantir confiabilidade dos equipamentos eletrônicos e mecânicos e minimizar a fadiga do rotor e da fuselagem da aeronave. Para isso foi realizada uma pesquisa quantitativa, onde se traduz os números que correspondem às vibrações para a classificação e análise de informações, utilizando-se recursos e técnicas estatísticas, assim como uma pesquisa bibliográfica e documental teve sua grande importância neste trabalho. O líquido penetrante utilizado foi do Tipo I (fluorescente) e o método utilizado para a análise de vibração é a de soma de vetores a partir do nível de vibração indicado pelo aparelho Aces Model 2020 Probalancer Analyser com os acelerômetros da Aces Systems model 991D-1. Concluindo-se que tanto os ensaios não destrutivos como a análise de vibrações são ferramentas poderosas no auxílio à prevenção de falhas, diminuindo o custo de manutenção, prolongando a vida útil de um helicóptero e preservando o bem maior que é o fator humano.

**Palavras-chave:** Ensaio não destrutivo; Líquido penetrante; Vibração; Balanceamento. Helicóptero

## ABSTRACT

The present work has the objective of accomplishing a dye penetrant inspection on the tail rotor actuating rod and subsequently analyze tail rotor vibration on the aircraft AIRBUS AS350 (Esquilo). Being the helicopter known as a machine that has high levels of vibration and noise. The process of balancing your axles and rotors, routine task performed mainly after maintenance interventions, becomes even more important. It is know that a vibration control maintenance must be performed to improve crew efficiency, to provide safe operation, to provide passenger comfort, to ensure reliability of electronic and mechanical equipment and minimize aircraft rotor and fuselage fatigue. For this a quantitative research was performed, which translates the numbers that correspond to the vibrations for the classification and analysis of information, using statistical resources and techniques, as well as a bibliographic and documentary research had its great importance in this work. The penetrating liquid used was Type I (fluorescent) and the method used for vibration analysis is the sum of vectors from the vibration level indicated by the appliance Aces Model 2020 Probalancer Analyser with the accelerometers of Aces Systems model 991D-1. In conclusion, both non-destructive testing and vibration analysis are powerful tools in helping to prevent failures, lowering maintenance cost, extending the life of a helicopter and preserving the greater good that is the human factor.

**Keywords:** Non destructive testing; Penetrating liquid; Vibration; Balancing; Helicopter.

---

1 Artigo publicado nos Anais do EIC 2019 – Bioeconomia Diversidade e Riqueza para o Desenvolvimento Sustentável.

## 1. INTRODUÇÃO

Os END estão entre as principais ferramentas empregadas no controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para a garantia da qualidade, redução de custos e para o aumento da confiabilidade da inspeção, sendo que para obter resultados satisfatórios e válidos, elementos fundamentais devem ser considerados como: pessoal treinado, qualificado e certificado; equipamentos calibrados; e procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos. As principais técnicas são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, correntes parasitas; ultrassom e radiografia industrial (ABENDI, 2019).

Os ensaios não destrutivos têm evoluído no mercado aeronáutico mundial de forma sistemática, sendo que não há hoje uma peça constante de uma aeronave e que possa afetar a segurança de voo, sem um ensaio (MATAREZI, 2009).

Tais ensaios passaram a ter maior importância no mercado aeronáutico brasileiro quando do estabelecimento dos programas de aeronaves geriatricas matriculadas no Brasil. No mercado aeronáutico brasileiro, existem diversas empresas certificadas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) para a realização de END envolvendo produto aeronáutico (ANAC, 2013).

Os objetivos dos ensaios são, basicamente, garantir a qualidade dos materiais, com o menor custo, fornecer informações sobre as discontinuidades e corrigir o processo de fabricação. Essas discontinuidades podem causar danos muitas vezes irreparáveis, como a queda de uma aeronave (MATAREZI, 2009).

A indústria aeronáutica é altamente especializada e muito regulamentada, na fabricação, na prestação de serviços e na operação de aeronaves. Ela também exige a participação de trabalhadores qualificados. Nesse setor, o uso de ensaios é fundamental para a manutenção da qualidade e da capacidade operativa dos seus usuários.

Se tratando de um END em uma peça de um helicóptero, onde componentes dinâmicos devem ser desmontados e posteriormente montados, faz-se necessário uma análise de vibração nesse conjunto rotativo, pois a vibração é um fator constante para quem opera com helicópteros, este que possui vários componentes rotativos. Com a vibração excessiva, o helicóptero, os pilotos

e mecânicos são os que mais sofrem com esse fenômeno físico. Por isso é de suma importância o controle das vibrações nas máquinas rotativas, pois auxilia na prevenção de falhas, diminui o custo de manutenção, prolonga a vida útil de um helicóptero e preserva o bem maior que é o fator humano.

Na Engenharia Mecânica, o controle de vibrações é um campo de estudo bastante relevante, cujo principal objetivo reside em diminuir e controlar as vibrações de um sistema.

Portanto, este trabalho visa realizar um END por líquido penetrante na haste de comando do rotor de cauda da aeronave AIRBUS AS350 (Esquilo), helicóptero do tipo convencional, com rotor principal sobre a cabine, recebendo torque de um motor a reação por intermédio da transmissão principal, e com um rotor traseiro localizado na cauda da aeronave que também recebe torque do motor para gerar força antitorque. Para o END em questão, é necessário a desmontagem do rotor de cauda (RC) e da caixa de transmissão traseira (CTT) para se ter acesso à extremidade da haste, ao finalizar END e montar a CTT e o RC, faz-se necessário uma manutenção de análise de vibração do RC pelo processo de medição do Manual de Manutenção da Aeronave (MMA), e a partir dos resultados obtidos, utilizar um método geométrico, por meio de vetores, para o balanceamento do rotor de cauda (frequência de vibração moderada), cuja finalidade é manter a aeronave dentro do nível de vibração especificado pelo fabricante.

## 2. ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio por líquido penetrante é o método mais antigo, simples e amplamente utilizado em todas as áreas de fabricação.

Enquanto eram desconhecidas as consequências, muitas vezes desastrosas, que as descontinuidades superficiais poderiam acarretar nas peças, em razão da distribuição das tensões e sua influência à fadiga, o desenvolvimento de novos materiais induzia os engenheiros a melhorar seus projetos, visando principalmente a redução de peso. Isto acabou provocando sérios problemas como o que ocorreu, por exemplo, com eixos de locomotivas. Um enorme número de eixos partiu-se em serviço (RODRIGUES, 2019).

Conforme Adreucci (2019) a finalidade do ensaio por líquido é detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc. podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. É

muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos.

Para Adreucci (2019) o método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, o líquido retido dentro da descontinuidade é absorvido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície.

A inspeção deve ser feita sob boas condições de iluminação, se o penetrante é do tipo visível (cor contrastante com o revelador) o uso de fonte de luz natural ou suplementar é requerido, ou sob luz ultravioleta (negra), em área escurecida, caso o penetrante seja fluorescente. A interpretação dos resultados deve ser baseada no código de fabricação da peça ou norma aplicável ou ainda na especificação técnica do produto inspecionado. Nesta etapa deve ser preparado um relatório escrito que mostre as condições do ensaio, tipo e identificação da peça ensaiada, resultado da inspeção e condição de aprovação ou rejeição da peça. Em geral a etapa de registro das indicações é bastante demorada e complexa, quando a peça mostra muitos defeitos. Portanto, o reparo imediato das indicações rejeitadas com posterior reensaio, é mais prático, quando possível.

## **2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA HASTE DO ROTOR DE CAUDA**

De acordo com Airbus (2017) durante a aproximação para pouso de um helicóptero AS350, o piloto notou uma perda de eficiência no controle de guinada do helicóptero e teve que executar uma aterrissagem de emergência de acordo com o procedimento descrito no Manual de Voo. Não houve mais danos ocorridos.

A haste de comando do RC que foi inspecionada foi do helicóptero AIRBUS AS350 (Esquilo), mostrado na Figura 1, da Aviação do Exército, uma aeronave levee polivalente.

**Figura 1 - Helicóptero AIRBUS AS 350 (Esquilo) no pátio da Aviação do Exército.**



Fonte: Próprio autor.

A inspeção visual após o voo mostrou a ruptura da haste de atuação do RC, associada ao desacoplamento da manga de aço no interior do tubo de alumínio externo como pode ser mostrado na Figura 2.

**Figura 2 - Desacoplamento da manga de aço no interior do tubo de alumínio externo.**



Fonte: AIRBUS (2017)

### **3. RESULTADO DA VERIFICAÇÃO DA HASTE DE COMANDO DO RC**

O RC do helicóptero AIRBUS AS350 (Esquilo), mostrado na Figura 3, permite controlar a aeronave em relação ao eixo de guinada. O rotor traseiro, fabricado em materiais compósitos (predominância dos plásticos, apenas algumas peças de ligação são metálicas), é do tipo gangorra. Seu elemento básico é uma longarina emmecha (roving) de fibra de vidro-resina na qual são moldadas duas pás (HELIBRAS, 1992).

**Figura 3 - RC do AIRBUS AS350 (Esquilo)**



Fonte: Próprio autor.

O END foi realizado na extremidade da haste de comando do RC onde é acoplada na alavanca de passo, Figura 4.

**Figura 4 - Acoplamento da haste com a alavanca de passo do RC.**



Fonte: Próprio autor.

Legenda: a – Alavanca de passo; b – Haste de comando do RC.

Após a remoção das pás e da CTT, foi removida a tinta na extremidade da haste. Estando a haste pronta para ser inspecionada, seguiram-se as seis etapas previstas para a realização da inspeção:

- 1- Preparação da superfície: Foi aplicado o limpador de superfícies SKC-S, mostrado na Figura 5, diretamente na peça até que toda sujeira fosse removida utilizando panos limpos.
- 2- Aplicação do penetrante: Com a peça limpa e seca foi aplicado o líquido penetrante ZL-60D, do Tipo I – penetrante fluorescente - visível à luz negra, lavável água, Figura 6, onde se esperou o tempo suficiente para ocorrer a penetração nas discontinuidades superficiais pelo fenômeno da capilaridade.
- 3- Remoção do excesso de penetrante: Decorrido o tempo de penetração que varia de 10 a 30 minutos, foi aplicado o limpador SKC-S sobre um pano apenas para umedecê-lo, logo depois foi passado o pano sobre a superfície com penetrante até que não houvesse mais evidência de

presença do mesmo.

- 4- Revelação: Foi aplicado o revelador ZP-9F, pulverizando uma fina camada sobre a superfície a ser inspecionada como mostrado na Figura 7.
- 5- Avaliação e inspeção: Após aguardar de 5 a 15 minutos, foi aplicada a luz negra para verificar se há descontinuidades conforme mostrado na Figura 8.
- 6- Limpeza pós o ensaio: Foi realizada a limpeza com o limpador de superfícies SKC-S e panos limpos. Após realizar a inspeção e não ter encontrado trincas, um tratamento na superfície inspecionada foi realizado e posteriormente a extremidade da haste foi pintada.

**Figura 5 - Limpador de superfícies SKC-S**



**Figura 6 - Aplicação do Líquido penetrante ZL-60D**



**Figura 7 - Aplicação do Revelador ZP-9F**



**Figura 8 - Inspeção com luz negra**



Fonte: Próprio autor.

#### **4. RESULTADO DA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO DO ROTOR DE CAUDA**

Ao finalizar o END por líquido penetrante, foi montada no helicóptero a caixa de transmissão traseira juntamente com as pás do RC e reconectada a haste de comando do RC. Passado o END logo o helicóptero foi preparado para ser realizada uma análise de vibração do RC.

Segundo a ABNT NBR 7497/1982 (2000 apud BORGES, 2014) desde o início das criações das máquinas, surgiu um fator de muita influência nos projetos, o fator “vibração”, que é o movimento alternativo de um corpo ao redor de uma posição de equilíbrio, causado por uma força indesejável. O valor desta amplitude que se altera de máxima a menor posição, ou seja, descreve movimentos oscilatórios em relação à referência, onde a sua frequência é dada em Hertz (Hz). A análise de

vibração foi feita no pátio da Aviação do Exército situado na cidade de Taubaté-SP, o equipamento utilizado foi o Aces Model 2020 Probalancer Analyser com seus acessórios e acelerômetros da Aces Systems model 991D-1, como pode ser observado na Figura 9.

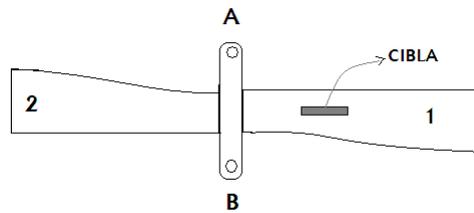
**Figura 9 - Aces Model 2020 com seus acessórios e acelerômetros**



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos, foi utilizado um método geométrico, por meio de vetores, para o balanceamento do rotor de cauda cuja finalidade é manter a aeronave dentro do nível de vibração especificado pelo fabricante. Primeiramente a aeronave foi preparada para a medição do nível de vibração no rotor de cauda, tal procedimento é encontrado no MMA, no cartão de trabalho 64.10.00.604 (AIRBUS, 2015). Eliminar o desbalanceamento excessivo devido à dispersão de peso de um elemento rotativo do conjunto do rotor traseiro é o objetivo dessa medição (AIRBUS, 2015). Como instrui o Airbus (2015), posicionou-se o helicóptero aproado ao vento (sem rajadas) e não superior a 15 kt (7,7 m/s) em superfície plana e horizontal. Logo se efetuou a medição durante um giro no solo com regime intermediário - rotor principal a 270 rotações por minuto (rpm) e velocidade de rotação do rotor traseiro de aproximadamente 1432 rpm - e regime nominal (velocidade de rotação do rotor traseiro de aproximadamente 2040 rpm no solo), obtendo-se os valores relacionados para o 1º giro (Tabela 1). Tendo em vista as tolerâncias descritas no MMA, o balanceamento é considerado satisfatório para um nível de vibração igual ou inferior a 0,35 IPS (polegadas por segundo) no regime intermediário e no regime nominal no solo. Para correção usam-se pesos na envergadura (1 ou 2 da Figura 10) de no mínimo 0,35 g e no máximo 5,35 g e na corda (A ou B da Figura 10) de no máximo 30 g, utilizando uma balança com precisão de 1/100 para se obter esses pesos (AIRBUS, 2015).

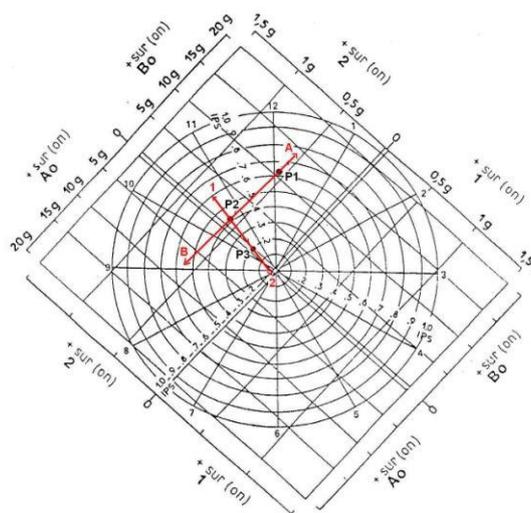
**Figura 10 - Posição da colocação dos pesos no RC**



Fonte: AIRBUS (2015) - adaptado pelo autor.

Observa-se, pela Tabela 1, que para o regime nominal o nível vibratório não está satisfatório, requerendo uma correção, esta realizada utilizando o gráfico da Figura 11. O ponto P1 mostra a posição da vibração medida no regime nominal. Observa-se então que, a princípio, é preciso colocar aproximadamente 0,5 g em 2 e 10 g em B. Deve-se realizar uma correção por vez, primeiramente no sentido da corda, para se descobrir a tendência do vetor.

**Figura 11 - Gráfico de correção no regime nominal do RC**



Fonte: AIRBUS (2015) – adaptado pelo autor.

Nesse caso foi colocado 10 g em B e feita uma nova medição encontrando os resultados descritos para o 2º giro (Tabela 1).

**Tabela 1 - Valores das medições do 1º e 2º giro no solo para o RC**

	270 rpm		NOMINAL	
	1º Giro	2º Giro	1º Giro	2º Giro
AMPLITUDE(IPS)	0,24	0,10	0,62	0,43
FASE HORÁRIA (h)	3,02	10:30	12,02	10:34
CORREÇÃO	-	-	10 g em B	0,6 g em 2

Fonte: Próprio autor.

Observando os valores e analisando o gráfico da Figura 11, tendo o ponto P2 locado no gráfico, pode-se observar o sentido do vetor da corda e conclui-se que é preciso fazer uma correção na envergadura 2 colocando 0,6 g. Após a correção uma nova medição foi realizada obtendo os valores vistos na Tabela 2.

Posicionando o ponto P3 no gráfico da Figura 11, nota-se o sentido do vetor da envergadura.

Com este nível de vibração enquadrado na tolerância pelo fabricante, conclui-se que o balanceamento é satisfatório, finalizando a manutenção de vibração no RC.

**Tabela 2 - Valores das medições do 3º giro no solo para o RC**

	270 rpm	NOMINAL
AMPLITUDE (IPS)	0,17	0,20
FASE HORÁRIA (h)	8:00	10:30
CORREÇÃO	-	-

Fonte: Próprio autor.

## 5. CONCLUSÃO

A inspeção por líquido penetrante feita na haste de comando de passo do rotor de cauda do helicóptero AIRBUS AS350 (Esquilo) comprovou que é uma inspeção simples, rápida, barata e confiável.

Com base no Boletim de Serviço de Alerta ASB No. AS350-67.00.76, seguiu-se o processo de ensaio estabelecido para ser realizado na haste, onde não foi encontrado trincas. Em seguida, uma análise de vibração foi realizada no rotor de cauda, pois no campo da engenharia mecânica, a manutenção de máquinas e equipamentos é uma das principais aplicações das vibrações. A manutenção preditiva tem como um dos seus pilares a análise qualitativa e quantitativa das vibrações (SOEIRO, 2008). Basicamente este estudo das vibrações teve três passos: a medição da vibração; a análise do sinal medido; e o controle da vibração. Tudo em prol da segurança de voo.

Conclui-se, então, que tanto os END como o controle da vibração nos helicópteros trazem benefícios para a manutenção e para o ser humano, contudo ferramentas poderosas para a segurança de voo, pois auxilia na prevenção de falhas, diminui o custo de manutenção, prolonga a vida útil de um helicóptero e preserva o bem maior que é o fator humano.

## REFERÊNCIAS

ABENDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Ensaios**

**não destrutivos e inspeção**, 2019. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly=>. Acesso em: 11/08/2019.

ANAC - AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Instrução Suplementar – IS Nº 43.13-003**

**Revisão C**, 2013. Disponível em: [http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-43-13-003/@@display-file/arquivo\\_norma/IS43.13-003C.pdf](http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-43-13-003/@@display-file/arquivo_norma/IS43.13-003C.pdf). Acesso em: 12/08/2019.

AIRBUS HELICOPTERS, **Maintenance Manual AS350**, 64-10-00-604 – Tail rotor blade – Inspection /Check, Balancing the tail rotor on long shaft TGB aircraft, 2015.

AIRBUS HELICOPTERS. **Alert Service Bulletin – ASB No. AS350-67.00.76**, Protective Measure, Rotor Flight Controls – Tail rotor flight controls, 2017.

HELIBRAS, Helicópteros do Brasil S.A., **Manual de Instrução para Mecânicos –THM Esquilo**, 1992.

MATAREZI, J. C. **Aplicação do Ensaio de Eddy Current Phased Array em Componentes Aeroespaciais**. Tese (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2009.

MATAREZI, J.C.; RODRIGUES, A. M. **Qualificação no ensaio por líquido penetrante Nível 1**.

Apostila Líquido Penetrante – Nível 1, DCTA, IFI, 2015.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Ensaio Mecânico de Materiais**. Aula 14 – Líquido Penetrante. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula14.pdf>. Acesso em: 10/08/2019.

SOEIRO, Newton Sure. **Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores**. Apostila de curso oferecido a Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, Belém-PA, 2008.