

# DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS EM COMPONENTES PNEUMÁTICOS DE AERONAVES CIVIS E MILITARES

## DEVELOPMENT OF TESTS IN PNEUMATIC COMPONENTS OF CIVIL AND MILITARY AIRCRAFT

M. D. Silva<sup>1</sup>, D. Campos<sup>2</sup>, T. L. M. Morgado<sup>2,3</sup>, H. Navas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Especialidade de Engenharia Aeronáutica - OE N° 19980

<sup>2</sup> Depto de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Univ. Nova de Lisboa

<sup>3</sup> CeFEMA – IST, Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados - Instituto Superior Técnico, Univ. de Lisboa



### RESUMO

*O presente artigo descreve equipamentos e ensaios requeridos para capacitar uma empresa do setor aeronáutico para a reparação e revisão geral de componentes pneumáticos de aeronaves. Os sistemas pneumáticos são preponderantes nas aeronaves de médio e grande porte, nas quais abrangem funções de controlo da massa de ar recolhida para pressurização, ar condicionado, anti gelo, bem como para o arranque dos reatores. Neste trabalho é estudada a operação de sistemas e componentes, assim como a metodologia de aprovação de ferramentas e equipamentos de ensaios especificados por fabricantes e integradores. Os componentes de sistemas pneumáticos referidos são atualmente aprovados com certificação de tipo de produto da nova família de aeronaves comerciais Embraer “E-Jet”. A metodologia regulamentada para a validação de ferramentas e equipamentos é apresentada, constituindo caso de estudo experimental de verificação dos orifícios calibrados com caudal de precisão, lançada em produção como prática expedita para o utilizador.*

### ABSTRACT

*This article describes equipments and tests required for an aeronautic company repair and overhaul capability of pneumatic systems components. Pneumatic systems are predominant in the narrow and wide body aircraft, including the compressed bleed air for cabin pressurization, air conditioning, anti ice, and reactors start-up functions. The operation of pneumatic systems and components is studied, as well as the approval methodology of tools and test equipments specified by manufacturers and system integrators. The pneumatic systems components referred are current type-certificate approved units of the new family of commercial aircraft Embraer E-Jet ". The regulated methodology for the validation of tools and equipment is presented in an experimental case study of calibrated orifices verification with air flow, launched in production as expedite practice for the user.*

### 1- INTRODUÇÃO

Os sistemas pneumáticos são recursos preponderantes nas aeronaves comerciais e de defesa, recorrendo geralmente a energia

pneumática recolhida nos andares intermédios e de alta pressão dos sistemas de propulsão. O ar comprimido (*bleed air*) tem como utilização primordial o controlo ambiental de suporte de vida, assim como a

operação dos sistemas anti gelo, presentes nas asas e nas entradas de ar de reatores ou turbo propulsores, assegurando também a energia requerida pelos seus próprios sistemas de arranque.

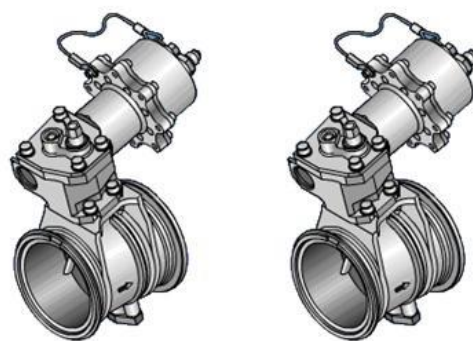
O sistema pneumático 36 (objeto de estudo deste trabalho) inclui condutas, válvulas de regulação, fecho e distribuição que operam com elevados caudais de ar comprimido, destinado a outros sistemas; tais como, o sistema de controlo ambiental interior, anti gelo e de arranque, para o que idênticos sensores, válvulas e acessórios conjugam funções de controlo (ATA Specification 2200 (iSpec 2200), 2007).

Tanto na generalidade dos sistemas de aeronaves comerciais como nas aeronaves de transporte militar, predominam tecnologias evolutivas de controlo de operação e de segurança em caso de falha, bem como o registo de dados de manutenção, no sentido da integração de controladores eletrónicos redundantes, como são os *AMS - Air Management System Controllers* e *PSHC - Pneumatic System Health Check* que têm provado a sua eficiência através da identificação dos componentes que falham ou que estão prestes a falhar antes de se prefigurarem situações de insegurança ou atrasos de despacho operacional (Embraer-GE, 2002; Embraer, 2011; Embraer, 2013).

## 2. DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS COMPONENTES

Tanto os controladores *AMS* como os *PSHC* obtêm dados dos sensores de pressão e temperatura e posição, que além de registo contínuo, de condições locais permitem avaliar a evolução das variáveis e estabelecer modos de operação e de segurança, por intermédio da pilotagem de válvulas pneumáticas de distribuição, controlo de pressão e temperatura (ver Fig. 1), designadas pela generalidade dos fabricantes como *HPSOV - High Pressure Shut Off Valves* e *PRSOV - Pressure Reducing Shut Off Valves*, (Hamilton Sundstrand, 2013).

As válvulas *HP - High Pressure* e *PR - Pressure Reducing*, são pneumaticamente pilotadas por electroválvulas, por sua vez



**Fig. 1** Válvula de alta pressão (*HP*) e válvula de baixa pressão (*LP*) com obturador de Borboleta (*Butterfly*) (Embraer, 2002)

controladas pelo *AMS* (Campos D., 2015). A modulação analógica progressiva de elevados caudais de massa de ar recolhido a pressões e temperaturas distintas é o propósito destas válvulas, em cujos ensaios se foca o presente artigo.

O ar comprimido nos compressores dos reatores esquerdo e direito da aeronave, é recolhido pelos sistemas esquerdo e direito habilita a alimentação cruzada a partir de um único ou ambos os reatores, ou a partir da unidade de potência auxiliar *APU - Auxiliary Power Unit* cuja função principal é produzir energia pneumática e elétrica na ausência de operação dos reatores, especialmente durante operações de embarque e/ou manutenção. Equipamentos de apoio terrestre podem também servir o mesmo propósito durante pesquisa de avarias (*trouble shooting*) ou manutenção. A origem preferencial de recolha de ar normalmente é gerida pelo *AMS* que “escolhe”, através da *HPSOV* e da *PRSOV*, o ar mais ou menos aquecido em andares superiores ou intermédios de compressão (Embraer-GE, 2002). É a partir do sistema nº 36 (ATA 100), que o controlo exercido por estas válvulas processa a mistura, regula e distribui a energia aos restantes sistemas pneumáticos a que compete controlar grandezas físicas, químicas e biológicas exigidas às suas funções. O controlo de pressão e temperatura na conduta processa-se através da alternância de ar recolhido entre alta e baixa pressão do compressor (*HP* e *LP*) com a modulação simultânea da *HPSOV* e da *PRSOV* (Embraer, 2011; Embraer 2013; Hamilton, 2013). Cabe aos *AMS* assegurar a

lógica de controlo para estabilizar a pressão relativa em valores da ordem de 310 kPa ~ (45 psig) a altitude inferior a 7600 m ~ (25000 ft) e uma pressão de 240 kPa ~ (35 psig) a altitude superior. Em determinados sistemas pneumáticos é o *FADEC - Full Authority Digital Engine Control* que assegura o fecho completo da correspondente *HPSOV*, a regimes em que as condições de serviço atingem valores máximos limite de cerca de 1240 kPa ~ (180 psig) e/ou 260 °C ~ (500 °F), voltando a *HPSOV* a operar em modulação contínua em condições normais de pressão e/ou temperatura na conduta (ANSI/ASHRAE Standard 62.1, 2016; Embraer, 2011; Embraer, 2013; USAF TO 00-25-223, 2013).

A elevados regimes de potência dos reatores, como ocorre na descolagem, aumenta a pressão e temperatura dos andares superiores relativamente aos andares intermédios de compressão, pelo que nestas circunstâncias a *HPSOV* limita o caudal de entrada de ar, mantendo a pressão até obturar a *HP* se necessário (Campos, 2015). Em simultâneo a *PRSOV* vai abrindo progressivamente até que o caudal de ar recolhido passa a ser debitado pelo andar intermédio; por outro lado, como a probabilidade de formação de gelo é maior a baixa altitude, isto pode exigir ar mais quente, pelo que a *HPSOV* é controlada para admitir temperaturas da ordem dos 230 °C ~ (446 °F) (Embraer-GE, 2011; Embraer, 2013).

Cabe ao controlador *AMS* e às *HPSOV* o controlo simultâneo da pressão e da temperatura nas condutas pneumáticas, sendo particularmente na descolagem que são mais elevados os gradientes de pressão e temperatura entre a entrada de ar e os seguintes andares de compressão até último andar do compressor. Algumas aeronaves encarregam os *FADEC* de comandar diretamente o fecho das *HPSOV*, antecipando a prevenção de falhas potenciais nesta fase em que todo o impulso fica

disponível. Por imperativo legal tais avarias têm de ser demonstradas como “extremamente improváveis”<sup>\*1</sup>, (European Union, 1997; European Union, 2003).

Uma estimativa grosseira sugere que os sistemas pneumáticos consomem em cerca de 1% da energia de propulsão em voo de cruzeiro e é o *ECS - Environmental Control System* que exige a maior parte dessa energia. Consoante as condições exteriores, o *ECS* facilmente supera o consumo de 3/4 da energia pneumática disponível, para proporcionar condições de conforto interior entre 19 °C a 30 °C, a cerca de 100 kPa e 60% de HR - Humidade Relativa, face a condições exteriores extremas entre (-60 °C e +50 °C; de 10 a 100 kPa e HR de 0% a 100%) (ATA 100).

Muitas vezes apenas designadas (*Bleed valves*), são particularmente as *HPSOV*, também apropriadamente designadas como (*High Stage Bleed Valves*), um dos componentes pneumáticos que operam em condições mais adversas. Usam-se por isso ligas metálicas resistentes ao calor, casquilhos de carbono em vez de rolamentos, vedantes metálicos elásticos, segmentos de carbono e lubrificantes sólidos e não se incorporam partes elétricas internas nestas válvulas. A sua reparação exige frequente recuperação de desgastes limitados e a eliminação de corrosão superficial onde se aplicam revestimentos metálicos duros e recurso a tecnologias de “Thermal spray” como o *HVOF - High Velocity Oxygen Fuel*. A sua requalificação para serviço, pode não exigir elevadas temperaturas de ensaio, mas a monitorização de fugas internas e o tempo de resposta dinâmica são reveladores da sua condição, pelo que a conformidade dos procedimentos e uso de ferramentas e equipamentos de ensaio, *TTE - Tools and Test Equipments* aprovados, são da maior importância (ARINC report 668-1, 2013).

O processo de autoavaliação da capacidade de reparação e de industrialização da manutenção de componentes é

\*1 - As agências *EASA - European Aviation Safety Agency* e a *FAA - Federation Aviation Administration* adotam iguais requisitos de conformidade para avarias classificadas como “Catastróficas”; ou seja considerando  $\lambda$ , a taxa de avaria, como sendo o inverso do tempo médio entre avarias

em horas, são consideradas como “Extremamente improváveis” se  $\lambda < 10^{-9}$ /hora de voo e, como “Extremamente remotas” se  $\lambda < 10^{-7}$ / hora de voo).

necessariamente antecedido de detalhada análise de requisitos e materiais, contando com toda a documentação técnica atualizada, recursos e técnicos qualificados pelo Sistema de Qualidade da Organização (ATA Specification 2200 (iSpec 2200), 2007; Mobley, 2004; Palmer, 2006).

A capacidade de intervenção em determinados componentes pneumáticos prefigura casos de negócio, cujos investimentos, rentabilidade e retorno de capital determina a importância da Engenharia e da Gestão no processo de averbamento de capacidade de reparação de novos componentes e ou sistemas, evidenciando mais uma vez a importância deste trabalho.

### 3. ENSAIOS DE COMPONENTES

Os ensaios a realizar aos diversos componentes de sistemas de aeronaves correspondem à simulação da operação com valores de variáveis funcionais especificados pelos fabricantes em Manuais de manutenção aplicáveis; tais variáveis, como pressões, caudais e temperaturas, servem para aferição e diagnóstico de anomalias e habilitam a certificação de aptidão funcional, integridade estrutural e segurança de cada componente identificado por referência.

Em qualquer visita de manutenção, reparação ou revisão de um componente numa laboratório ou área de especialidade é imperativa a emissão do certificado de aptidão para serviço, que consiste num formulário regulamentado por Autoridades aeronáuticas como as Agências Europeia EASA e/ou a FAA – EUA ou Certificados de conformidade, assim designados pelos operadores da indústria de Defesa.

A necessidade de ensaios pneumáticos de alta pressão conduz a riscos acrescidos, pelo que a formação contínua dos técnicos de manutenção em fatores humanos e segurança operacional é um requisito essencial, assim como adequadas infraestruturas que nesta caso compreendem a necessidade de compartimentos celulares, de ensaio ao alcance da vista, onde em

operação é excluída a permanência de pessoas, por razões associadas ao perigo de rebentamento de componentes com projeção de partes, riscos de queimaduras e níveis perigosos de ruído.

Pressões estáticas, até 14000 kPa ~ (2000 psi) ou mais chegam a ser requeridas para ensaios de resistência estrutural (designados também por *Proof Pressure Test*) após reparação de válvulas e de outros componentes pneumáticos.

Os elevados caudais de ar exigido apenas para a renovação de ar requerida aos ECS em operação podem ser estimados pela quantidade de passageiros, relativamente à necessidade de 5 Std.litros / (s·pax) (ANSI/ASHRAE Standard 62.1, 2016).

Por outro lado a temperatura de ar aquecido para o ensaio, pode superar largamente as temperaturas máximas de operação, 204°C ~ (400 °F), pelo que as instalações e instrumentação necessária é particularmente exigente para o ensaio de componentes pneumáticos de aeronaves (Embraer, 2011; Embraer, 2013; ISO 6358-1:2013; O’Keefe Controls Co., 2003.)

#### 3.1 Metodologia de ensaios

Conforme o âmbito da inspeção, o equipamento equivalente ao originalmente especificado pelo fabricante exige registo de dados ou eventual certificado de conformidade que proporcione rastreabilidade e aceitação da substituição como prova de aptidão experimentalmente executada aplicável. De acordo com as normas internas da organização, *AMO - Approved Maintenance Organization*, a sequência de desenvolvimento é iniciada com estudo e desenho técnico aprovado. No caso de tal estudo não existir ainda ou ser desnecessário face à especificação, as melhores práticas sugerem que seja sempre considerado o âmbito de utilização segundo a *FAA* e/ou a *EASA*. As diretrizes (ARINC, 2013) satisfazem os critérios de equivalência de ambas agências (*EASA / FAA*).

Equipamentos universais de ensaios, ou com múltiplos propósitos, têm como função primária fornecer energia e controlar



variáveis mensuráveis, cabendo a cada setup e à instrumentação fixa ou portátil instalada, a medida das variáveis de comando e controlo, em conformidade com as especificações de fabricante.

A utilização de equipamentos de medida tem de demonstrar que cada instrumento está identificado e calibrado, sendo adicionalmente necessário que sirvam os requisitos de resolução, precisão, reprodutibilidade e dispersão de medidas repetidas, em condições funcionais específicas.

A utilização de variáveis correlacionadas com rigorosos dados e resultados, pode assegurar a inequívoca conformidade da segurança operacional e de comportamento físico, lógico e funcional, tanto na inspeção de um primeiro artigo/componente, *FAI - First Article Inspection*, com o qual são validados *TTE*; são registados os equipamentos de medida e controlo, e os resultados obtidos em cada operação, devendo assim ficar documentalmentemente registados todos os ensaios. O diagrama da Fig. 2 ilustra a metodologia de demonstração de equivalência de *TEE*. Onde as siglas *AMM*, *CMM* e *IAW* significam respetivamente *Aircraft Maintenance Manual*, *Component Maintenance Manual* e *In According With*.

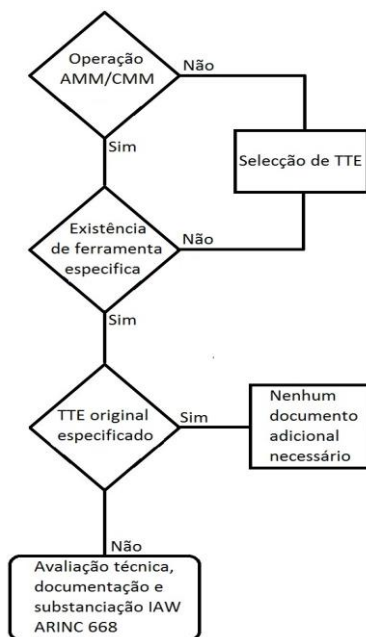


Fig. 2 Metodologia de Demonstração de equivalência (Campos, 2015)

#### 4. CASO DE ESTUDO

Na validação dos ensaios de uma *HPSOV*, de determinada aeronave é considerada a necessidade de avaliar a resposta funcional que depende de orifícios calibrados que constituem *TTE* peculiar, com influência na resposta dinâmica, devido à restrição de caudal de ar induzido nos ensaios operacionais. Para as restantes *TTE*, é identicamente necessário desenho técnico devidamente aprovado, assim como certificado de conformidade correspondente.

Os orifícios das válvulas têm influência crucial nos tempos de abertura e fecho de determinada *HPSOV*, (4 e 5 segundos respetivamente nas condições preconizadas nos *CMM*). A *FAI* exige a aferição dos orifícios como evidência de aptidão para ensaios posteriores.

É âmbito deste trabalho o estudo experimental de verificação dos orifícios calibrados com caudal de precisão. E, desta forma, é apresentado neste artigo o procedimento de ensaios utilizados para cumprir os requisitos obrigatórios impostos internacionalmente pela *EASA/FAA*.

##### 4.1 Desenvolvimento de bancos de ensaio

No âmbito do projeto que inclui o desenvolvimento deste trabalho, o responsável de projeto designou os bancos de ensaio usados para calibrar as válvulas pneumáticas referidas no capítulo 2 deste artigo, por *LATS - Low airflow test system*, e por *HATS - High Airflow Test System*. Estes dois bancos de ensaios são geridos pelo programa de calibração da empresa, quando classificados como Equipamentos de Medida de Precisão ou Ensaio (como é o caso dos medidores de caudal, temperatura e pressão).

Para a medição de caudais de fugas de ar, o *LATS*, ver Fig. 3, tem capacidade de leitura de caudais inferiores a ~500 St.l/min a 358 *psi*, e pode utilizar pressões estáticas relativamente elevadas.

O *HATS* é constituído por três módulos, como mostra o esquema da Fig. 4 e a imagem real apresentada na Fig. 5. Os Módulos I e II são baseados num banco de



Fig. 3- LATS

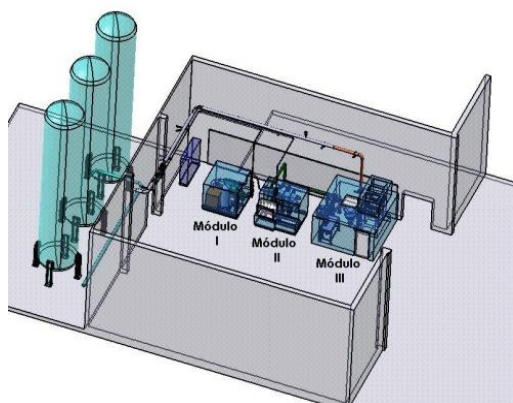


Fig. 5 - Layout de projeto HATS



Fig. 6 - HATS

ensaios da Bauer Inc. EUA, desenvolvido segundo especificação da empresa para componentes de reatores. Foram realizadas alterações ao projeto inicial, até à inclusão da funcionalidade de aquecimento e controlo de caudal de massa de ar com a respetiva instrumentação para ensaios com ar comprimido desde a temperatura ambiente

até  $200^{\circ}\text{C} \sim (392^{\circ}\text{F})$ , sendo a potência de aquecimento instalada, o alcance e a precisão da instrumentação, fatores a evoluir à medida das necessidades.

O sistema de aquecimento de ar cuja potência total é de 47 kW, consiste numa bateria de três resistências elétricas em série (ver Fig. 7), cuja temperatura limite do revestimento é de  $815^{\circ}\text{C} \sim (1500^{\circ}\text{F})$  à saída.

O HATS é alimentado por uma conduta de 150mm de diâmetro nominal a uma pressão nominal de 10 bar a partir de dois reservatórios de  $30\text{ m}^3$ , com capacidade de estabilizar caudais de massa de ar seco, até 70 kg/min. A câmara de ensaios do Módulo II dispõe de adaptadores de diâmetros iguais a 64 mm.

A cabina do Módulo III assegura segurança física e atenuação acústica, de cerca de 50 dB de nível de ruído devido a descargas de caudal de componentes em ensaio. No interior da cabina podem ser aplicados adaptadores de distintas formas de diâmetro equivalente a 600 mm.

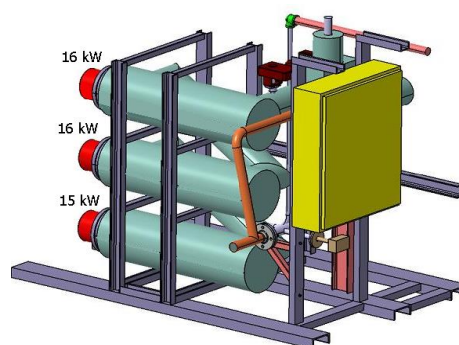


Fig. 7 Resistências de aquecimento, Módulo II e HATS

#### 4.2 Fabrico e ensaio dos Orifícios

Na Fig. 8 é apresentado um desenho do AN 815-X modificado com a aplicação de um “Insert” com um orifício coaxial calibrado centrado que restringe o diâmetro interior à medida especificada pelo CMM aplicável.

O sistema de ligação dos acessórios para os ensaios de calibração realizados no âmbito deste trabalho, está ilustrada na Fig. 9.

Os resultados dos ensaios experimentais a seguir exemplificados foram corrigidos face aos registos dos certificados de calibra-

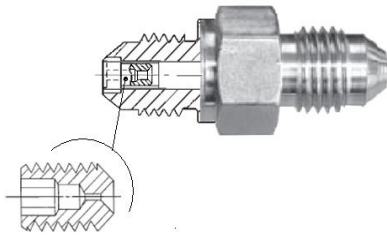


Fig. 8 AN 815-X Equipado com (Insert) calibrado

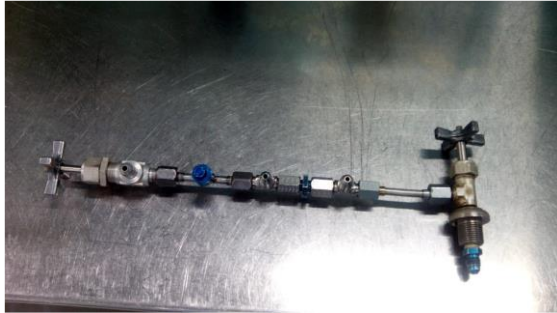


Fig. 9 Sistema montado para a análise de calibração dos orifícios

ção de medidores utilizados\*<sup>2</sup>, respetivamente para caudais inferiores a 50 St.l/min e a 1000 St.ml/min, usando para ambos os casos dois diâmetros de orifícios;  $\varnothing = 0,660$  mm,  $\varnothing = 0,813$  mm. Com os dados obtidos para cada orifício foram determinadas as funções da variação de pressão,  $\Delta P = (P_{in} - P_{out})$ , em kPa, relativamente ao caudal, em litros por minuto de ar, em condições standard, (St.l/min) referente à atmosfera padrão, para níveis distintos de pressão de entrada,  $P_{in}$ , e de contra pressão à saída do orifício,  $P_{out}$ .

#### 4.3 Ensaios experimentais dos orifícios

Não sendo o consumo de ar de servo pilotagem, um parâmetro de controlo registado, é oscilante e determinante durante a modulação, sendo as tolerâncias dos orifícios que limitam os tempos de abertura e fecho. Os seguintes ensaios experimentais permitem assegurar a contínua conformidade dos atuais orifícios, podendo assegurar melhores resultados do que a simples verificação dimensional. Os ensaios experimentais foram efetuados e repetidos periodicamente com valores de pressão estabilizados passo a passo, mantendo  $P_{out} = 80 \pm 1\% \cdot P_{in}$

\*<sup>2</sup> - Sendo anualmente calibrados por laboratórios credenciados, a tecnologia deste tipo de medidores de massa de ar, normalmente não exige correção face às

com auxílio de uma válvula micrométrica ou de agulha, a utilização de ar comprimido desconaminado e desumidificado a temperaturas e pressões barométricas registadas.

##### 4.3.1 $\Delta P$ Reduzido

Uma análise experimental inicial de suporte documental foi efetuada a baixas pressões, correspondentes a valores inferiores à pressão servo pilotagem ou de afetar a pré tensão da mola instalada. Com  $\Delta P$  reduzido, o obturador Borboleta (ver Fig. 1) mantém-se normalmente fechado com pressão relativa nula ou reduzida. O consumo de ar permitido pelos orifícios nestas condições correlaciona-se com as curvas ilustradas na Fig. 10, ajustadas para os orifícios de diâmetros 0,660mm e 0,813mm, respetivamente.

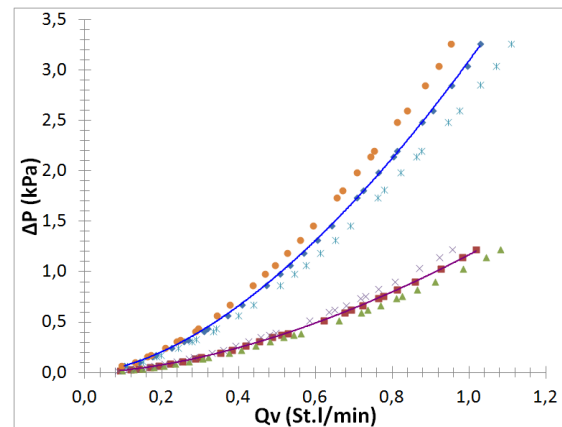


Fig. 10  $\Delta P$  em função do caudal standard

As equações 1 e 2 representam, respetivamente, as variações de pressão obtidas experimentalmente e representadas no gráfico da Fig. 10 (equação (1) linha azul; equação (2) linha vermelha).

$$\Delta P_{0,660} = 3,09 \cdot (Q_v)^{1,68} ; \quad R^2 \approx 99,9\% \quad (1)$$

$$\Delta P_{0,813} = 1,17 \cdot (Q_v)^{1,70} ; \quad R^2 \approx 99,9\% \quad (2)$$

onde  $\Delta P$ , representa a variação de pressão em [kPa],  $Q_v$  o caudal standard em [St.l/min] e  $R^2$  o coeficiente de correlação.

condições de pressão e temperatura de serviço, mas necessita de tempo de estabilização das condições de utilização.



### 4.3.2 $\Delta P$ a Pressões de serviço

Utilizado pressões de entrada, da ordem das pressões de serviço obtiveram-se distribuições lineares de variação de pressões,  $\Delta P$ , em função do caudal,  $Q_v$ , para cada orifício, com bons fatores de correlação linear (ver Fig. 11), ajustadas para os orifícios, onde *LIC* e *LSC* são respetivamente os Limites Inferior e Superior de Controlo dos orifícios.

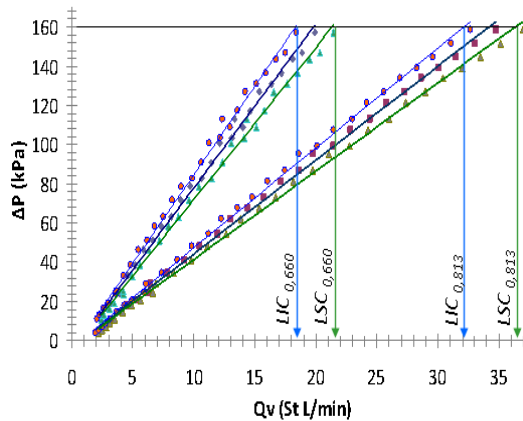


Fig. 11  $\Delta P$  em função do Caudal Standard

### 4.3.3 Ensaio dos orifícios em série

Devido à maior restrição do orifício de diâmetro 0,660 mm, nestas condições interessa particularmente o ensaio com este orifício a montante, conforme ilustra a Fig 12. Como se pode observar na Fig. 13, a função da variação da pressão versus caudal standard, volta a não se ajustar a uma função linear, todavia tal como nos ensaios anteriores os valores observados com o mesmo *setup* continuam a ser reproduzíveis.

Foi verificado que o regime crítico ocorre quando  $P_{out}/P_{in}=0,528$ , na secção crítica. A ordem de grandeza dos tempos de estabilização foram digitalmente simulados no âmbito do presente artigo em *Simscape<sup>TM</sup>*, (aplicação *Mathworks Corp.* sobre *Matlab®* e *Simulink®*).



Fig. 12 Orifícios instalados em série

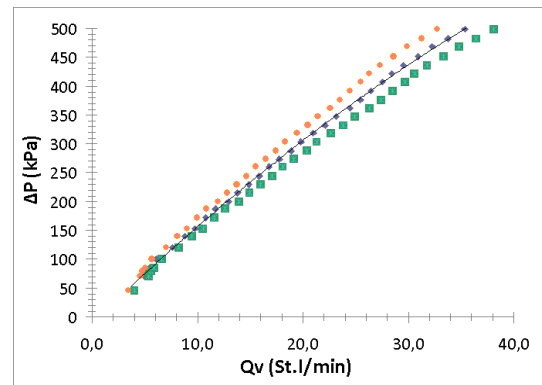


Fig.13  $\Delta P_{0,660}$  em função do Caudal Standard; (Ref. montagem em série figura 12)

A análise de estabilização termodinâmica do fluxo de ar foi numericamente simulada para avaliação do tempo necessário para o registo de valores, para um orifício de 0,660 mm de diâmetro, em série com um orifício de 0,813 mm de diâmetro.

Os gráficos das Fig. 14, 15, 16 e 17 ilustram o *display* virtual da evolução das variáveis, temperatura, caudal, fluxo de calor e variação de pressão, desde o instante zero (0) da simulação em que a pressão relativa de entrada é constante e igual a  $6,898 \times 10^5$  Pa  $\sim$  (100 psi).

A expansão do ar provoca um arrefecimento entre a entrada e a saída de ar do orifício. Na prática há perda de calor por transmissão entre o ar, tubos e acessórios e

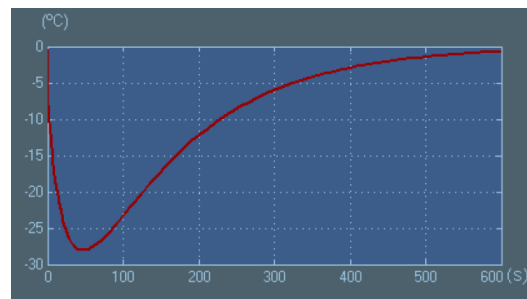


Fig. 14 - Estabilização da Temperatura (°C) de ensaio do orifício

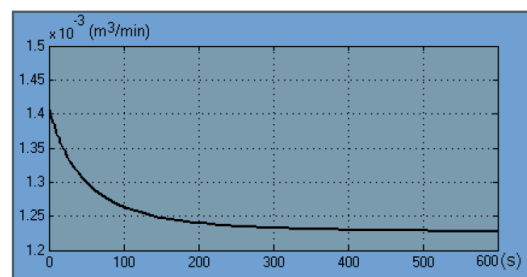
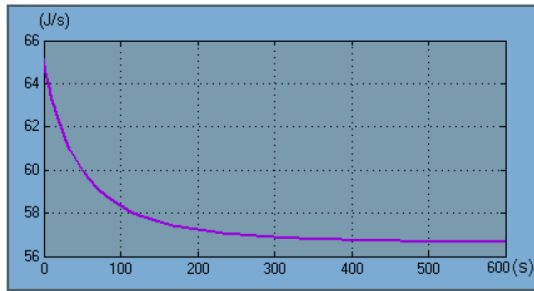
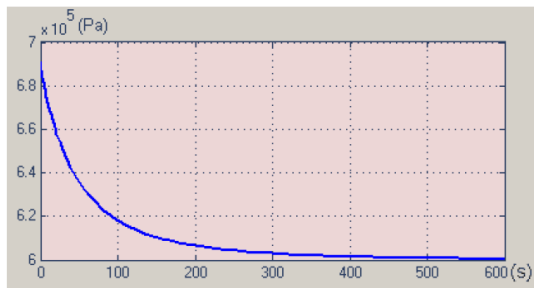


Fig.15 Estabilização do Caudal ( $m^3/min$ )





**Fig.16** Estabilização do Fluxo de calor (J/s)



**Fig.17** Estabilização de ΔP (Pa)

destes para o ambiente. Ao solver Simscape, impões-se o fluxo isentrópico, determinando-se o tempo necessário para que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do orifício estabilize num valor próximo de zero, (0) graus Celsius. Esta instrução consta necessariamente dos registos de ensaio assegurando a redução de erros relativos às condições de pressão e temperatura e caudal de ar.

Por imposição (ARINC Report 668-1, 2013; ISO 5167-1, 2013, e ISO 6358-1, 2013), a metodologia de calibração deve ser avaliada, como se procurou no presente artigo, em se recorreu a verificação de orifícios calibrados com medidores de dispersão térmica.

## 5. CONCLUSÕES

Perante orifícios de referência com diâmetro tão reduzido, a medição direta de tolerâncias da ordem de  $\pm 0,025$  mm pode constituir uma conveniente prática de avaliação prévia da sua conformidade, com fluxo controlado de ar comprimido através dos mesmos orifícios.

Tendo em conta a simultânea necessidade de assegurar que o ar de ensaio está isento de contaminantes sólidos e líquidos, a

verificação local da pressão diferencial, em condições pré determinadas, como registo da pressão de alimentação, barométrica e diferencial, da temperatura e do caudal de massa estabilizado, o ensaio constitui um abrangente procedimento de aferição, prático e eficaz, ao alcance de executantes qualificados, com recurso equipamentos de medida devidamente calibrados.

Sendo os típicos orifícios referidos, fabricados ou adquiridos a fabricantes da especialidade devem ser mantidos sob controlo de calibração, prevenindo alterações dos próprios tubos e acessórios de ligação, para habilitar designadamente a correta avaliação de resposta operacional e dinâmica.

Através da análise de sensibilidade do coeficiente de descarga de cada orifício isolado, conclui-se que o presente método de verificação oferece o necessário rigor para a avaliação indireta da tolerância dimensional de  $\pm 25 \mu\text{m}$  dos orifícios, concluindo-se que uma variação de  $2 \mu\text{m}$  é detetável por um medidor de caudal com uma resolução de apenas  $0,1 \text{ St.l/min}$  sendo esta conclusão extensível a ambos os orifícios referidos numa gama de ensaios com pressão de entrada de 75 a 120 psi.

Para uma pressão relativa de entrada, no orifício  $\varnothing=0,660$ , com  $P_{in} = 827,37 \text{ kPa} \sim (120,0 \text{ psig})$  e com uma variação de pressão,  $\Delta P$  de  $157,20 \text{ kPa} \sim (22,8 \text{ psi})$ , o caudal de ar através do orifício tem de ficar compreendido entre  $[18,42 \leq Q \leq 21,44] \text{ St.l/min}$ .

Com igual pressão de entrada, no orifício  $\varnothing=0,813$  e  $\Delta P$  de  $158,6 \text{ kPa} \sim (23,0 \text{ psi})$  tem de apresentar um caudal compreendido no intervalo  $[31,4 \leq Q \leq 38,6] \text{ St.l/min}$ .

## REFERÊNCIAS

- ANSI/ASHRAE Standard 62.1, 2016. *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*;
- ARINC report 668-1, 2013. *Guidance for Tool and Test Equipment (TTE) Equivalency*;
- ATA 100. *ATA definitions of aircraft groups, Systems and sub-systems*. Aircraft parts manufacturing assistance (PMA) DAR services. S-Tech Enterprises, LLC. <http://www.s->

- [techent.com/ATA100.htm](http://techent.com/ATA100.htm) [Accessed 18 June 2016];
- ATA Specification 2200 (iSpec 2200), 2007. *Information Standards for Aviation Maintenance*. Air Transportation Association of America, Inc.;
- Campos, D., 2015. *Capacitação de uma Empresa Aeronáutica para Manutenção de alguns Componentes de Aeronaves*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa;
- DWYER INSTRUMENTS INC, 2012. *Calibration Certificate, Device GFM-2133, 12 Dec 2012 & Calibration Certificate, Device GFM-2107*;
- Embraer-GE, 2002. *Multimedia Based Training*, GE Capital Aviation Training Ltd.
- Embraer, 2011. *Engine Pneumatic Bleed System, Embraer 190/195 Aircraft Maintenance Manual*.
- Embraer, 2013. *Engine Pneumatic Bleed System, Aircraft maintenance manual*, PN 36-11-00, Embraer 190-SDS 2823 rev8.
- Embraer, 2013. *Nacelle pressure regulating shutoff valves, aircraft illustrated parts catalog*, PN 36-11-03, Embraer 190 - AIOC 2819 rev28.
- European Union, 1997. *Directive 97/23/EC of the european parliament and of the council of 29/05/1997 on the approximation of the laws of the member states concerning pressure equipment* (OJ L 181, 9.7.1997, p. 1).
- European Union, 2003. *Commission regulation (EC) No 2042/2003 of 20/11/2003 on the continuing airworthiness of aircraft and aeronautical products, parts and appliances, and on the approval of organisations and personnel involved in these tasks*, Official journal of the European Union.
- Hamilton Sundstrand, 2013, *An united technologies company, Component maintenance manual with illustrated parts list, High Stage Bleed Valve* PN 1001246-1, 1001246-2, 1001246-3, rev16.
- Hamilton Sundstrand, 2013. *An united technologies company, Component maintenance manual with illustrated parts list, Bleed Valve* PN 1013652-1, rev2.
- ISO 5167-1: 2013. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full - Part1: General principles and requirements*;
- ISO 6358-1:2013. *Pneumatic fluid power - Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids - Part 1: General rules and test methods for steady-state flow*;
- Mobley, R.K., 2004. *Maintenance Fundamentals*, 2nd Ed., Elsevier, United States.
- O'Keefe Controls Co., 2003. *Choked Flow of Gases*. [Accessed 18 June 2016] <http://okcc.com/PDF/Choked%20Flow%20of%20Gases%20pg.48.pdf>;
- Palmer, R. D., 2006. *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*, 2nd Ed., McGraw-Hill, United States;
- USAF TO 00-25-223, 2013. *Integrated Pressure Systems and Components, Technical Manual. Change 8, 25 July 2013*.

### Siglas:

AMM	Aircraft Maintenance Manual
AMO	Approved Maintenance Organization
AMS	Air Management System Controller
ANSI	American National Standards Institute
APU	Auxiliary Power Unit
CMM	Component Maintenance Manual
EASA	European Aviation Safety Agency
ECS	Environmental Control System
FAA	Federal Aviation Administration (USA)
FADEC	Full Authority Digital Engine/Electronic Control
FAI	First Article Inspection
HATS	High Airflow Test System
HP	High Pressure
HPSOV	High Pressure Shut Off Valve
HR	Humidade Relativa
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
IAW	In Accordance With
LATS	LATS – Low Airflow Test System
LP	Low Pressure
PR	Pressure Reducing
PRSOV	Pressure Reducing Shut Off Valve
PSHC	Pneumatic System Health Check
TTE	Tools and Test Equipments