

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Análise Numérica da Válvula Atmosférica – Projeto Aeromóvel

por

Maurício B. Susin

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 23 de junho de 2008.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Análise Numérica da Válvula Atmosférica – Projeto Aeromóvel

por

Mauricio B. Susin

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Gilberto Cunha
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Eduardo Perondi

Co-orientador: Prof^a. Adriane Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 23 de junho de 2008.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que não tiveram as mesmas condições que tive para realizar uma faculdade. Que nosso País e nosso Rio Grande sejam um lugar melhor para as próximas gerações.

Gostaria de agradecer as pessoas que influenciaram de alguma forma na realização deste trabalho. Aos meus orientadores, prof. Eduardo Perondi e prof^a. Adriane Petry, pela competência e incentivo, ao amigo eng. Natanael Bonato, sempre disposto a colaborar, aos meus pais e minha namorada, pelo apoio em todos os momentos.

SUSIN, M. B., Análise Numérica da Válvula Atmosférica – Projeto Aeromóvel, 2008. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RESUMO

No atual Aeromóvel, a válvula atmosférica se configura em quatro posições apenas: totalmente aberta, 2/3 aberta, 1/3 aberta ou totalmente fechada. Tendo em vista o aperfeiçoamento do sistema de controle do Aeromóvel, busca-se um comportamento contínuo de suas pás, substitutivo ao atual esquema. Para isso, se faz necessário o conhecimento das propriedades do escoamento do ar através da válvula, em seus diferentes ângulos de rotação. Com uma abordagem numérica, analisou-se a perda de pressão na válvula para diferentes vazões prescritas. A perda se mostrou fortemente influenciada pelo ângulo de abertura das pás e tornou-se considerável após um determinado ângulo crítico. Foi estudado, da mesma forma, o coeficiente de perda K, que se mostrou compatível com os dados obtidos na literatura. A válvula atmosférica apresentou um comportamento singular para ângulos próximos à total abertura, causando uma redução da perda de pressão. Verificou-se, após modificações geométricas, que esse comportamento é devido à forma de suas pás.

PALAVRAS-CHAVE: válvula atmosférica, análise numérica, perda de pressão.

SUSIN, M. B., Numerical Analysis of Aeromovel's Parallel Blade Damper, 2008. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ABSTRACT

In the present Aeromovel, the parallel blade damper operates in four positions only: totally opened, 2/3 opened, 1/3 opened and totally closed. Relating to the improvement of Aeromovel control system, a continuing behavior is desirable as a substitutive for the nowadays scheme. To achieve that, it is necessary the knowledge of the air flow properties throw out the damper, in its different rotation angles. By means of a numerical calculating method, it was analyzed the pressure loss of the damper to different prescribed flows. The loss got strongly influenced by the blades opening angle and became considerable after a determined critical angle. In the same way, the loss coefficient K was studied, which showed suitable with data gotten in the literature. The parallel blade damper had a singular behavior to angles nearby to the total opening, causing a pressure loss reduction. After geometric modifications, it was verified this behavior is due to the shape of the blades.

KEYWORDS: opposed blade damper, numerical analysis, pressure loss.

ÍNDICE

	Pág.
1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	1
3. Revisão Bibliográfica.....	2
3.1 Perda de Carga em Dutos e Acessórios.....	2
3.2. Válvula Atmosférica	3
3.2.1. Considerações gerais.....	3
3.2.2. Comportamento Dinâmico da Válvula.....	4
3.2.3. Parâmetros e Faixas de Operação da Válvula Atmosférica.....	6
3.3. Características do Duto.....	6
3.4. Análise Numérica.....	7
4. Metodologia.....	7
4.1. Abordagem do Problema.....	7
4.2. Características Físicas do Modelo Numérico	7
4.3. Considerações e Simplificações	8
4.4. Geração da Malha.....	9
5. Análises dos Resultados.....	10
5.1 – Distribuição de Pressões.....	10
5.2 – Distribuição de Velocidades.....	11
5.3 – Perda de Pressão <i>versus</i> Variação Angular.....	12
5.4 – Vazão Mássica <i>versus</i> Variação Angular.....	13
5.5 – Coeficiente de Perda K.....	13
5.6 - Análises de Erros	15
7. Conclusão.....	16
8. Referências Bibliográficas.....	17
Anexo I.....	18
Anexo II.....	19
Apêndice I.....	20
Apêndice II.....	21

1. INTRODUÇÃO

O Aeromóvel consiste de um sistema de transporte que utiliza propulsão pneumática para se movimentar sobre uma via elevada, com trilhos. Esta via forma um duto por onde uma vazão de ar pressurizado passa e atua sobre o carro, através de uma aleta, conforme a figura 1. O sistema de propulsão do Aeromóvel é constituído de ventiladores industriais estacionários, que fornecem a devida vazão de ar. O sistema de atuação é composto, também, por um conjunto de válvulas de controle que regulam a pressão, a montante e a jusante, abrindo ou fechando de acordo com a situação. Estas válvulas reguladoras, fixadas junto à via, são denominadas válvulas atmosféricas e desempenham um importante papel no circuito pneumático e no controle dinâmico do veículo. Elas são constituídas por um conjunto de pás rotatórias, acionadas hidráulicamente, com curso suficiente para abrir ou fechar totalmente a passagem de ar entre o duto e o ambiente. As válvulas atmosféricas atuam de acordo com o movimento do veículo, com pressões positivas ou negativas e também como sistema de frenagem de emergência.

O sistema atual de controle do Aeromóvel posiciona a válvula atmosférica em poucas configurações possíveis: totalmente aberta, 2/3 aberta, 1/3 aberta ou totalmente fechada. A evolução para um sistema mais sofisticado, onde se poderia controlar a velocidade, posicionamento e frenagem do carro através da abertura proporcional ao longo do curso da válvula, implica na construção de um modelo de posicionamento contínuo das pás, regulando o fluxo de ar de acordo com a necessidade. Para isso, se faz necessária a caracterização das propriedades do escoamento através da válvula, nas diferentes posições angulares que esta pode assumir. Neste trabalho, utilizou-se uma abordagem numérica para realização de tal tarefa.

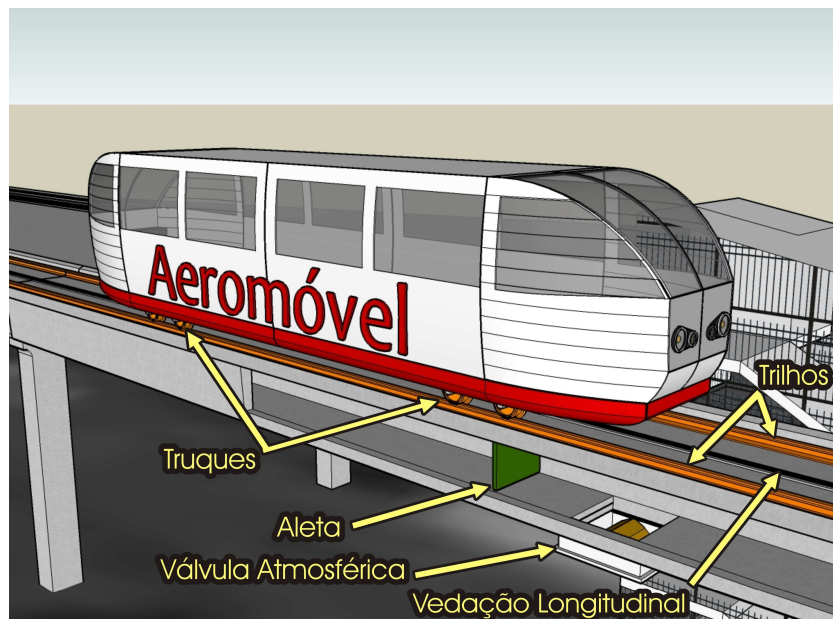


Figura 1 – Visão geral do Aeromóvel (Britto, 2008)

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização da válvula atmosférica utilizada no Aeromóvel. Através do monitoramento da variação angular das pás e das pressões utilizadas no duto, pretende-se analisar o comportamento da vazão de ar na válvula, bem como o coeficiente de perda de carga da mesma. Esta caracterização é importante para o desenvolvimento de um sistema de rotação contínua e controlada das pás em substituição ao modelo atual, que conta com apenas quatro posições. Além disso, serão

comparados os coeficientes de perda K da válvula borboleta com os disponíveis na literatura para a válvula de pás opostas e aqueles obtidos através da simulação numérica.

3. REVISÃO BILIOGRÁFICA

3.1. Perda de Carga em Dutos e Acessórios

O escoamento de um fluido no interior de dutos e acessórios, como válvulas e cotovelos, está sempre sujeito às perdas de energia relativas ao atrito com as paredes. Pode-se avaliar estas perdas através da equação 3.1 da conservação de energia (Fox e McDonald, 2001). O primeiro termo, à direita, na equação representa a conversão irreversível da energia mecânica por unidade de massa de fluido em energia térmica não desejada. O segundo termo, à direita, é a perda de energia por transferência de calor.

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{v}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{v}_2^2}{2} + gz_2 \right) = (u_2 - u_1) - \frac{\delta Q}{dm} \quad (3.1)$$

onde p_1 é a pressão a montante, p_2 é a pressão a jusante, ρ é a massa específica do fluido, v_1 e v_2 são as velocidades médias de escoamento, z_1 e z_2 são as alturas potenciais, u_1 e u_2 são os perfis de velocidade, α_1 e α_2 os coeficientes de energia cinética, Q é a transferência de calor e m a massa de fluido.

A perda de carga h_l é resultante e igual à energia térmica gerada, de maneira que se pode escrever:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{v}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{v}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_l \quad (3.2)$$

As perdas de cargas são avaliadas em termos da queda de pressão no duto ou no acessório. Em escoamentos turbulentos, não se pode avaliar a queda de pressão analiticamente, fazendo-se necessário recorrer a dados experimentais e análises dimensionais. De acordo com Fox e McDonald, 2001, para escoamentos turbulentos, tem-se:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2} = K \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (3.3)$$

Onde f é o fator de atrito, dependente da rugosidade e do número de Reynolds, L e D são medidas de comprimento e diâmetro e v é a velocidade média do escoamento. O termo K é chamado de coeficiente de perda e deve ser obtido experimentalmente.

Igualando as equações 3.2 e 3.3 e adotando as simplificações de tubo horizontal ($z_1=z_2$), escoamento plenamente desenvolvido ($\alpha_1=\alpha_2$) e diâmetro constante ($d_1=d_2$, logo $v_1=v_2$), pode-se escrever:

$$K = \frac{p_1 - p_2}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} \quad (3.4)$$

Dessa forma, o coeficiente de perda K estabelece uma relação entre as pressões estáticas, a montante e a jusante da válvula, e a pressão dinâmica devida à velocidade média do fluido. O efeito da turbulência sobre a perda de carga na válvula está implícito no coeficiente K , já que é medido experimentalmente e incorpora os efeitos turbulentos. Em Fox e McDonald, 2001, pode-se encontrar tabelas de K para diferentes geometrias e gráficos para o fator de atrito f .

3.2. Válvula Atmosférica

3.2.1. Considerações gerais

O termo *válvula atmosférica* foi adotado para designar as válvulas reguladoras sob a via elevada do Aeromóvel. Porém, não se trata de um termo usual na literatura e pode ser encontrado com outras denominações como, em inglês, “parallel blade damper” e “opposed blade damper”, que, em uma tradução livre, ficam “válvula de pás paralelas” e “válvula de pás opostas”. Estas podem apresentar duas ou mais pás, com orientações paralelas ou opostas entre si, conforme a fig. 2. As pás estão fixadas em uma estrutura metálica retangular, que forma o corpo principal da válvula. Estas válvulas são utilizadas, geralmente, em aplicações onde é necessário o controle de grandes vazões com baixas pressões estáticas, como, por exemplo, em sistemas de ventilação industrial.

No Aeromóvel, a válvula é do tipo pás opostas e possui um sistema motor, que consiste em um atuador pneumático, um sistema elétrico de baixa tensão, um sistema de redução de ruído e um sistema de sensores, usado para medir a posição da válvula, a pressão pneumática dos acumuladores e o nível dos lubrificantes líquidos. Além disso, a válvula possui um conjunto de borrachas de vedação entre as pás e as paredes e, ainda, na região de contato entre as próprias pás.

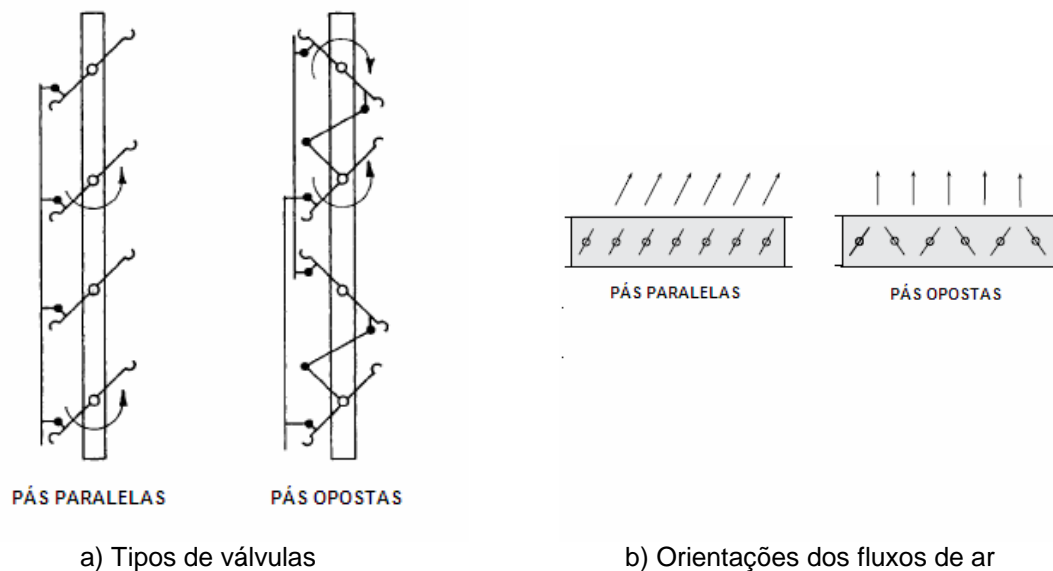


Figura 2 – Tipos de válvulas em função das orientações das pás(ASHRAE, 2001).

As válvulas de pás paralelas apresentam um comportamento similar à válvula borboleta, Brodgesell e Lipták, 1995 e Boulter 2007, como pode ser visto na figura 3a. Esse comportamento se torna muito sensível a partir de um determinado ângulo de rotação, sendo que o aumento da vazão através da válvula acontece rapidamente. De uma maneira geral, obtém-se um maior controle da vazão nos últimos trinta graus de rotação. Isso faz com que esse tipo de válvula seja ideal para situações que requeiram precisão nas situações de baixo escoamento.

Para as válvulas de pás opostas, o mesmo comportamento é verificado, à medida que a perda de pressão total do sistema, associada à válvula, diminui. A figura 3b mostra a variação percentual da vazão com a rotação das pás. Cada curva na figura está associada a um valor h , que representa a razão entre a queda de pressão do sistema e a queda de pressão da válvula (em posição completamente aberta). À medida que se reduzem as perdas associadas à válvula, a curva característica se desloca para a esquerda e um comportamento semelhante ao da válvula borboleta é verificado.

As válvulas de pás opostas são mais indicadas para o controle quando se possui valores elevados de h . Nesta situação, comparada à válvula borboleta, a de pás opostas proporciona maior controle da vazão durante toda a faixa disponível de escoamento.

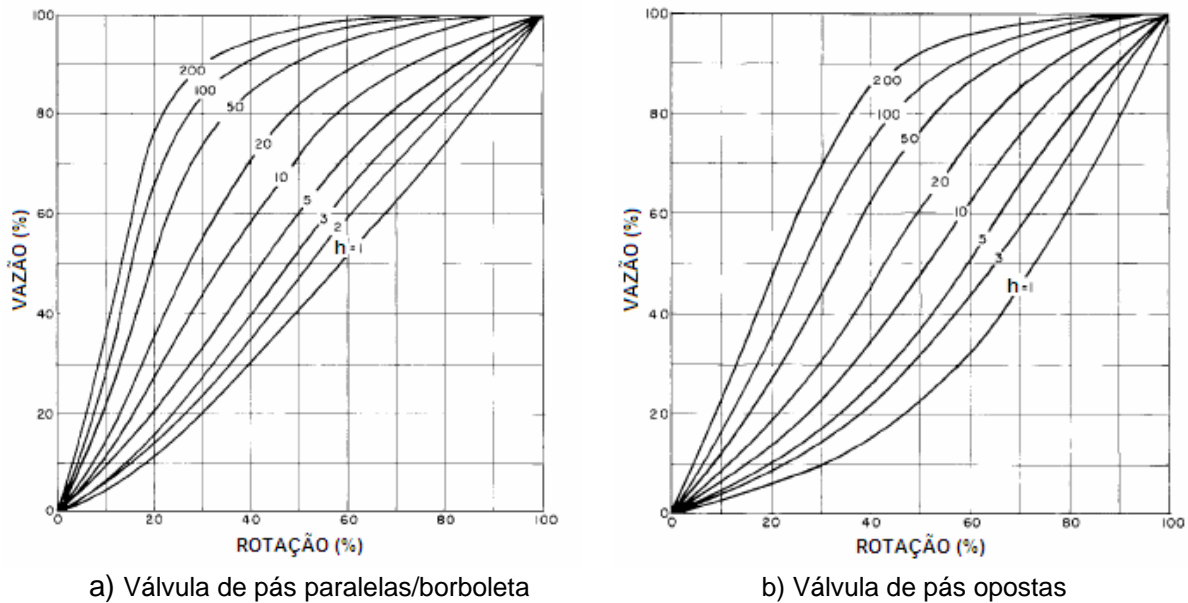


Figura 3 – Relações Vazão Mássica versus Rotação das Pás (ASHRAE, 2001).

3.2.2. Comportamento Dinâmico da Válvula

De acordo com Boulter, 2007, e Perry, 1984, o comportamento da válvula atmosférica pode ser descrito da seguinte maneira:

$$\Delta P = p_1 - p_2 = K_{valv} \frac{\rho v_{ar}^2}{2} \quad (3.3)$$

A vazão volumétrica na válvula é dada por:

$$q = A_{valv} v_{ar} \quad (3.4)$$

onde q é vazão volumétrica da válvula (m^3/s) e A_{valv} é a sua área efetiva (m^2). Substituindo a equação 3.3 na 3.4, obtem-se:

$$q = 1.29 A_{valv} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{K_{valv}}} \quad (3.5)$$

A vazão mássica na válvula é descrita por:

$$\dot{m}_{valv} = \rho v_{ar} A_{valv} \quad (3.6)$$

Substituindo a equação 3.3 na equação 3.6, tem-se:

$$\dot{m}_{valv} = 1.29 \rho A_{valv} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{K_{valv}}} \quad (3.7)$$

onde m_{valv} é a vazão mássica através da válvula (kg/s).

Nas equações 3.5 e 3.7, as vazões são proporcionais ao inverso da raiz quadrada de K_{valv} que, por sua vez, é obtido experimentalmente e depende do ângulo de abertura da válvula.

Como já mencionado, pode ser feita uma analogia entre a válvula borboleta e a válvula atmosférica, de forma a se obter a expressão que relaciona $1/K_{valv}^{1/2}$ com o ângulo de abertura (α) das pás. Utilizando os dados para a válvula borboleta (ver Anexo I), a seguinte expressão foi obtida por Britto, 2008:

$$\frac{1}{\sqrt{K_{valv}}} = 2,531e^{-5,011\alpha} \quad (3.8)$$

onde α é o ângulo de abertura normalizado, $\alpha=(0,1)$.

A equação 3.9 apresenta a relação entre a vazão mássica, a pressão e o ângulo de abertura α das pás.

$$\dot{m}_{valv} = 3,265e^{-5,011\alpha} \rho A_{valv} \sqrt{p_1 - p_2} \quad (3.9)$$

A superfície proveniente da equação 3.9, descrevendo o comportamento característico da válvula atmosférica (Britto, 2008), pode ser vista na fig. 4 abaixo.

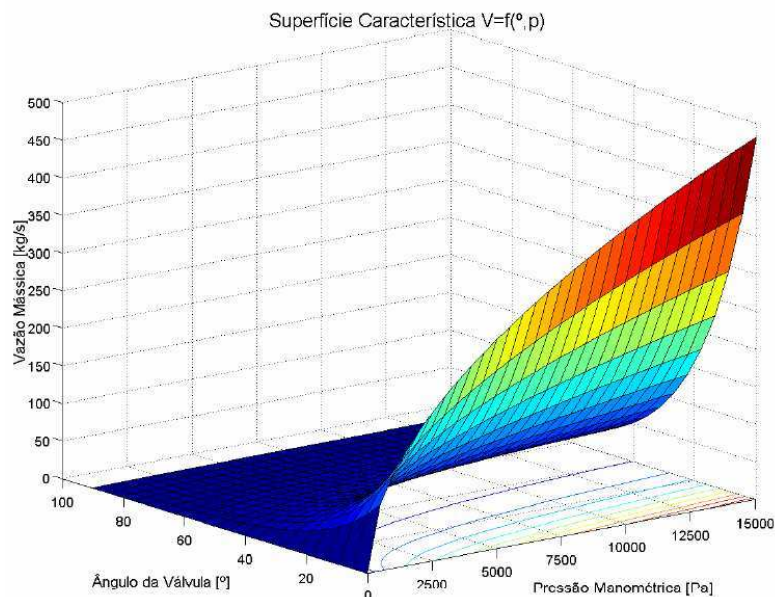


Figura 4 – Superfície característica da válvula atmosférica (Britto, 2008).

O comportamento da vazão descrito na figura 4 é proveniente de dados obtidos para a válvula borboleta, que possui comportamento semelhante à válvula de pás paralelas. No Aeromóvel, a válvula atmosférica é do tipo pás opostas, apresentando assim um comportamento próximo ao da válvula borboleta nas situações em que apresentar uma pequena perda de pressão quando em posição completamente aberta.

É importante avaliar que no duto do Aeromóvel as velocidades médias do ar são baixas e raramente chegam aos 100 m/s (Mach 0.3), o que ocorreria numa situação de frenagem crítica, como foi constatado por Britto, 2008. Nessa situação crítica, sem considerar as perdas, a vazão mássica máxima através da válvula ficaria em torno de 120 Kg/s, o que causaria grandes velocidades através da mesma e, possivelmente, um comportamento compressível do ar. De acordo com Aeromóvel, 1999, a vazão volumétrica máxima de projeto através da válvula atmosférica seria de 65.000 m³/s ou aproximadamente 22 Kg/s (sendo a

$A_{\text{valv}}=1\text{m}^2$ e $\rho_{\text{ar}}=1,2\text{ Kg/m}^3$). Assim, os valores do gráfico acima, obtido analiticamente, estão extrapolados para faixas não usuais de operação.

Pode-se encontrar valores experimentais na literatura para os coeficientes de perda K, específicos para a válvula de pás opostas, evitando-se assim uma analogia com a válvula borboleta. Segundo ASHRAE, 2001, os valores de K para pás opostas podem ser obtidos através de dados experimentais, contidos no Anexo I. Devem ser levados em conta o número de pás e suas dimensões, juntamente com as dimensões do duto. Neste trabalho, será apresentado um estudo comparativo entre os valores de K para a válvula borboleta, pás opostas e os obtidos na simulação numérica.

3.2.3. Parâmetros e Faixas de Operação da Válvula Atmosférica

Em Aeromóvel, 1999, encontram-se reunidas algumas especificações técnicas da válvula atmosférica, apresentados na tabela 3.1, a seguir:

Tabela 3.1 – Especificações técnicas da válvula atmosférica

Variável	Valor	Unidade	Descrição
L	2.500	mm	Comprimento
H	1.000	mm	Largura
A _{valv}	1	m ²	Área efetiva
LR	68	db	Limite de ruído max (a 4m)
t _a	1,5	seg.	Tempo de abertura
t _f	0,8	seg.	Tempo de fechamento
t _e	0,7	seg.	Tempo de fecham. de emergência
Volt.	24	V	Voltagem (dc)
N	375.000	ciclos/ano	Número ciclos ao ano
LV	3.500	m ³ /h	Limite de vazamento (a 15000 Pa)
V _{max}	65.000	m ³ /h	Vazão máxima
P _e	± 20.000	Pa	Pressão estática do ar no duto (manom.)
P _{max}	± 40.000	Pa	Pressão acidental máx. do ar no duto

3.3. Características do Duto

As informações básicas sobre o duto e o comportamento do ar em seu interior foram obtidas dos trabalhos de Boulter, 2007, Britto, 2008 e Aeromóvel, 1999, e resumidamente são aqui apresentadas.

A linha piloto do Aeromóvel em Porto Alegre é constituída de um duto principal de concreto, com comprimento total de 958m, com trajetos retilíneos e curvos. Possui uma seção transversal de área de 1 m² e uma temperatura interna próxima à temperatura ambiente. Durante o escoamento do ar no interior do duto, as faixas de pressões e velocidades desenvolvidas levam ao estabelecimento de um escoamento incompressível, que é caracterizado por um número de Mach < 0.3 e transferência de calor desprezível, Fox e McDonald, 2001. Além da incompressibilidade, são consideradas as hipóteses do ar apresentar um comportamento de gás perfeito e operar em regime turbulento, uma vez que o número de Reynolds > 2300.

À medida que o veículo se desloca, ocorrem variações nas pressões a montante e a jusante das aletas. A taxa de variação da pressão no duto é uma função da velocidade do veículo, da vazão mássica do ventilador e das válvulas. Outro fator que deve ser considerado são as dissipações de energia relativas à perda de carga, como consequência das longas distâncias percorridas.

3.4. Análise Numérica

Devido à evolução tecnológica e à crescente complexidade dos problemas de engenharia, a utilização de uma abordagem computacional é cada vez mais indispensável, para concepção, desenvolvimento e otimização de projetos. Um método muito utilizado na análise numérica é o dos volumes finitos, Maliska, 1995. Este método consiste basicamente na integração das equações diferenciais sobre certo número de volumes de controle originários da discretização do domínio de cálculo. Essa discretização resulta na criação de uma malha de elementos geométricos que pode ser utilizada para a solução problemas com geometrias complexas.

4. METODOLOGIA

4.1. Abordagem do Problema

O comportamento da válvula atmosférica foi estudado numericamente, impondo-se vazões de ar através de suas pás em diferentes ângulos de rotação. Para cada vazão prescrita a montante, obteve-se uma diferença de pressão entre a entrada e saída. O software ANSYS-CFX foi utilizado para modelar o escoamento na válvula através do método dos volumes finitos. Algumas simplificações e considerações gerais foram assumidas e podem ser vistas no item 4.3.

A caracterização da válvula atmosférica consiste na obtenção das relações entre os principais parâmetros envolvidos no escoamento. Estas relações deverão representar, de forma satisfatória, o comportamento da válvula. Os parâmetros de interesse na caracterização são: a variação angular das pás, as vazões de ar, as pressões e os coeficientes de perda K.

Para estimar as condições de contorno e condições iniciais do problema, foram utilizados os dados experimentais disponíveis na literatura, Aeromóvel, 1999 e Boulter, 2007. O estudo foi realizado dentro das faixas de operação e condições de trabalho conhecidas para o Aeromóvel, conforme dados da tabela 3.1 e do item 3.3, acima.

Na tabela 4.1, pode-se verificar a robustez do *solver* (parte do software responsável pela solução iterativa), para diferentes condições de contorno.

Tabela 4.1 – Robustez do software x condições de contorno do problema

Tipo de Solução	Condição na entrada	Condição na saída
Mais Robusta	Velocidade/Vazão Mássica	Pressão Estática
Robusta	Pressão Total	Velocidade/Vazão Mássica
Sensível às Cond. Iniciais	Pressão Total	Pressão Estática
Instável	Pressão Estática	Pressão Estática

4.2. Características Físicas do Modelo Numérico

A mecânica dos fluídos envolvida na análise do problema é avaliada através da integração das equações diferenciais, que regem o movimento do fluído, no domínio composto pela porção interna da válvula e suas pás. Estas equações representam leis físicas e matemáticas, e estão inseridas no software através de algoritmos programados. O conhecimento da física envolvida na análise numérica é importante para o entendimento mais amplo do problema.

A equação geral da conservação de uma variável escalar, eq. 4.1, Maliska, 1995, representa a preservação da integridade de uma dada grandeza, ao longo de um processo. O primeiro termo, à esquerda, constitui a parte temporal e representa a variação da propriedade ϕ dentro do volume de controle. O segundo termo, à esquerda, é a parcela advectiva e possui um comportamento não linear, podendo ser responsável por erros e dificuldades na solução. O terceiro e quarto termos são, respectivamente, a parcela difusiva e o termo fonte.

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho\mathbf{u}\varphi) = \bar{\nabla} \cdot (\Gamma\varphi\bar{\nabla}\varphi) + S^\varphi \quad (4.1)$$

Onde, \mathbf{u} é o vetor velocidade, ρ é a massa específica, Γ o coeficiente de difusão e S o termo fonte.

Se a eq. 4.1 for associada à variável massa, obtém-se a equação da continuidade, dada pela eq. 4.2. Essa equação mostra que a variação da massa contida em um certo volume é causada pela taxa líquida de massa que é transferida através de suas superfícies. A eq. 4.3 é relativa à conservação da quantidade de movimento, e é conhecida como equação de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (4.3)$$

Essas equações, juntamente com a equação da conservação da energia, descrevem o comportamento geral do escoamento de um fluido.

4.3. Considerações e Simplificações

Algumas simplificações na geometria da válvula foram adotadas de modo a reduzir a complexidade da malha e o tempo de cálculo computacional. A geometria utilizada reduziu-se à carcaça interna da válvula e o seu conjunto de pás, não sendo considerada a rugosidade superficial. A válvula é considerada totalmente aberta em 0° e completamente fechada em 60° , conforme a figura 5. O sistema de vedação e batentes, como pode ser visto no apêndice II, foi removido.

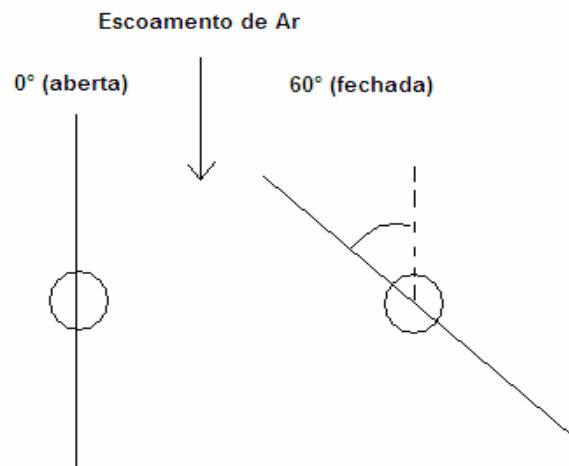


Figura 5 – Posições convencionadas para abertura e fechamento das pás.

As considerações gerais assumidas para o escoamento foram: incompressibilidade e comportamento ideal do ar, estado permanente, vazão mássica prescrita à montante, velocidade normal à superfície de entrada (*inlet*), pressão atmosférica à jusante (*outlet*), modelo de turbulência K- ϵ (gerado com controle automático do software).

4.4. Geração da Malha

Para cada configuração angular das pás, desde a posição fechada até a aberta com variação de dez graus, foi gerada uma malha correspondente. Dessa forma um conjunto de sete malhas foi obtido, representando as diferentes posições da válvula. Serviu-se do software ICEM-CFD para a geração da malha mostrada nas figuras 6 e 7, abaixo.

Na composição dos elementos da malha foram utilizados elementos mistos, predominantemente tetraedros e prismas, em diferentes níveis de refinamento. Os tetraedros foram utilizados na entrada (*inlet*), saída (*outlet*), paredes (*wall*) e no volume interno da válvula, sendo que o refinamento perto das paredes foi maior. Nas superfícies das pás (*wall*), devido à geometria e ao escoamento mais complexo, foram utilizadas camadas de elementos prismáticos, otimizando-se o resultado.

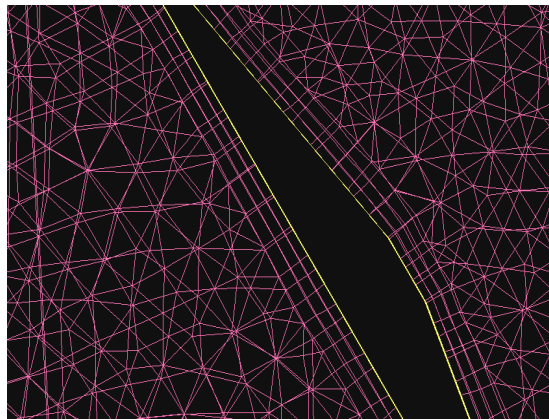


Figura 6 – Camadas de prismas sobre a pá.

Na figura 6, é apresentada uma visão detalhada da malha envolvendo uma das pás com camadas de prismas. O número de tetraedros ficou em torno de 2.000.000 elementos e o número de prismas em torno de 70.000 elementos.

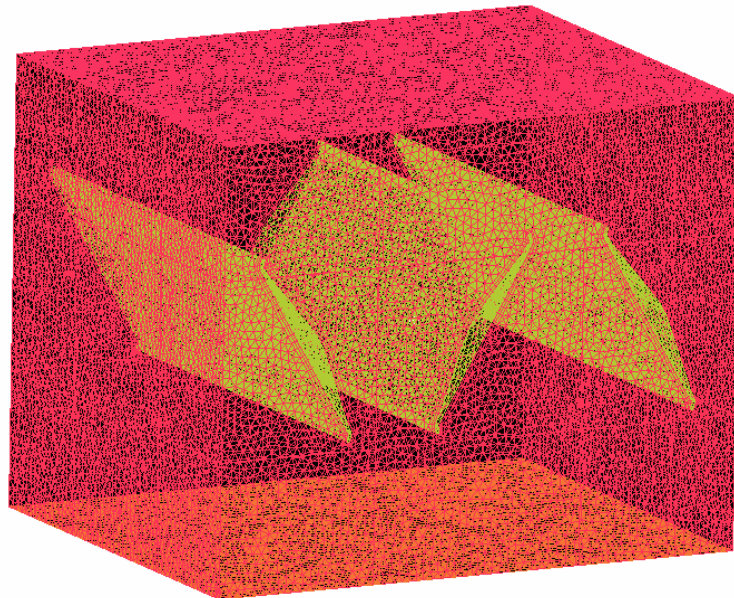


Figura 7 – Malha gerada no ICEM-CFD.

Diferentes etapas de melhoramento da malha foram realizadas, buscando-se estabelecer uma relação de independência entre o refinamento da malha, e os resultados obtidos. Isso pôde ser alcançado, fazendo-se testes preliminares e comparando-os com dados

existentes na literatura. Para tanto, neste trabalho, utilizou-se como referência os dados do anexo I, para a válvula borboleta e válvula de pás opostas.

5 – ANÁLISES DOS RESULTADOS

Cada simulação gerou dados sobre os campos de pressão e velocidade na válvula, conforme as tabelas de dados contidas no apêndice I. Foram impostas vazões mássicas, partindo-se de 2 Kg/s até 30 Kg/s, em intervalos de 10° graus, sendo que o curso das pás é de 0° grau (aberta) até 60° graus (fechada). No total, foram realizadas 42 simulações.

5.1 – Distribuição de Pressões

Nas figuras 8 e 9 podem-se ver as variações de pressão obtidas na simulação numérica. O campo de pressão em torno das pás apresenta valores bastante variáveis, principalmente nas regiões próximas às extremidades, e se caracteriza como um campo não uniforme. O choque do ar com as pás gera forças de interação corpo-fluído, que podem ser descritas em função da tensão normal, devido à pressão, e as tensões de cisalhamento nas paredes, provocadas pelos efeitos viscosos. De uma maneira global, estas tensões são responsáveis pelas forças de arrasto e sustentação.

A distribuição de pressão pode ser avaliada juntamente com a velocidade do escoamento através da equação de Bernoulli. Esta equação estabelece uma relação entre as velocidades e as pressões envolvidas no escoamento, tornando claro que regiões de altas velocidades produzirão baixas pressões, e regiões de baixas velocidades produzirão altas pressões. Dessa forma, nas figuras abaixo, nota-se que a pressão é menor (cores frias) nas regiões onde o escoamento é forçado por menores áreas, adquirindo maiores velocidades.

A geometria e a dinâmica da válvula fazem com que apareçam áreas de baixa pressão na parte inferior das pás, e áreas de altas pressões, na parte superior das pás. A partir das bordas de ataque, na região superior, alcançam-se maiores pressões devido à estagnação do fluído. Nessas regiões, as linhas de corrente se separam do escoamento e as velocidades se reduzem criticamente. O contrário acontece na região de curvatura externa da borda, onde o fluído escoava com máxima velocidade e as linhas de corrente se aproximam, causando a mais baixa pressão.

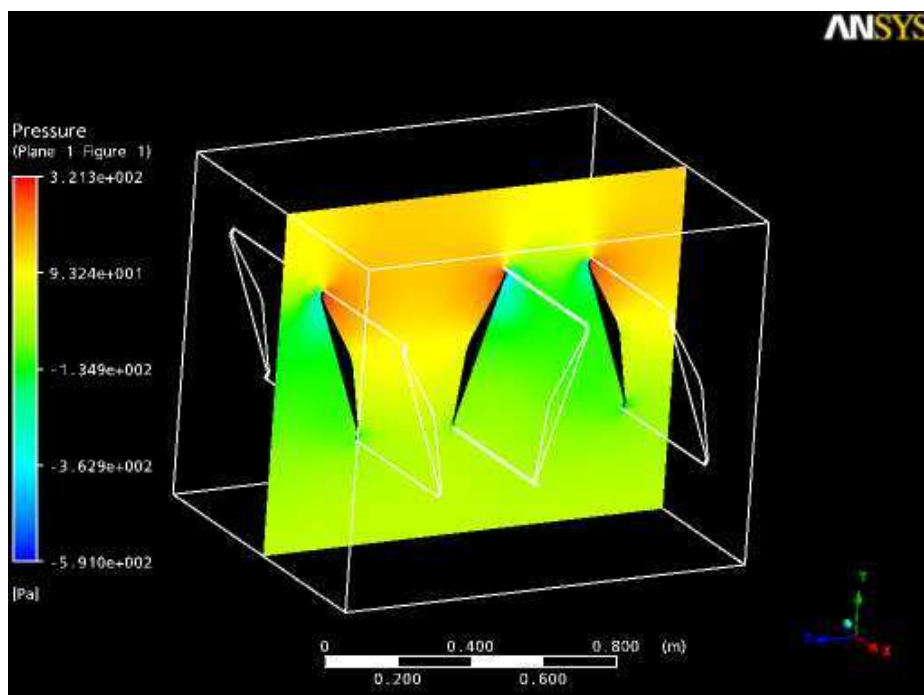


Figura 8 – Variação da pressão [Pa] (vazão de 22 Kg/s e pás à 20°).

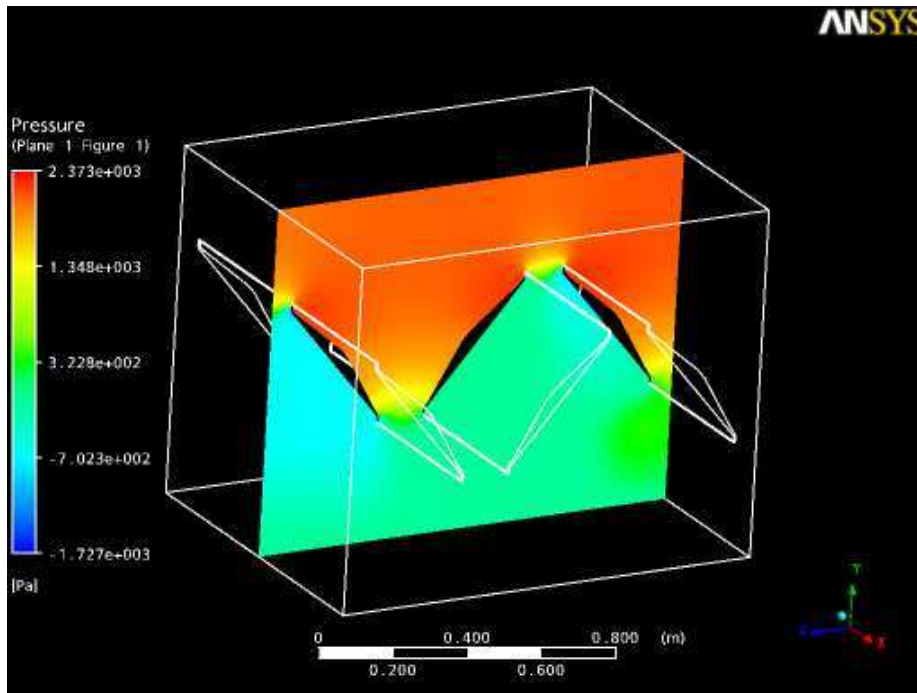


Figura 9 – Variação da pressão [Pa] (vazão de 22 Kg/s e pás à 40°).

5.2 – Distribuição de Velocidades

A distribuição de velocidades, mostrada na figura 10, apresenta quatro pontos de aceleração, todos em regiões de contração entre as próprias pás e com as paredes. Uma dessas regiões pode ser vista na figura 11, com os vetores velocidade aumentando de magnitude à medida que ocorre o afunilamento entre as pás. Como já mencionado, na parte superior das pás, a velocidade é praticamente nula como visto na figura 11.

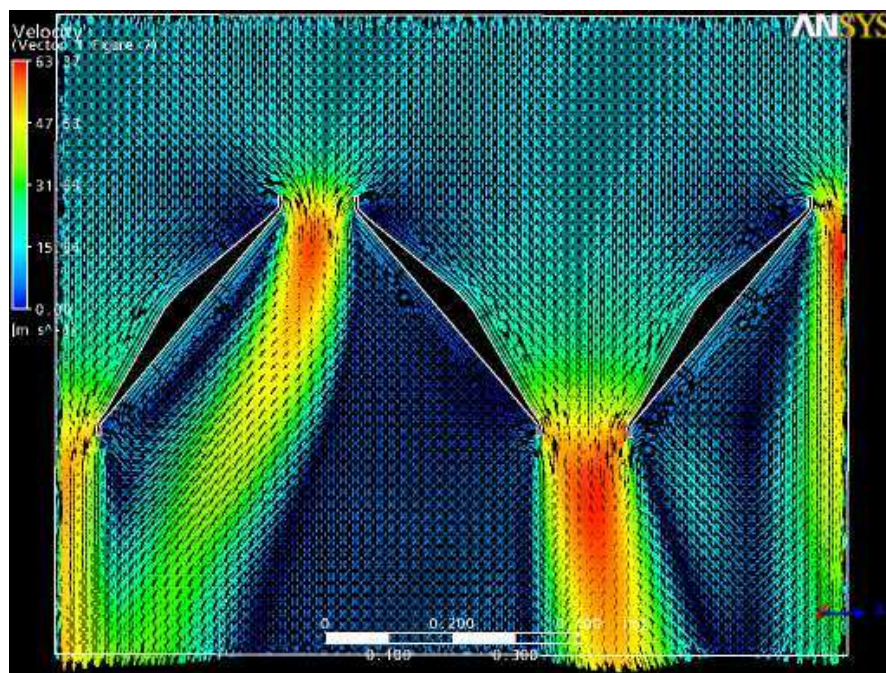


Figura 10 - Visão geral da distribuição de velocidades (vazão de 22 Kg/s e pás à 40°).

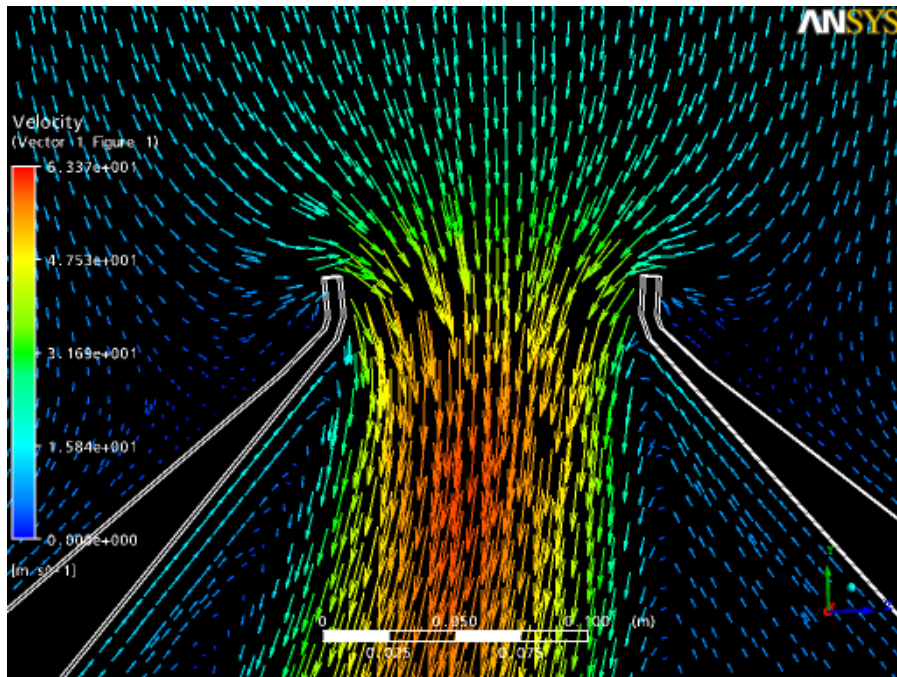


Figura 11 - Vetores velocidade entre as pás (vazão de 22 Kg/s e pás à 40°).

5.3 – Perda de Pressão versus Variação Angular

A válvula atmosférica, como qualquer outro acessório conectado ao circuito pneumático do aeromóvel, apresenta uma perda de pressão associada ao seu funcionamento. Essa perda vai depender, basicamente, da velocidade do fluido e do ângulo de abertura das pás. O comportamento da queda de pressão frente à variação angular da válvula foi obtido através de uma série de simulações numéricas, e pode ser visto através dos dados apresentados no apêndice I.

A figura 12 apresenta as quedas de pressão para valores mais altos e mais baixos de vazão. A válvula se encontra totalmente aberta em 0° e fechada aos 60°.

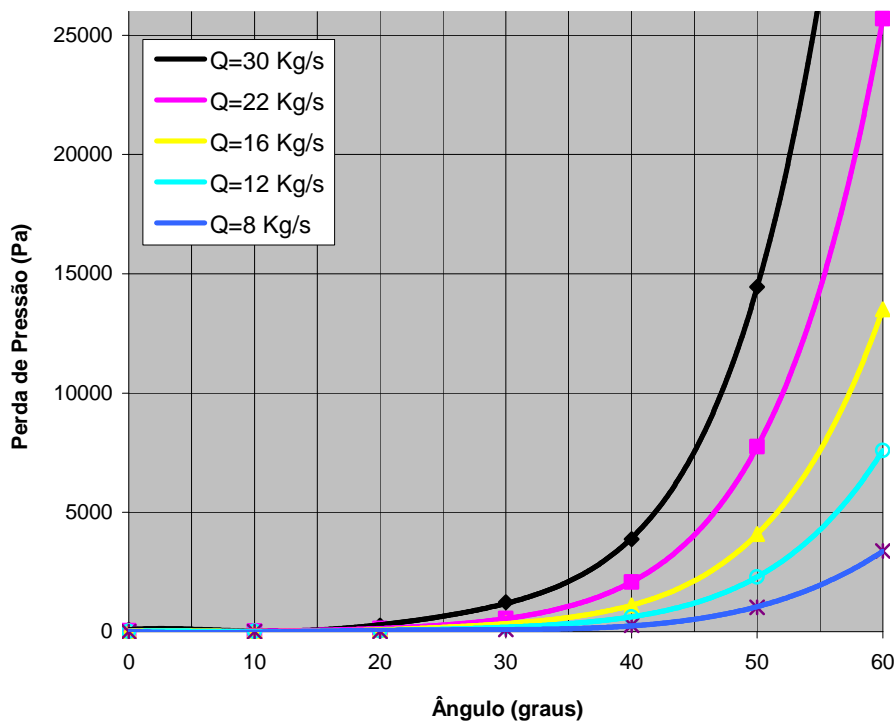


Figura 12 - Perda de pressão para valores altos de vazão.

Pode-se notar que a perda de pressão só é significativa a partir dos 30° de rotação, e, à medida que a válvula vai sendo fechada, obtém-se um crescimento quase exponencial da pressão. Para valores menores que 30°, as variações na pressão são pequenas e podem ser desconsideradas. Assim, a válvula exibe um comportamento praticamente ineficaz nas posições próximas à total abertura. Para valores altos de vazão, como 22 Kg/s e 30 Kg/s, a perda de pressão no fechamento ultrapassa os 25000 Pa (0.25 bar).

Para se controlar a pressão no duto do Aeromóvel através da válvula, deve-se operar nos intervalos de rotação em que ela é mais efetiva. O sistema convencional de frenagem do Aeromóvel, com freio mecânico, pode ser auxiliado pelo aumento da pressão à jusante do carro. Isso implica em aumentar a pressão à montante da válvula, aplicando uma maior perda de carga à mesma.

Como exemplo, se fosse necessário elevar a pressão à frente do carro em 10000 Pa (0.1 bar), considerando-se que a vazão se mantenha constantemente próxima a 16 Kg/s, deveríamos fechar a válvula até um ângulo de aproximadamente de 57°. Numa situação real, dificilmente a vazão se manteria constante, e seria necessário o sensoriamento da vazão instantânea na válvula com a respectiva correção angular das pás.

5.4 – Vazão Mássica versus Variação Angular

Fixando-se valores de pressão, é possível obter gráficos da vazão mássica pela orientação das pás. A figura 13 apresenta quatro valores constantes de pressão, que indicam, para uma dada vazão, qual a posição angular correspondente. Como era de se esperar, a válvula apresenta grandes perdas de pressão para valores altos de vazão.

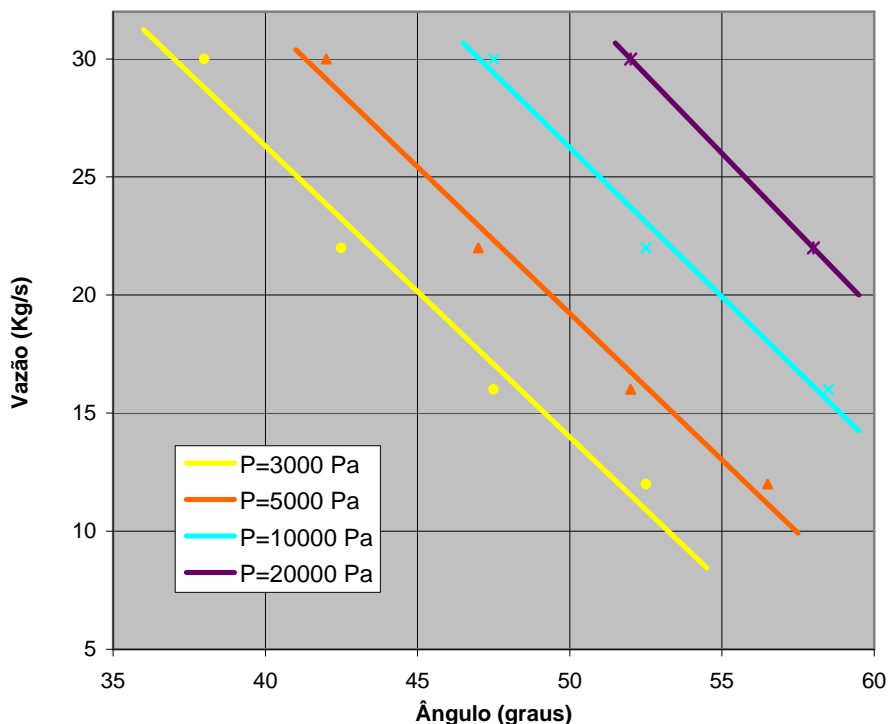


Figura 13 – Comportamento da vazão versus ângulo.

5.5 – Coeficiente de Perda K

Os coeficientes de perda K, obtidos na simulação numérica, foram comparados com os dados encontrados na literatura para a válvula borboleta (Boulter, 2007) e para a válvula de pás opostas (ASHRAE, 2001). Utilizou-se para o cálculo de K, a eq. 3.4, com os valores das tabelas A1 e A2, do apêndice I.

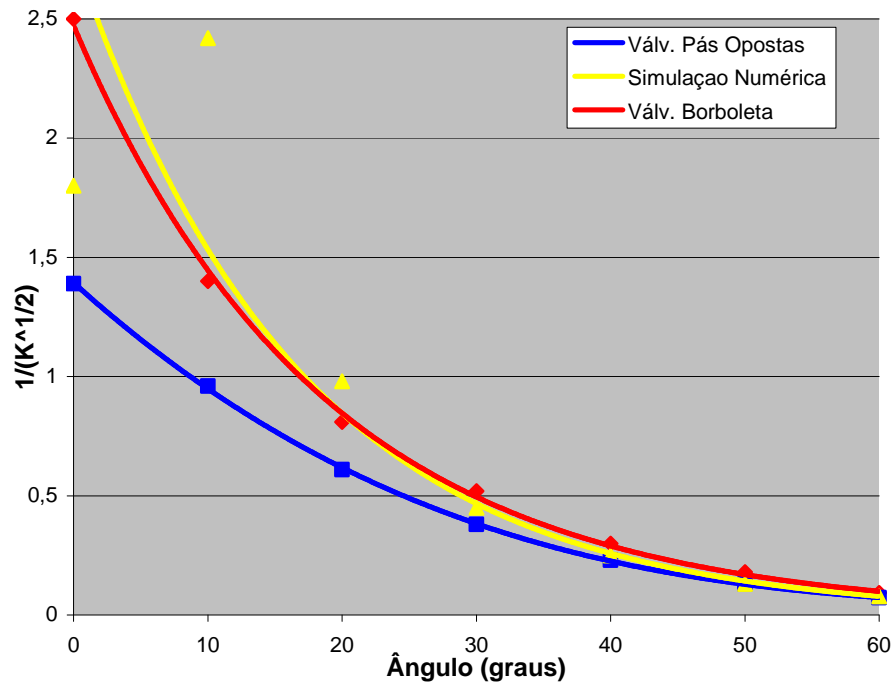


Figura 14 – Gráfico comparativo entre coeficientes K

Os resultados apresentados na figura 14, estão apresentados em função de $1/K^{1/2}$, que é uma forma conveniente de apresentar os dados relativos à K. Nota-se que, quando a válvula está fechada (60°), os valores de K ficam muito grandes e o inverso da raiz quadrada deste é próximo à zero. Isso indica, obviamente, que a vazão mássica, eq. 3.7, também decai a zero.

A simulação numérica forneceu dados bastante próximos às válvulas borboleta e de pás opostas para os ângulos maiores que 30 graus. Para ângulos menores, a válvula atmosférica apresentou um comportamento mais próximo à válvula borboleta. É interessante notar que o valor de $1/K^{1/2}$, a 10° obtido na simulação numérica, apresenta um resultado singular se comparado com as outras curvas. Esse fato estimulou uma nova etapa de simulações com o intuito de eliminar a possibilidade de erro na solução. A malha foi refinada, de diferentes maneiras, e as condições iniciais foram alteradas, mas não se constatou mudança nos resultados. Como se pode ver na tabela A1, do apêndice I, para valores referentes a 10° em qualquer vazão mássica, a queda de pressão é menor do que na posição aberta, em 0° , o que não acontece para as outras curvas da figura acima.

De maneira menos acentuada, percebe-se uma alteração em $1/K^{1/2}$ nas posições de maior abertura da válvula. Esse fato indica um comportamento instável nas distribuições de pressão e velocidade, que pode ser atribuído, em parte, à angulação na borda de ataque das pás. Essa característica geométrica influi consideravelmente na queda de pressão para pequenos ângulos, pois aumenta a velocidade do escoamento sobre as pás. Esse efeito é amplificado próximo aos 10° , mas passa a ser sentido na posição completamente aberta da válvula, deixando de ter efeito após os 30° .

Com o intuito de comprovar o efeito da geometria sobre o escoamento, fez-se uma nova simulação suavizando o ângulo de ataque. Os resultados podem ser vistos na figura 15. Na figura 15b, sem a dobra na borda de ataque, para uma vazão de 22 Kg/s, obteve-se, aproximadamente, o dobro da queda de pressão comparando-se à primeira situação. Para a nova borda de ataque, percebe-se um aumento da velocidade entre as pás, causando uma diminuição da pressão local. Todavia, a diminuição da velocidade nas partes superiores das pás, aumenta a pressão globalmente. A nova geometria, se comparada a um perfil aerodinâmico, possui uma maior força de sustentação que a geometria real.

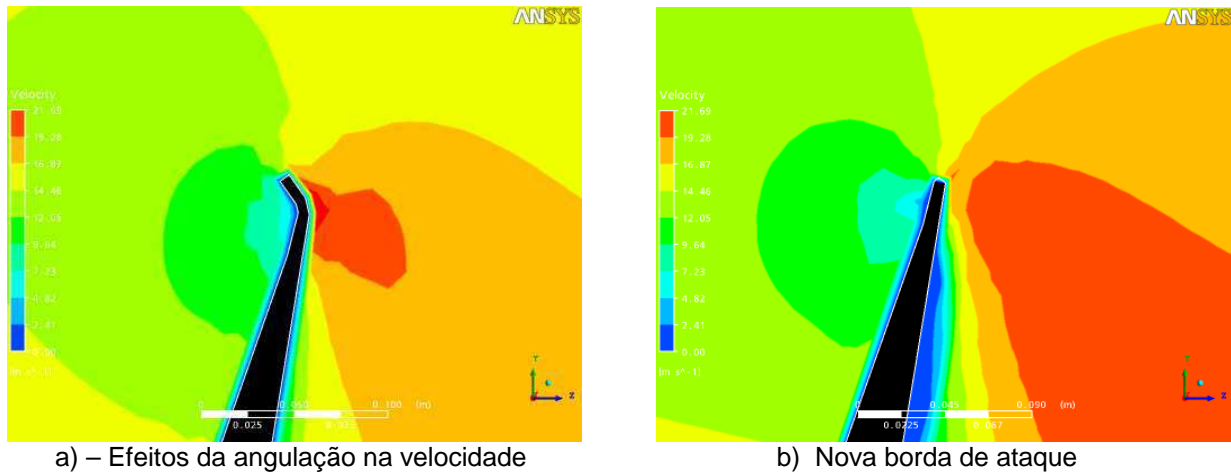


Figura 15 – Efeitos da geometria da borda na velocidade

Como foi mostrado anteriormente, na fig. 12, a perda de pressão, para ângulos pequenos, é ineficaz para o controle do aeromóvel e pode ser desconsiderada. Assim, da mesma maneira, os valores anômalos de K para pequenos ângulos podem ser desconsiderados na questão do controle.

5.6 - Análises de Erros

De acordo com Maliska, 2004, existem dois tipos de erros que podem aparecer em uma simulação numérica: os erros numéricos propriamente ditos, e o uso de equações diferenciais que não representem adequadamente o fenômeno físico. A ferramenta numérica é confiável, portanto, quando se dispõe de um método numérico robusto, que resolva as equações envolvidas, e um modelamento físico que seja fiel ao problema observado.

Uma forma de se verificarem os erros numéricos é comparar os resultados obtidos com aqueles disponíveis na literatura. Para isso, nesse trabalho, utilizaram-se apenas os dados para o coeficiente de perda K , já que os demais resultados de pressão e vazão não foram encontrados durante a revisão bibliográfica.

Utilizando-se como referência os dados de K , disponíveis no anexo I, para válvula de pás opostas, e a eq. 5.1, estimaram-se os erros relativos dos resultados numéricos, para diferentes ângulos de rotação.

$$E_s = \frac{\|f_{exata} - f_{numérica}\|}{\|f_{exata}\|} \quad (5.1)$$

Os resultados estão contidos no apêndice I e, através destes nota-se que na simulação numérica, para ângulos maiores que 30° o erro relativo cai consideravelmente. Para ângulos menores, onde a válvula se encontra mais aberta, os erros estão ligados principalmente a diferenças geométricas, como foi discutido no item 5.5.

Para reduzir os erros envolvidos com a criação da malha, refinaram-se gradativamente os atributos desta até se aproximarem do ponto de independência entre os resultados obtidos na simulação e o grau de refinamento utilizado.

7 - CONCLUSÃO

No presente trabalho, procurou-se demonstrar as propriedades da válvula atmosférica frente ao escoamento de ar, trazendo ao conhecimento os campos de pressão e velocidade para diferentes orientações angulares.

Foi demonstrado que a válvula atmosférica possui uma faixa de operação eficaz para o controle de pressão no duto, a partir de, aproximadamente, um ângulo de 30° de abertura de suas pás. A queda de pressão aumenta rapidamente até atingir um máximo, no total fechamento da válvula, chegando a valores superiores a 0.25 bar.

A analogia entre os comportamentos da válvula atmosférica e da válvula borboleta se mostrou válida na modelagem do desempenho da válvula. Da mesma forma, para valores angulares maiores que 30°, pode-se validar outra analogia, utilizando-se os dados encontrados na literatura para a válvula de pás opostas.

Verificou-se durante a pesquisa, que a geometria das bordas de ataque das pás pode influenciar na queda de pressão em posições próximas à abertura total da válvula. Esse fenômeno é atribuído ao aumento das velocidades nas partes superiores das pás. Com uma nova borda suavizada, obteve-se uma diminuição das velocidades e um correspondente aumento da queda de pressão do sistema.

Portanto, este trabalho soma um maior conhecimento a respeito do funcionamento da válvula atmosférica, com a expectativa de contribuir com a implementação do controle contínuo da válvula e otimização do projeto Aeromóvel.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aeromovel, 1999. “**Aeromovel System Technical Specification**”, Relatório Interno. Porto Alegre

ASHRAE, 2001. “Fundamentals”

Boulter, B.T., 2007. “**Aeromovel Vehicle Speed Control System Analysis**”, Rockwell Automation - Reliance Eletric, Greenville.

Brodgesell. A, Lipták.B.G, 1997. “**ASHRAE Handbook**”

Britto, J. F. F. H., 2005. “**Modelo Computacional do Sistema Aeromóvel de Transporte**”, UFRGS.

Clezar & Nogueira, 1999. “**Ventilação Industrial**”, UFSC.

Fox, R. W., McDonald, A. T., 2001. “**Introdução à Mecânica dos Fluídos**”, LTC, Rio de Janeiro.

FUNDATEC, 1984. “**Análise do Sistema de Propulsão**”, Relatório Parcial, Projeto Aeromóvel, Porto Alegre.

Maliska, C. R., 2004. “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluídos Computacional**”, LTC, Rio de Janeiro.

Perry, R. H., 1984. “**Perry’s Chemical Engineers’ Handbook**”, McGraw-Hill, New York.

ANEXO I

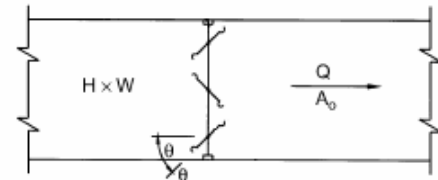
A - Dados para válvula borboleta (Boulter, 2007).

Degrees	0	5	10	20	40	60	90
1/sqrt(K)	2.5 (est)	2.0	1.4	0.81	0.30	.092	0

B - Dados para válvula de pás opostas (ASHRAE, 2001).

Válvula de Pás Opostas

L/R	K Values								
	θ								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0.3	0.52	0.79	1.91	3.77	8.55	19.46	70.12	295.21	807.23
0.4	0.52	0.85	2.07	4.61	10.42	26.73	92.90	346.25	926.34
0.5	0.52	0.93	2.25	5.44	12.29	33.99	118.91	393.36	1045.44
0.6	0.52	1.00	2.46	5.99	14.15	41.26	143.69	440.25	1163.09
0.8	0.52	1.08	2.66	6.96	18.18	56.47	193.92	520.27	1324.85
1.0	0.52	1.17	2.91	7.31	20.25	71.68	245.45	576.00	1521.00
1.5	0.52	1.38	3.16	9.51	27.56	107.41	361.00	717.05	1804.40



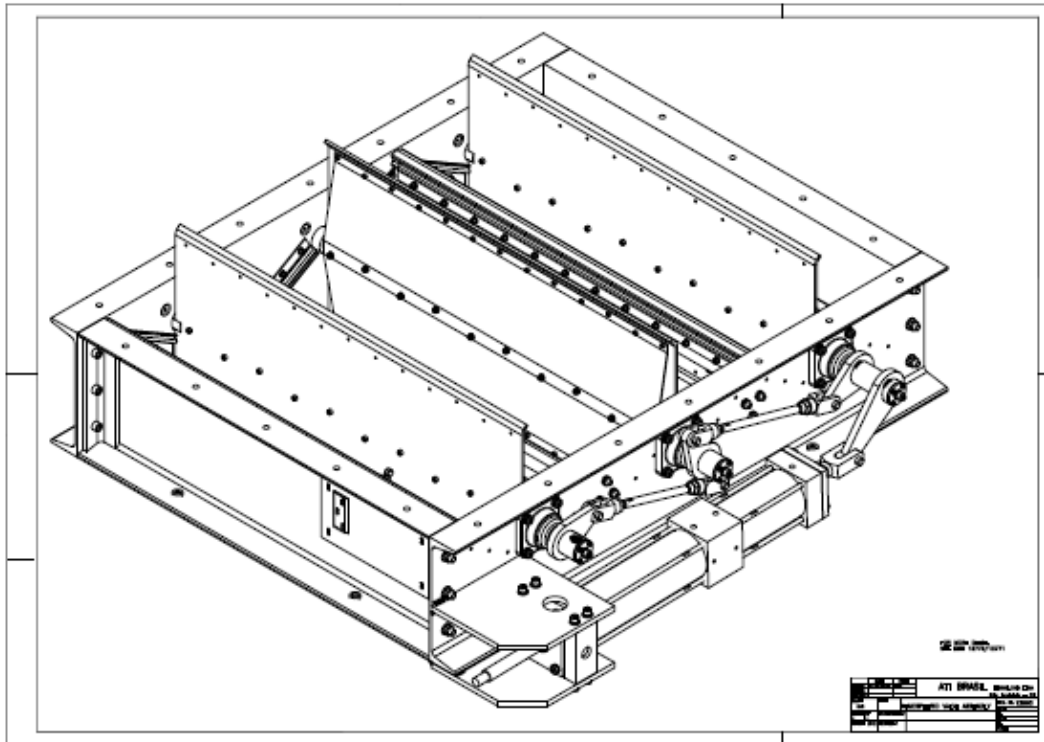
$$L/R = \frac{NW}{2(H+W)}$$

where

- N = number of damper blades
- W = duct dimension parallel to blade axis, mm
- H = duct height, mm
- L = sum of damper blade lengths, mm
- R = perimeter of duct, mm

ANEXO II

A - Desenho técnico da válvula atmosférica, fornecido por ATI Brasil Tec. LMTD.



B – Foto da válvula atmosférica em posição totalmente aberta.



APENDICE I – Dados da Simulação Numérica

Tabela A1 – Valores de Perda de Pressão (Pa).

Vazão Mássica	Q=2Kg/s	Q=4Kg/s	Q=8Kg/s	Q=12Kg/s	Q=16Kg/s	Q=22Kg/s	Q=30Kg/s
Ângulo (graus)							
0 (aberta)	0,37	1,44	5,59	12,4	21,86	41,27	75,8
10	0,21	0,84	3,2	7,5	12,16	22,6	41,3
20	1,13	4,53	18	40,2	71,2	134,4	249,9
30	5,5	21,9	87,5	196,7	349,7	545,3	1234
40	17,2	68,6	274,2	617	1098	2080,4	3879,3
50	64,2	256	1023	2299,2	4093,1	7750,5	14450
60 (fechada)	211	844,2	3376,7	7597,6	13507	25694	47251

Tabela A2 – Velocidade para Diferentes Vazões.

Vazão Mássica	Q=2Kg/s	Q=4Kg/s	Q=8Kg/s	Q=12Kg/s	Q=16Kg/s	Q=22Kg/s	Q=30Kg/s
Velocidade(m/s)	1,35	2,7	5,4	8,1	10,8	14,9	20,2

Tabela A3 – Variação da Vazão com a Orientação (pressão cte).

1000 Pa		3000 Pa		5000 Pa		10000 Pa		20000 Pa	
Ang.(°)	Q(Kg/s)	Ang.(°)	Q(Kg/s)	Ang.(°)	Q(Kg/s)	Ang.(°)	Q(Kg/s)	Ang.(°)	Q(Kg/s)
27,5	30	38	30	42	30	47,5	30	52	30
34	22	42,5	22	46,5	22	52,5	22	58	22
38	16	47,5	16	52	16	58,5	16		
43	12	52,5	12	57,5	12				

Tabela A4 – Coeficientes de perda K.

Ang.(°)	K	1/sqrt(K)
0	0,31	1,8
10	0,17	2,42
20	1,04	0,98
30	5,01	0,45
40	15,6	0,25
50	58,2	0,13
60	165	0,078

Tabela A5 – Erros de K relativos à válvula de pás opostas.

Ang.(°)	K - Pás Opostas	K - Simulação	Erro %
0	0,52	0,31	40
10	1,08	0,17	84
20	2,66	1,04	61
30	6,96	5,01	28
40	18,18	15,6	14
50	56,47	58,2	3,7
60	193,92	165	14,9

APENDICE II – Modelagem da Válvula Atmosférica

A – Desenho realizado com o software SolidWorks.

