

ANÁLISE NUMÉRICA COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE AR NO COLETOR DE ADMISSÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FLOW FIELD THRU AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE'S INTAKE MANIFOLD

Cristiano Beck¹
Josimar Souza Rosa²

Resumo: Para que seja obtido o melhor desempenho de um motor de combustão interna, a indústria automotiva aplicada diversas ferramentas no desenvolvimento dos diversos componentes de um motor. Um significativo esforço de engenharia é empregado no menor dos detalhes, a fim de que o produto final atenda à necessidade da proposta inicial. Aliado a este fato, uma demanda cada vez maior por motores de combustão interna mais eficientes, com menor tamanho, porém mais potentes, são os motivos principais de se estudar os componentes que fazem admissão de ar ou mistura para o motor, dessa maneira otimizando a combustão e produzindo maior potência com menores índices de emissões. No presente trabalho foi analisado o escoamento a frio em um coletor de admissão de um motor de combustão interna de alto desempenho, por meio de análise numérica, sendo realizada posteriormente a validação dos resultados obtidos na simulação através de um ensaio experimental utilizando uma bancada de fluxo. Os resultados obtidos ao final dos estudos demonstram que a execução do projeto por simulação é satisfatória, apresentando diferenças pequenas em relação aos resultados reais obtidos nos experimentos. As vazões mássicas obtidas nas simulações e nos experimentos apresentaram diferença máxima de 3,1%. Verificou-se também que há diferenças entre as vazões mássicas de ar disponíveis para cada cilindro do motor, o que pode impactar na operação do equipamento.

Palavras-chave: Coletor de admissão. Motor de combustão interna. Simulação Numérica. Validação experimental.

Abstract: The automotive industry applies many design tools so the optimal performance is obtained for an internal combustion engine. A great effort is employed on every little detail for the final product to be within specification. Along this fact, the greater demand for more efficient, smaller displacement and more powerful engines are the main reason as to why study the parts which are responsible for the air or mist intake to the engine, in this way optimizing the combustion and increasing the power output with lower emissions. For this paper the cold flow inside an intake manifold for a high-performance internal combustion engine was studied using numerical analysis with the results later validated with an experiment on a flow bench. The obtained results at the end of the study show that using the simulation as a design tool is excellent, plotting small differences when compared to the real-life experiment. The mass flows obtained in simulation and experiments shown a maximum divergence of 3,1%. There could be noted that there are differences between the mass flows on different cylinders, which could result in an unexpected behavior of the engine.

Keywords: Intake manifold. Internal combustion engine. Numerical Simulation. Real-life experiment.

¹Bacharel em Engenharia Mecânica, Universidade Feevale, cristiano.beck@gmail.com.

²Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Feevale, josimarrosa@feevale.br

1 INTRODUÇÃO

Os motores à combustão interna são a principal forma de obtenção de trabalho mecânico utilizada atualmente, e vêm sendo aprimorados há mais de cem anos. A melhoria de eficiência energética, o melhor controle da combustão, e conseqüente redução das emissões de gases nocivos e de efeito estufa, representam os esforços dos principais fabricantes de motores e automóveis do planeta em desenvolver cada componente para extrair o melhor do equipamento (Martins, 2011). A melhoria de cada componente e sistema são alcançados através de um trabalho de engenharia e posterior validação de cada resultado para o melhor desempenho possível. Cada vez mais o tempo e o custo de desenvolvimento impactam nas receitas das empresas, que precisam obter uma rápida solução aliada ao menor custo possível e que, por conta disso, vem fazendo o uso de softwares de simulação como ferramenta de engenharia a fim de estudar os fenômenos envolvidos no funcionamento dos componentes destes motores.

Segundo Brunetti (2012), o coletor de admissão é responsável por conduzir o ar para a câmara de combustão do motor e seu projeto é importante para o seu melhor funcionamento, uma vez que provê o oxigênio necessário para que ocorra a combustão. Existem atualmente diversas tecnologias empregadas nos coletores modernos, como processos de fabricação através de injeção de plástico e geometria interna variável por meio de controle eletrônico para alteração do comprimento dos dutos, o que possibilita que o motor tenha um comportamento adaptado para a faixa de funcionamento, obtendo desta maneira melhores resultados de potência e de emissões.

É necessário um estudo extenso para o melhor entendimento dos fenômenos envolvidos no escoamento de gases no interior de um coletor de admissão e por meio deste trabalho foi possível compreender as etapas que envolvem o desenvolvimento deste componente (Heywood, 1987). Para que seja obtido o melhor desempenho do motor, é necessário que o coletor de admissão tenha vazão suficiente para os regimes de operação aos quais será submetido, sendo importante que todas as saídas do coletor de admissão para o motor

estejam equalizadas, uma vez que os componentes internos são iguais para todos os cilindros. Logo, a condição para cada um deles deve ser semelhante e, caso não haja uma distribuição equivalente de ar para todos os cilindros, cada um funcionará de forma diferente, o que afeta sensivelmente as saídas que são esperadas pelo motor. A simulação do escoamento é particularmente importante para o processo de desenvolvimento por uma questão de custos e por diminuir de forma expressiva o tempo de projeto, uma vez que não são necessários protótipos físicos das peças para serem testadas antes de serem aprovadas.

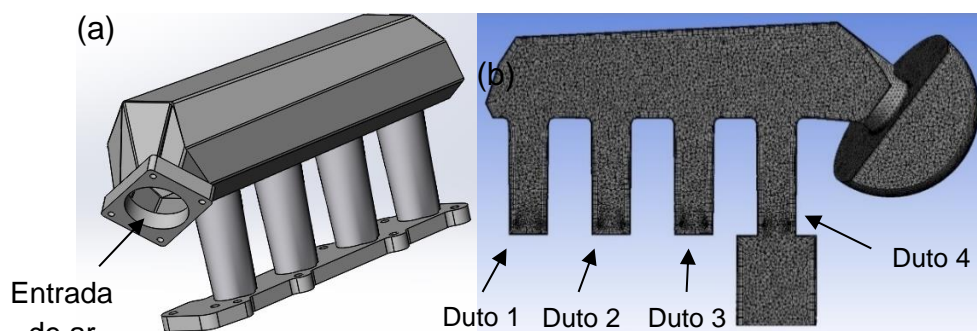
Conforme Fox et al. (2014) a *Dinâmica dos Fluidos Computacional*, o CFD, é aplicada quando o método apresenta um custo efetivo melhor do que os testes experimentais e é aplicada para determinar a melhor geometria para determinada aplicação.

Além disso, para Cengel e Cimbala (2007), os dados experimentais também servem para validar a simulação e dessa maneira promovem uma redução no ciclo de projeto, pois reduz a quantidade necessária de experimentos práticos para validação das geometrias.

2 Caracterização do Problema Estudado

O estudo delimitou-se a analisar as características do escoamento de ar no coletor de admissão de um motor de combustão interna, aplicado a veículos de alto desempenho. A primeira etapa contemplou a modelagem do componente, mostrado na Fig. 1.

Figura 1 - (a) modelo tridimensional; (b) corte transversal do volume de controle para análise do duto 1.



Fonte: Elaborado pelos autores

O modelo foi realizado com base em um componente físico, já utilizado em veículos. Os cantos vivos formados no projeto original foram arredondados no volume de controle para que o refinamento de malha pudesse ter uma transição suave entre faces conectadas.

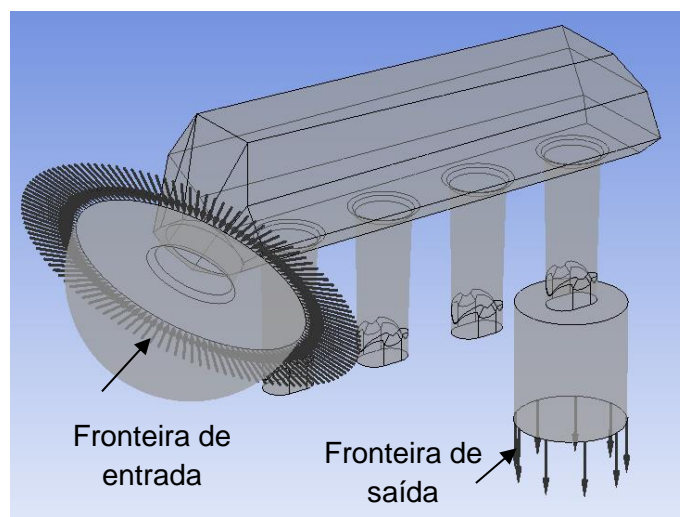
Como resultados das simulações foram obtidos os campos de pressão e as linhas de corrente no volume de controle. Os fluxos de massa para cada duto foram obtidos numericamente e experimentalmente, visando um comparativo e a validação.

3 METODOLOGIA

3.1 Condições de Contorno

Para que os resultados possam ser satisfatórios, as condições de contorno devem ser semelhantes à condição real. Portanto, os parâmetros são idênticos aos do experimento. A Fig. 2 mostra as fronteiras de entrada e a de saída de ar no caso do duto 4.

Figura 2 - Fronteiras do volume de controle para o estudo do duto 4.



Fonte: Elaborado pelos autores

Na entrada de ar foi adicionada uma face semiesférica com objetivo de contemplar a entrada de ar em todos os sentidos. Os parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor atribuído
Tipo de simulação	Transiente
Tipo de escoamento	Incompressível
Troca de calor	Isotérmico
Intervalo de tempo (s)	0,0005
Pressão na entrada (Pa)	2491,0 (10" H ₂ O)
Pressão na saída (Pa)	0
Pressão atmosférica (Pa)	101325
Fluído	Ar
Temperatura do fluido (°C)	15
Densidade do fluido (kg/m ³)	1,225
Viscosidade dinâmica	1,81E ⁻⁵
Modelo de turbulência	SST

Fonte: Parâmetros extraídos do software.

Os parâmetros de temperatura, densidade e viscosidade dinâmica do fluido dependem das condições ambientais durante experimento, caso contrário seria executado nas condições normais de temperatura e pressão. O tipo de escoamento foi determinado como incompressível através do cálculo da velocidade isentrópica, Eq. (1) (adaptado de Fox *et al*, 2014), que depende apenas das diferenças de pressão para ser avaliada e, dessa maneira, é possível calcular a velocidade da onda e, por consequência, o número de Mach para o escoamento. Assim,

$$V_{is} = \sqrt{7RT_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,286} \right]} \quad (1)$$

Utilizando R igual a 287,1 J/kgK, para a pressão de 2491 Pa a velocidade isentrópica foi de 64,5 m/s. Além da velocidade isentrópica é necessário calcular a velocidade da onda (c), usando-se a Eq. 2 (adaptado de Fox *et al*, 2014). Deste modo,

$$c = \sqrt{\gamma RT_0} \quad (2)$$

Aplicando os mesmos valores de R e T utilizados na Eq. (1) para essa equação, o resultado é de 340 m/s. Para esta velocidade o número de Mach é igual a 0,19, indicando que a simulação pode ser executada considerando o

escoamento como incompressível, uma vez que o critério é que o número de Mach seja menor que 0,3.

Conforme Lightfoot (2002), O método numérico resolve a equação da continuidade, Eq. (3) e as equações de Navier-Stokes, Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6), para escoamentos incompressíveis e de viscosidade constante.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

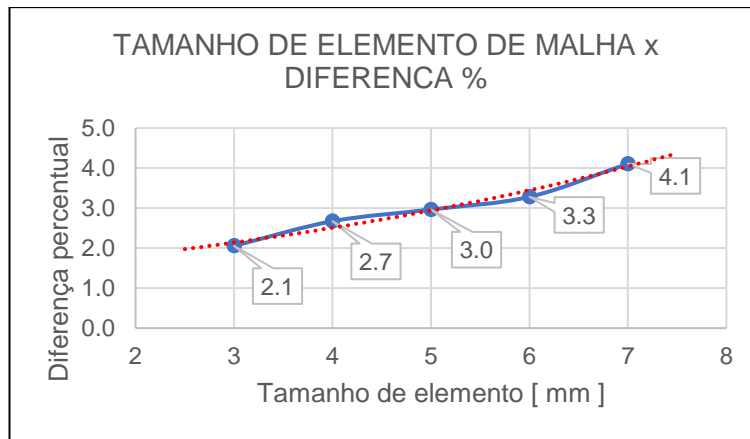
$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Para o modelo de turbulência foi selecionado o modelo *SST (shear stress transport)* que Menter, F.R. (2003) recomenda para aplicações onde há um grande gradiente de pressões e que também possa ocorrer o descolamento do escoamento e para tanto o modelo resolve as equações *k- ω* em regiões próximas às paredes e *k- ϵ* no restante e, por conta de sua formulação, determina onde as equações serão resolvidas sem a intervenção do usuário.

3.2 Refinamento da Malha

Para avaliar o refinamento da malha, realizou-se um comparativo entre simulações com diferentes malhas nas mesmas condições de contorno, apresentadas na Tab. 1. O resultado foi colocado em um gráfico para análise, Fig. 3, utilizando como parâmetro de comparação a vazão mássica de 0,083788 kg/s, foi obtida no ensaio experimental para o duto 4.

Figura 3 - Tamanho de malha x Diferença percentual.



Fonte: Elaborado pelos autores

Pode ser observado na Fig. 3 que a diferença diminui conforme ocorre o refinamento da malha. O melhor resultado com o menor tempo de solução foi para o elemento de malha de 5 mm, com 3% de diferença em relação ao parâmetro de controle é apresentado na Tab. 2 os dados da malha conforme o tamanho de elemento, a quantidade de nós computacionais e a quantidade total de elementos, assim como o tempo para a solução de cada caso.

Tabela 2 - Tabela de propriedades da malha

Malha [mm]	Quantidade de nós	Quantidade de elementos	Tempo de solução [HH:MM:SS]
7	106.909	367.517	10:17:29
6	140.151	485.145	13:09:35
5	206.095	735.272	19:17:41
4	327.665	1.229.300	30:44:55
3	650.493	2.592.379	51:35:07

Fonte: Dados obtidos através dos resultados do refinamento.

A quantidade de nós e de elementos é proporcional e o tempo de simulação para cada caso aumenta conforme a quantidade. Para o elemento de malha de 5 mm, pode ser observado uma quantidade significativa de elementos e nós, porém 40% menor do que a quantidade para o elemento de 4 mm.

Para o tamanho de elemento selecionado houve um tempo de simulação significativo, porém aceitável, de em torno de 20 h para a sua convergência, que se repetiu nos casos finais da simulação.

3.2 Metodologia Experimental

O experimento foi conduzido em um duto por vez, da mesma forma que nas simulações. Portanto, os demais dutos tiveram que ser fechados e vedados para que não houvesse entradas de ar, o que poderia influenciar no experimento.

Para determinar o fluxo mássico de ar foi usada uma bancada de fluxo, equipamento comumente utilizado na indústria automotiva para obtenção de dados de fluxo em cabeçotes de motor, coletores de admissão ou coletores de escape. Proporciona medição de vazão volumétrica, normalmente em unidades CFM (*cubic feet per minute*), que é a unidade de medida utilizada no mercado automotivo, principalmente de preparação, e pode ser convertida na unidade de vazão volumétrica adotada pelo SI.

Utilizou-se uma bancada do fabricante Motorpower, modelo PRO 500, com capacidade para medir vazões acima de 500 CFM, que permite pressões na entrada de até 30" de H₂O, sendo a incerteza da medição igual a 1,5%. A montagem realizada é mostrada na Fig. 4.

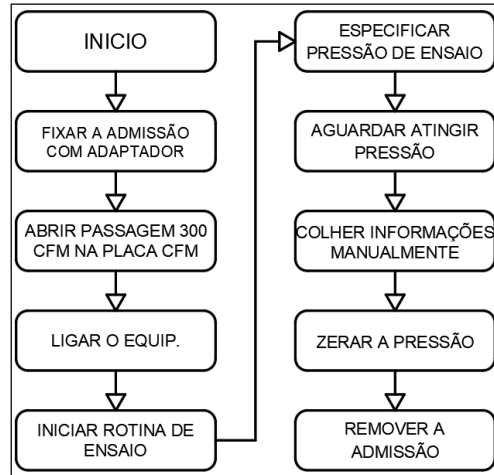
Figura 4: Coletor de admissão afixado na bancada.



Fonte: Elaborado pelos autores

A temperatura e pressão atmosféricas ambientes no local de ensaios foram registradas visando a determinação da massa específica do ar. O fluxograma da Fig. 5 mostra as etapas do experimento.

Figura 5 - Fluxograma do ciclo de ensaio da bancada.



Fonte: Elaborado pelos autores

O processo de ensaio na bancada de fluxo foi repetido para cada um dos dutos da admissão, utilizando os mesmos parâmetros para todos os experimentos. Através das vazões volumétricas obtidas no equipamento e das propriedades termodinâmicas do ar foi possível determinar a vazão mássica, a qual foi então utilizada como parâmetro para validação da simulação.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados Numéricos

Os resultados obtidos nas simulações para vazão mássica (\dot{m}), vazão mássica média ($\dot{m}_{méd}$), vazão volumétrica (\dot{V}), vazão volumétrica média ($\dot{V}_{méd}$), vazão mássica relativa ao escoamento total (\dot{m}_{rel}), vazão mássica relativa média ($\dot{m}_{rel.m}$), diferença entre a vazão mássica relativa à vazão mássica média ($Dif.$) e o tempo de simulação são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 - Resultados da simulação

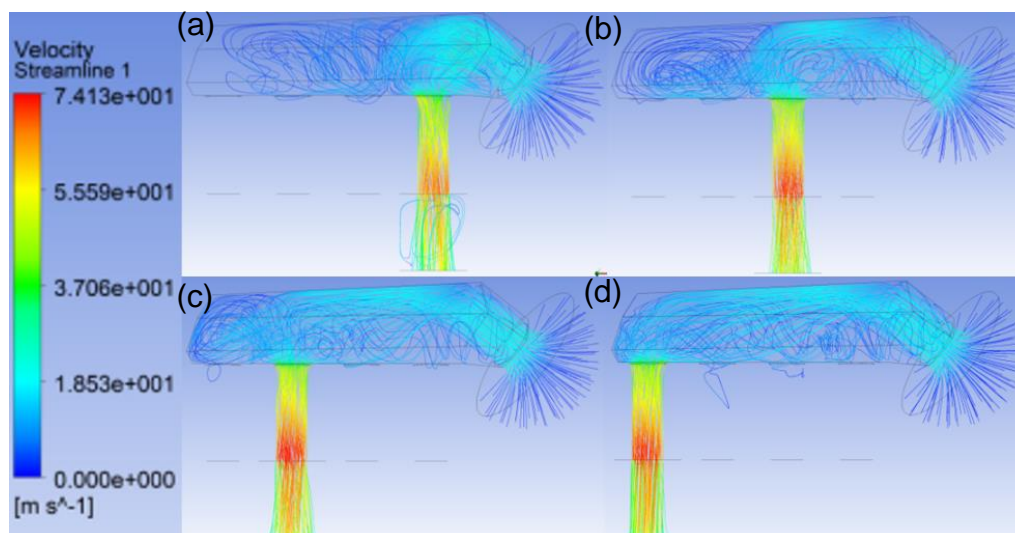
Duto	\dot{m} [kg/s]	$\dot{m}_{méd}$ [kg/s]	\dot{V} [m³/s]	\dot{V} [CFM]	$\dot{V}_{méd}$ [CFM]	\dot{m}_{rel} [%]	$\dot{m}_{rel.m}$ [%]	Dif. [%]	Tempo de simulação [HH:MM:SS]
1	0,079907		0,065230	138,22		24,61		1,6	19:33:30
2	0,081990	0,081182	0,066930	141,82	140,42	25,25	25,00	1,0	18:55:56
3	0,081527		0,066553	141,02		25,11		0,4	19:09:45
4	0,081305		0,066371	140,63		25,04		0,2	19:17:42
Total	0,324729		0,265085	561,69		100,00			76:56:53

Fonte: Dados obtidos através dos resultados de simulação.

É possível notar que a diferença entre os dutos 1 e 2 é a mais significativa do que o restante, e que o resultado no duto 1 tem uma diferença de 1,6% em relação ao escoamento médio. Para fins de projeto se utiliza como parâmetro uma diferença de até 5% na variação percentual em relação à vazão mássica média e, por esse motivo, torna-se importante analisar a diferença relativa entre cada duto e o escoamento médio.

Na Fig. 6 estão dispostas as imagens das linhas de corrente para cada um dos quatro dutos.

Figura 6 - Linhas de corrente para o volume de controle (a) duto 1; (b) duto 2; (c) duto 3; (d) duto 4; em vista lateral.



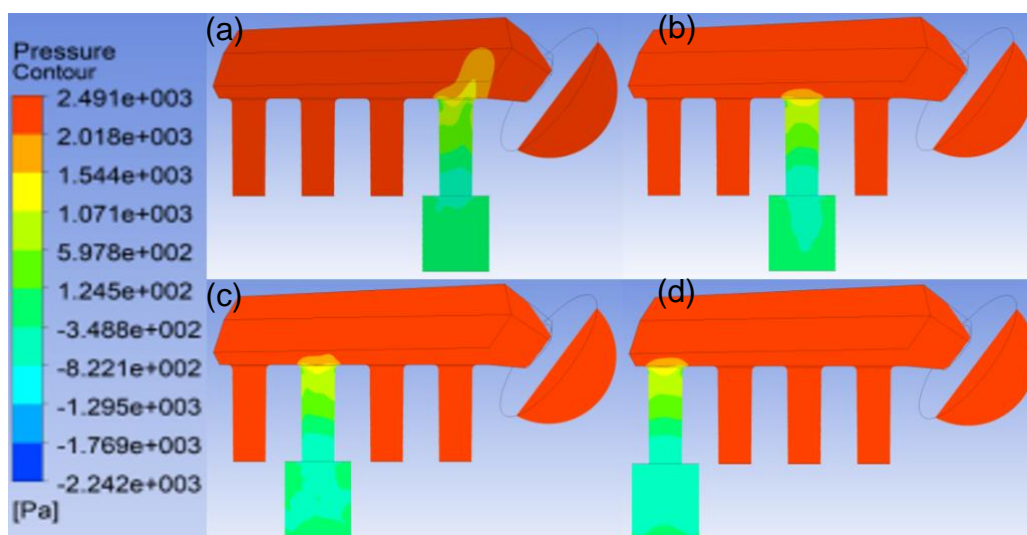
Fonte: Elaborado pelos autores

Verifica-se que a velocidade máxima do escoamento, que ocorre na saída do duto por conta de sua conicidade. Também é possível acompanhar a trajetória

do escoamento no interior do volume de controle e, dessa maneira, otimizar a sua geometria, caso seja notada alguma diferença significativa entre os resultados para cada duto. A trajetória do escoamento mostra que a geometria do coletor de admissão o direciona diretamente para a parede superior do volume de controle, o que força o fluido a mudar drasticamente de direção e gera zonas de vorticidade e descolamento da camada limite por recirculação e diminuição de velocidade.

Na Fig. 7 é apresentado o contorno de pressões para cada caso, que é utilizado como um critério para tomada de decisão se o coletor de admissão irá proporcionar o efeito desejado no motor onde for aplicado.

Figura 7 - Contorno de pressão para os dutos (a) duto 1; (b) duto 2; (c) duto 3; (d) duto 4; em vista lateral.



Fonte: Elaborado pelos autores

Para todos os dutos a região de menor pressão está situada na saída, o que é proporcionado pela alta velocidade atingida pelo escoamento. Martins (2011) cita que é importante ter a região de menor pressão o mais próximo possível da válvula de admissão no cabeçote do motor, sendo que esse contorno favorece para que isso ocorra. No duto 4 houve a melhor distribuição dos contornos de pressão, o que demonstra uma melhor distribuição do escoamento no interior do duto, aproximando-se assim de um escoamento ideal.

4.2 Resultados Experimentais

Os resultados obtidos na coleta de dados durante os experimentos são apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 - Resultados experimentais

Duto	\dot{m} [kg/s]	$\dot{m}_{méd}$ [kg/s]	\dot{V} [m ³ /s]	\dot{V} [CFM]	$\dot{V}_{méd}$ [CFM]	\dot{m}_{rel} [%]	$\dot{m}_{rel.m}$ [%]	Dif. [%]
1	0,079088		0,064562	136,80		24,29		2,8
2	0,082904	0,081399	0,067677	143,40	140,80	25,46	25,00	1,8
3	0,079817		0,065156	138,06		24,51		1,9
4	0,083788		0,068399	144,93		25,73		2,9
Total	0,325597			0,265794		563,19		

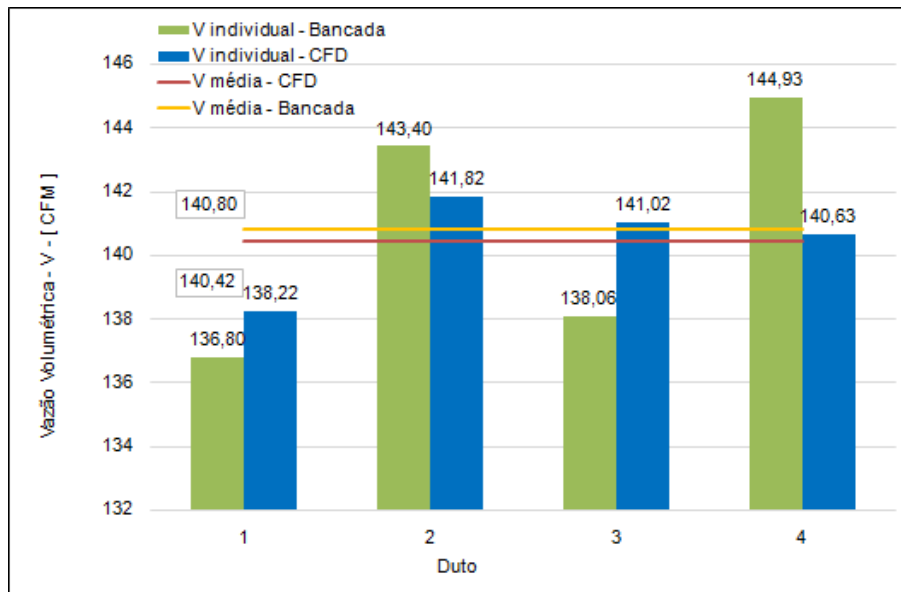
Fonte: Dados obtidos através de coleta manual de dados e conversões.

É possível observar que as diferenças em relação ao escoamento médio são todas menores que 3%, sendo que a menor vazão mássica relativa ocorreu no duto 1 e a maior no duto 4. A maior diferença percentual em relação à vazão média ocorreu no duto 4, com 2,9%.

4.3 Comparativo Entre Resultados Numéricos e Experimentais

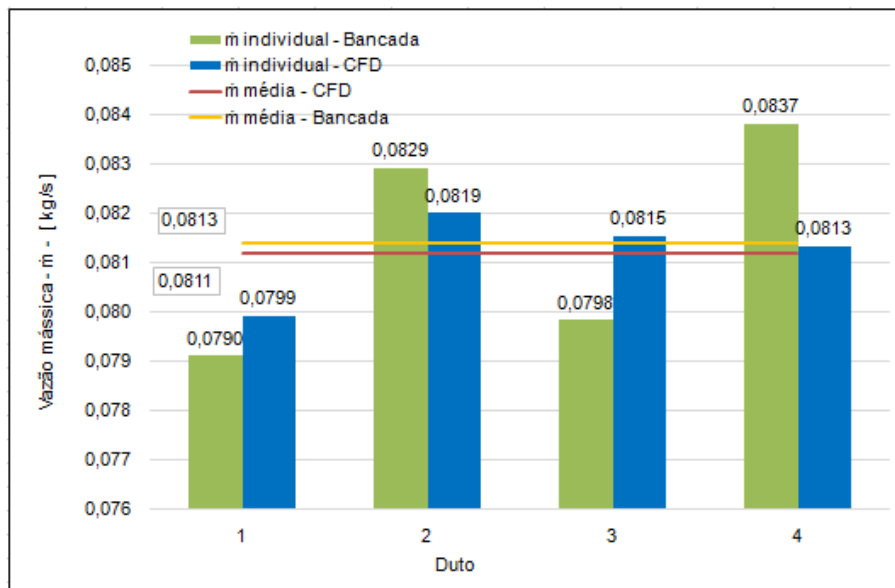
A seguir são apresentados resultados comparativos entre a análise numérica e experimental, como mostra a Fig. 8, para a vazão volumétrica, que foi convertida da vazão mássica no caso da simulação e a Fig. 9 para a vazão mássica, obtida por conversão no estudo experimental.

Figura 8 - Vazões volumétricas.



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 9 - Vazões mássicas.



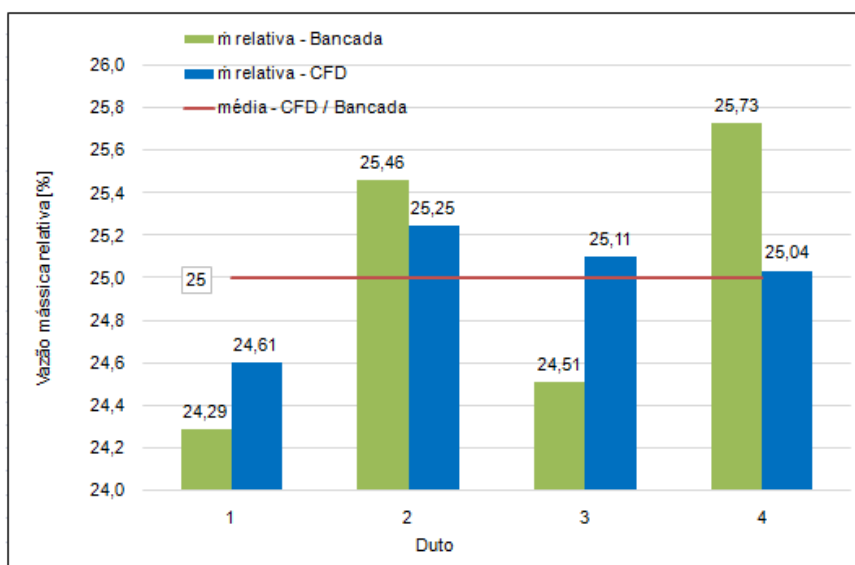
Fonte: Elaborado pelos autores

A maior diferença entre simulação e experimento ocorre no duto 4, que foi de 4,3 CFM, equivalente à 0,002483 kg/s. A vazão mássica média para a análise numérica foi menor do que a da bancada em 0,000217 kg/s, o que representa uma diferença de 0,27% entre as médias obtidas na simulação e bancada. As diferenças maiores nos dutos 3 e 4 em relação aos dutos 1 e 2 podem estar

relacionadas ao método numérico por conta da quantidade de equações que devem ser resolvidas no volume de controle entre a fronteira de entrada e a fronteira de saída. Também pode estar relacionado com a fidelidade do modelo em 3d com o protótipo utilizado no experimento.

Na Fig. 10 está apresentada a vazão mássica relativa para os resultados de *CFD* e os obtidos pela bancada.

Figura 10 - Vazão mássica relativa.

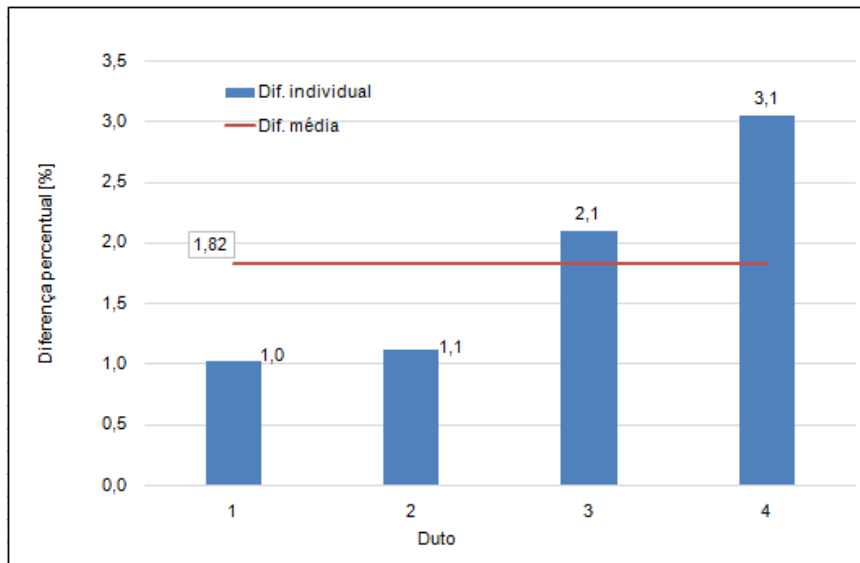


Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se que as diferenças nos dutos 4 e 1 são as mais expressivas, com 1,44% para a análise numérica e entre os dutos 2 e 1, e com 0,64% para a análise experimental. A vazão mássica relativa mostra quanto cada duto representa no escoamento total de forma percentual.

Apresenta-se na Fig. 11 uma comparação entre as diferenças percentuais dos resultados numérico e experimental.

Figura 11 - Gráfico de diferença percentual CFD x Bancada.



Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados de diferença percentual entre o experimento na bancada de fluxo e a análise numérica mostra o quão precisa é a simulação em relação ao experimento. A maior diferença ocorreu no duto 4 que atingiu 3,1%, enquanto a menor diferença aparece no duto 1, com 1%. A média de diferença foi de 1,82%. A maior diferença nos dutos 3 e 4 pode estar relacionada com as incertezas de medição tanto do método experimental, uma vez que a incerteza de medição da bancada de fluxo é de 1,5%, conforme mencionado anteriormente, quanto do método numérico. Também deve ser observado que as simplificações adotadas pelo modelo de turbulência no método numérico podem influenciar diretamente os resultados. A fidelidade de geometria do modelo em 3d com o protótipo utilizado pode ser um fator de grande influência, pois por conta do processo de fabricação que utiliza chapas dobradas e um processo de junta por soldagem com posicionamento manual das partes, podem haver variações consideráveis durante o processo de produção. Ainda assim o resultado médio de 1,82% representa um baixo valor para a diferença e dessa maneira a simulação por CFD pode ser considerada de acordo com a realidade.

5 CONCLUSÕES

Nos resultados apresentados anteriormente, as diferenças encontradas entre o experimento de validação e a análise numérica foram consideravelmente baixas, e comprova que é viável se utilizar da ferramenta de simulação quando houver disponibilidade. Esta prática pode diminuir significativamente o tempo de projeto já que a geometria pode ser validada virtualmente, sem a necessidade de construção de um protótipo físico, que normalmente demanda considerável tempo de projeto, fabricação e teste na bancada. Considerando que o desempenho pode não ser satisfatório deverá ser realizado um novo projeto, bem como todo o processo de fabricação e validação, assemelhando a técnica à tentativa e erro, podendo levar meses de desenvolvimento. Ao utilizar a simulação como ferramenta é possível aproximar a geometria da melhor característica antes que seja fabricado qualquer protótipo.

Os resultados obtidos comprovam a robustez dos parâmetros de entrada e dessa maneira tornam válido o modelo de simulação para escoamentos internos em coletores de admissão. As rotinas empregadas no desenvolvimento do trabalho podem ser implementadas como rotinas de trabalho no âmbito profissional, uma vez que tornam a rotina de trabalho direta.

Para a sequência desta pesquisa podem ser avaliados dados numéricos e experimentais obtidos ao usar outros valores de diferença de pressão, e por fim comparar os campos de pressão, temperatura e vazões mássicas. É possível também realizar experimentos para medição de pressão e temperatura no coletor de admissão em diferentes regiões, visando a validação com o modelo simulado.

REFERÊNCIAS

Bird, R. Byron; Stewart, Warren E.; Lightfoot, Edwin N. Transport Phenomena. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002. 862 p.

Brunetti, Franco. Motores de Combustão Interna: Volume 2. São Paulo: Blucher, 2012. 485 p.

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.4, n.2, abril de 2019.

Cengel, Yunus A.; Cimbala, John M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Mcgraw - Hill, 2007. 816 p.

Fox, Robert W. et al. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2014. 871 p.

Heywood, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: Mcgraw Hill, 1988. 930 p.

Martins, Jorge. Motores de Combustão Interna. 4. ed. São Paulo: Publindústria, 2013. 437 p.

Menter, F. R.; kuntz, M.; langtry, R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 625-632, 2003.

Edição especial - 8º MCSul - Conferência Sul em Modelagem Computacional e VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

Enviado em: 04 fev. 2019

Aceito em: 05 fev. 2019

Editores responsáveis: João Paulo Silva Lima / Liércio André Isoldi / Mateus das Neves Gomes