

Análise numérica dos parâmetros globais do escoamento e dos perfis de pressão no disco frontal de Difusores Radiais Modificados Numerical analysis of global flow parameters and pressure profiles on the frontal disk of Modified Radial Diffusers

Marcus Vinícius Andrade Ferreira¹, Fábio Kenji Suguimoto²
Ricardo Lopes Ferreira³

RESUMO

Este trabalho analisa numericamente o escoamento em um difusor radial modificado, o qual pode ser aplicado para sistemas de válvula do tipo palheta de compressores alternativos de refrigeração. A concepção deste tipo de válvulas desempenha um papel crucial na melhoria da eficiência dos compressores. No entanto, a tarefa de modelar e resolver esse problema com todos seus fenômenos físicos é muito complexa, devido, principalmente, à interação fluido-estrutura. Dada a exigência de elevado tempo e recursos computacionais para abordar adequadamente a interação fluido-estrutura no contexto da simulação global de um compressor, é comum adotar o modelo quase-estático para representar o comportamento das válvulas utilizando o modelo físico do difusor radial. Para a simulação foi utilizado o software de código aberto OpenFOAM[®]. Os cálculos foram realizados pelo método de Volumes Finitos para um escoamento estacionário incompreensível. Como resultado, calculou-se os parâmetros globais do escoamento e avaliou-se o comportamento do perfil de pressão ao longo da superfície do disco frontal considerando o escoamento para baixo número de Reynolds igual a 3000.

PALAVRAS-CHAVE: Compressores alternativos; Difusores Radiais Modificados; Válvulas tipo palheta; OpenFoam.

ABSTRACT

This work numerically analyzes the flow in a modified radial diffuser, which can be applied to reed valve systems in reciprocating refrigeration compressors. The design of this type of valve plays a crucial role in improving compressor efficiency. However, the task of modeling and solving this problem with all its physical phenomena is very complex, mainly due to the fluid-structure interaction. Given the requirement of high time and computational resources to adequately address the fluid-structure interaction in the context of the global simulation of a compressor, it is common to adopt the quasi-static model to represent the behavior of the valves using the physical model of the radial diffuser. The open source software OpenFOAM[®] was used for the simulation. The calculations were carried out using the Finite Volume method for an incomprehensible steady flow. As a result, the global flow parameters were calculated and the behavior of the pressure profile along the surface of the frontal disc was evaluated considering the flow at low Reynolds numbers equal to 3000.

KEYWORDS: Reciprocating Compressors; Modified radial diffusers; Reed type valves.

INTRODUÇÃO

No compressor, as perdas termodinâmicas são consideradas importantes, para melhoria no sistema como um todo. Neste contexto, a compreensão do escoamento que

¹ Marcus Vinícius Andrade Ferreira. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcusferreira@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3961552851793912.

² Fábio Kenji Suguimoto/Docente do curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: fksuguimoto@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8270074009363056.

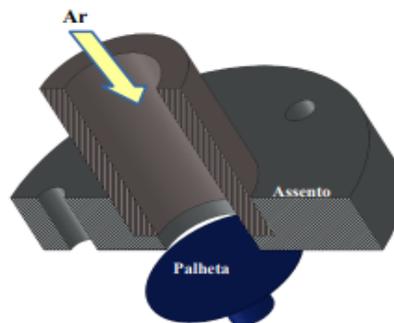
³ Ricardo Lopes Ferreira/Docente do curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: ricardoferreira@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3138126883628773.

ocorre no sistema de válvulas de sucção e descarga dos compressores permite o desenvolvimento de compressores mais eficientes [1].

Com os esforços no desenvolvimentos na área da refrigeração, destaca-se a primeira patente de uma máquina de refrigeração desenvolvida por Perkins em 1834, operando segundo um ciclo de compressão mecânica a vapor. Basicamente, neste tipo de sistema de refrigeração é empregado os seguintes componentes: compressor, condensador, dispositivo de expansão e o evaporador. O desempenho eficiente desse ciclo depende de cada um dos componentes [2], principalmente do compressor o qual consome energia elétrica.

Portanto, o presente trabalho tem como intuito estudar o escoamento em válvulas de compressores por meio de um modelo físico conhecido como difusor radial apresentado na Figura 1. O escoamento de ar nesse dispositivo é alimentado por um tubo de alimentação axial, o qual descarrega o ar sobre um disco frontal. O ar de encontro com o disco frontal é defletido e guiado em uma região radial no qual ocorre a diminuição da área de passagem funcionando como um difusor. O disco frontal pode ser entendido como sendo uma válvula do tipo palheta utilizado nos compressores alternativos. Este tipo de válvula possui abertura e fechamento automático, acionadas apenas pelo diferença de pressão do escoamento.

Figura 1 – Difusor Radial 3D



Fonte: Ferreira [1].

Para compreensão do escoamento turbulento a baixos número de Reynolds ($Re=3.000$), este será simulado considerando um modelo numérico bidimensional e com simetria de eixo. Os parâmetros globais do escoamento serão calculados e avaliados variando a distância da palheta do assento conforme mostrado na Figura 1. Esses parâmetros são de fundamental importância para os projetistas de válvulas de compressores para promover a simulação do compressor como um todo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O escoamento através das válvulas de compressores alternativos é bastante complexo, pois possui particularidades físicas difíceis de resolver do ponto de vista computacional no que tange a modelagem, validação do modelo, recursos e custo computacional. Além disso, a dinâmica real de abertura e fechamento das válvulas consiste em um fenômeno de interação fluido-estrutura bastante custoso para simulação computacional quando possível de resolver.

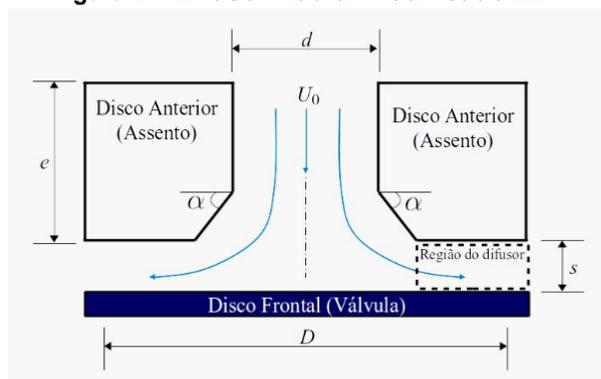
Tendo em vista as dificuldades para simulação do problema completo considerando a dinâmica das válvulas, uma solução viável e utilizada ainda nos dias de hoje, é a modelagem numérica quasi-estática utilizando o modelo físico do difusor radial. Além disso, o difusor radial simplifica a forma geométrica complexa das válvulas reais em discos circulares.

Com o emprego do modelo quasi-estático, considerando afastamentos infinitesimais entre o disco anterior (assento da válvula) e o disco frontal (válvula), resolve-se o escoamento variando as posições estáticas da válvula e a vazão do escoamento. Com isso, obtêm-se dados para calcular os parâmetros globais do escoamento, tais como a área efetiva de força, A_{ef} e o coeficiente de descarga, C_d . A área efetiva de força é usada para calcular a força exercida pelo escoamento sobre a válvula em cada posição estática, o qual determinará o deslocamento da válvula. Já o coeficiente de descarga é utilizado na simulação do compressor para calcular a vazão real do escoamento através da válvula [1].

Como mostrado na Figura 2, o difusor radial é composto por dois discos concêntricos paralelos: o disco frontal (palheta) e o disco anterior que possui um furo concêntrico por onde passará o fluido. Este furo por onde passa o fluido possui um diâmetro d e é conhecido como tubo de alimentação do difusor. Por outro lado, o disco frontal possui um diâmetro maior D e o espaço entre o disco frontal e anterior corresponde à região do difusor propriamente dita.

O afastamento entre os dois discos (s/d) e a razão de diâmetros do difusor (D/d) são usualmente adimensionalizados para efeito de facilidade de comparação de resultados. Esses dois adimensionais representam os parâmetros geométricos importantes do difusor radial.

Figura 2 – Difusor Radial modificado 2D



Fonte: Ferreira[1].

Dentre os trabalhos que investigaram numericamente o escoamento turbulento em difusores radiais destacam-se:[3],[5],[6],[7] e em [8]. Todos estes autores, cada um com seus objetivos e particularidades estudadas, utilizaram um modelo físico do difusor radial sem modificações ($\alpha = 0^\circ$), doravante chamado de difusor radial normal.

Por outro lado, trabalhos avaliando parâmetros do escoamento em difusores radiais modificados são bem menores, não abrangendo a vasta e ampla condições de operação quando aplica estas análises para compressores alternativos. Exemplo de trabalhos com difusores radiais modificados são o da [4], e o mais recente do [11]. O

primeiro lida com um difusor com razão de diâmetros ($D/d=3$) muito elevada para aplicações em compressores de refrigeração. [11], por sua vez, avalia a área efetiva de força e de escoamento para apenas um afastamento adimensional $s/d = 0,11$ para escoamento com Reynolds igual a 422.000.

METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

As equações governantes para o escoamento de um fluido incompressível, Newtoniano (com propriedades constantes) e isotérmico serão as equações da continuidade e da quantidade de movimento linear. Estas equações são apresentadas em [1]. Além disso, agregam outras equações governantes adicionais provenientes do modelo de turbulência utilizando, que é o RNG κ - ϵ detalhado em [9].

O conjunto de equações governantes do problema serão discretizadas pelo método dos volumes finitos implementados no código aberto e de licença gratuita denominado de OpenFOAM®. Essas equações discretizadas são solucionadas via *solver* do código computacional por meio de um algoritmo de acoplamento pressão-velocidade denominado de SIMPLE (acrônimo de *Semi-Implicit Pressure Linded Equation*) Consistente. Maiores detalhes podem ser vistos em [10].

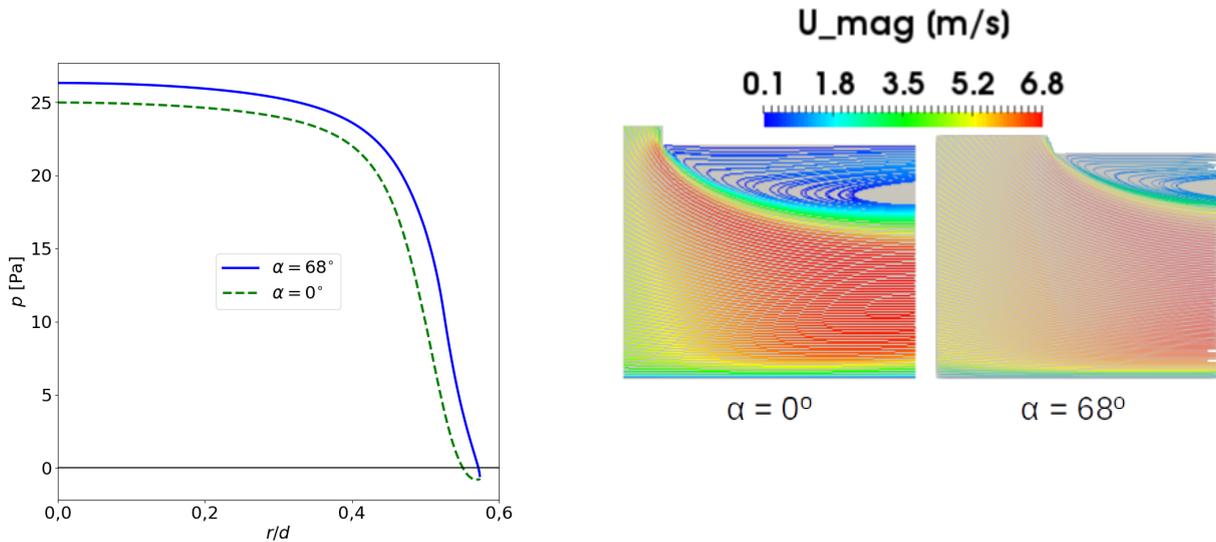
A discretização espacial do domínio computacional será feita utilizando uma própria funcionalidade do código para construção de malhas computacionais denominada de *blockMesh*. O domínio computacional é bidimensional com um formato de cunha (2D-cunha), o qual é específico para problemas com simetria de eixos, conforme mostrado na Figura 2. A terceira dimensão (em z) possui apenas um volume e o ângulo θ deve ser no máximo de 5° , requisitado pela metodologia implementada no código. Na entrada do domínio é configurada uma velocidade correspondente ao número de Reynolds que será investigado. Na saída do domínio é prescrita a pressão de descarga (pressão atmosférica) nula, de modo a trabalhar com a pressão na escala manométrica. As demais condições de contorno aplicadas no domínio são de parede e de simetria.

RESULTADOS E CONCLUSÃO

A Figura 3 ilustra o comportamento da distribuição de pressão sobre a superfície do disco frontal (Fig. 3a) e as linhas de corrente coloridas pela magnitude da velocidade (Fig. 3b) para os dois casos estudados: difusor normal e modificado. Analisando essas figuras nota-se que a queda de pressão do escoamento quando adentra a região do difusor ($r/d > 0,5$) é menor para o difusor radial normal, pois conforme pode notar na Figura 3b, a bolha de recirculação do mesmo é maior nesta região, promovendo maior aumento de velocidade do escoamento.

A Tabela 1 mostra os valores de área efetiva de força adimensional e o coeficiente de descarga calculados. A implementação otimizou a área efetiva de força, assim como pode ser notado no perfil de pressão maiores para o difusor modificado na Figura 3a. Por outro lado, com os níveis de pressão maiores, a modificação no difusor reduziu o coeficiente de descarga do escoamento.

Figura 3 – Perfil de pressão e linhas de corrente do campo do escoamento



(a) - Perfil de pressão

(b) - Linhas de corrente do escoamento

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

Tabela 1 - Área efetiva e Coeficiente de descarga

α	A_{ef}	C_d
0°	0,900	0,197
68°	0,989	0,192

Fonte: Elaborado pelo autor(2023)

Agradecimentos

Agradecemos à UTFPR – Campus C. Procópio pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

[1] FERREIRA, R. L. **Área Efetiva de Força e Coeficiente de Descarga para Escoamentos em Difusores Radiais: um conjunto amplo de dados de soluções numéricas para aplicação em**



válvulas de compressores de refrigeração. 2020. 62 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2020.

[2] FERREIRA, R. T. S.; DESCHAMPS, C. J.; PRATA, A. T. Pressure distribution along valve reeds of hermetic compressors. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 2, n. 2, p. 201–207, 1989. DOI: 10.1016/0894-1777(89)90034-4.

[3] DESCHAMPS, C. J.; FERREIRA, R. T. S.; PRATA, A. T. Turbulent Flow Through Valves of Reciprocating Compressors. *INT. COMP. ENG. CONF. at PURDUE*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 377–382.

[4] MARIANI, V. C.; PRATA, A. T.; DESCHAMPS, C. J. Numerical analysis of fluid flow through radial diffusers in the presence of a chamfer in the feeding orifice with a mixed Eulerian–Lagrangian method. **Computers & Fluids**, v. 39, n. 9, p. 1672–1684, out. 2010.

[5] COLACITI, A. K.; VALDÉS LÓPEZ, L. M.; NAVARRO, H. A.; CABEZAS-GÓMEZ, L. Numerical simulation of a radial diffuser turbulent airflow. **Applied Mathematics and Computation**, v. 189, n. 2, p. 1491–1504, 2007. DOI: 10.1016/j.amc.2006.12.029.

[6] RIGOLA, J.; LEHMKUHL, O.; PEREZ-SEGARRA, C. D.; OLIVA, A. Numerical simulation of fluid flow through valves reeds based on Large Eddy Simulation Models. *INT. COMP. ENG. CONF. at PURDUE*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8.

[7] FERREIRA, R. L.; GASCHÉ, J. L. Effective force area and discharge coefficient for reed type valves: A comprehensive data set from a numerical study. **International Journal of Refrigeration**, v. 103, p. 287–300, 2019. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.017.

[8] PARK, J. D.; LEE, S. J.; AHN, J. Y.; KIM, J.; KIM, J. B. **Determination of effective flow and force areas for reed type compressor valve systems: Part 1 – Model derivation using CFD analysis results.** *Energies*, v. 16, n. 7, 2023, p. 2951

[9] YAKHOT, V.; ORSZAG, S. A.; THANGAM, S.; GATSKI, T. B.; SPEZIALE, C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, 1992. DOI: 10.1063/1.858424.

[10] MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics.** Switzerland: Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-16874-6.

[11] RIGOLA, J.; ALJURE, D.; LEHMKUHL, O.; PÉREZ-SEGARRA, C. D.; OLIVA, A. **Numerical analysis of the turbulent fluid flow through valves. Geometrical aspects influence at different positions.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2015. p. 012026.