



Análise numérica do escoamento em difusores radiais modificados a baixo número de Reynolds

Numerical analysis of flow in modified radial diffusers at low Reynolds number

Tathiany Yuka Nimi¹, Marcos Antonio de Souza Lourenço²,
Adriano Silva Borges³, Ricardo Lopes Ferreira⁴

RESUMO

O difusor radial é extensamente empregado para simular o escoamento em válvulas de compressores alternativos utilizados em sistemas de refrigeração. O modelo do difusor radial foi utilizado neste trabalho para avaliar os parâmetros globais do escoamento, área efetiva de força e coeficiente de descarga, para um difusor radial modificado com um ângulo de chanfro de 23° para diferentes afastamentos entre discos. As equações governantes para o campo do escoamento bidimensional, permanente e isotérmico foram discretizadas pelo método dos volumes finitos, aplicando os modelos de turbulência $\kappa - \omega$ SST e RNG $\kappa - \epsilon$. Tanto a área efetiva de força quanto o coeficiente de descarga apresentaram um comportamento linear em função do afastamento entre os discos para o escoamento no difusor modificado. A modificação no difusor otimizou os valores dos parâmetros globais do escoamento, exceto para a área efetiva de força com afastamentos adimensionais acima de 0,04.

PALAVRAS-CHAVE: área efetiva de força; coeficiente de descarga; difusor radial; OpenFOAM; válvula palheta.

ABSTRACT

The radial diffuser is widely used to simulate the flow in valves of reciprocating compressors used in refrigeration systems. The radial diffuser model was used in this work to evaluate the global flow parameters, effective force area and discharge coefficient, for a modified radial diffuser with a chamfer angle of 23° for different displacement between disks. The governing equations for the two-dimensional, steady and isothermal flow field were discretized by the finite volume method, applying the $\kappa - \omega$ SST and RNG $\kappa - \epsilon$ turbulence models. Both the effective force area and the discharge coefficient showed a linear behavior as a function of the displacement between disks for flow in the modified diffuser. The diffuser modification optimized the values of the global flow parameters, except for the effective force area obtained for dimensionless displacement above 0.04.

KEYWORDS: effective force area; discharge coefficient; radial diffuser, OpenFOAM; reed valve.

INTRODUÇÃO

As válvulas do tipo palheta (Fig. 1a) comumente empregadas nos compressores alternativos são ainda projetadas ou otimizadas com o auxílio de simulações do escoamento através de difusor radial (Fig. 1b) conforme explanado por Ferreira e Gasche (2019). A razão disso é a complexa

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: tathianyynimi@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8600224189895213.

² Docente no Curso de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: mlourenco@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8818311395718614.

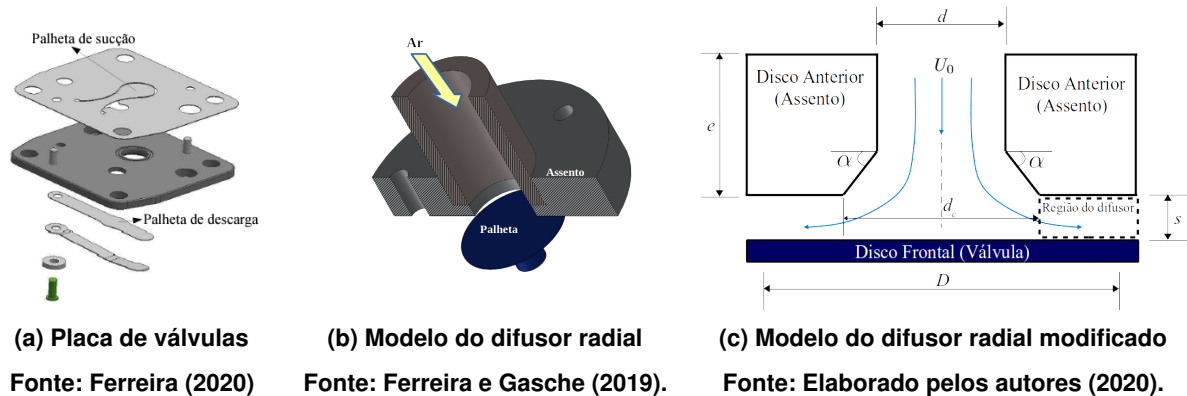
³ Docente no Curso de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: adrianoborges@utfpr.edu.br. ID Lattes: 2015647660010183.

⁴ Docente no Curso de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: ricardoferreira@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3138126883628773.

validação de modelos para simular o problema transiente completo da dinâmica das válvulas e todos os fenômenos acoplados simultaneamente, o que incorre em elevados tempos e recursos computacionais.

Assim, a metodologia quase-estática, na qual o escoamento permanente é simulado para diversas aberturas da válvula, será empregada neste trabalho a fim de determinar os parâmetros globais do escoamento em um difusor radial modificado com um chanfro na região de entrada (Fig. 1c). Os parâmetros globais, área efetiva de força e coeficiente de descarga, são dados de entrada importantes para a simulação do compressor com um todo, pois informam a força atuante na válvula e a vazão do fluido refrigerante através da válvula, respectivamente (FERREIRA, 2020).

Figura 1 – Representações de uma válvula do tipo palheta



O difusor radial (Fig. 1b) consiste em dois discos (frontal e anterior) paralelos e concêntricos com o escoamento ocorrendo a partir de um orifício de alimentação com diâmetro d (Fig. 1c), o qual é defletido radialmente entre dois discos. O disco anterior representa o assento da válvula, enquanto que o frontal (com diâmetro D) simplifica a geometria complexa de válvulas reais do tipo palheta empregada em compressores alternativos. A região do difusor corresponde ao espaço entre os discos com altura s , a qual corresponde a abertura da válvula.

O modelo do difusor radial normal (com $\alpha = 0^\circ$) é bastante conhecido, existindo diversos estudos aplicados a válvulas de compressores alternativos, com o propósito de caracterizar o escoamento e obter parâmetros globais para simular o compressor como um todo, conforme apresentado na revisão da literatura realizada por Ferreira (2020). Um trabalho mais recente foi o de Park et al. (2023), que investigaram numericamente a área efetiva de força e a área efetiva de escoamento em função da diferença de pressão e dimensões da válvula.

Por outro lado, investigações do escoamento em difusores modificados são em quantidade notadamente menores quando comparado com o difusor normal. Destaca-se o trabalho de Mariani, Prata e Deschamps (2010), que analisou de forma numérica e experimental o efeito de chanfros de 5° e 32° na saída do orifício de alimentação, variando o número de Reynolds e os afastamentos entre discos, e obtendo os parâmetros globais de área efetiva de força e área efetiva de escoamento. Entretanto, todo trabalho foi desenvolvido utilizando uma razão de diâmetro muito alta ($D/d=3$) para aplicações em compressores alternativos. Outro trabalho numérico que obteve parâmetros globais do escoamento foi o de Rigola et al. (2015), que comparou ambos os modelos de difusor radial



para um alto número de Reynolds e diferentes modelos de turbulência. É notável a grande lacuna a ser preenchida no estudo dos difusores radiais modificados: ainda não foram estudadas tantas configurações de geometria (ângulos de chanfro) e números de Reynolds, dada a ampla faixa de valores para as condições de operação de compressores alternativos. Foi escolhido para o escopo deste trabalho estudar um baixo número de Reynolds, preenchendo apenas parte dessa lacuna, ficando demais condições de operação para trabalhos futuros.

O principal objetivo deste trabalho é calcular e avaliar os parâmetros globais de área efetiva de força e coeficiente de descarga do escoamento para diferentes afastamentos entre discos de um difusor radial modificado a baixo número de Reynolds ($Re=3000$).

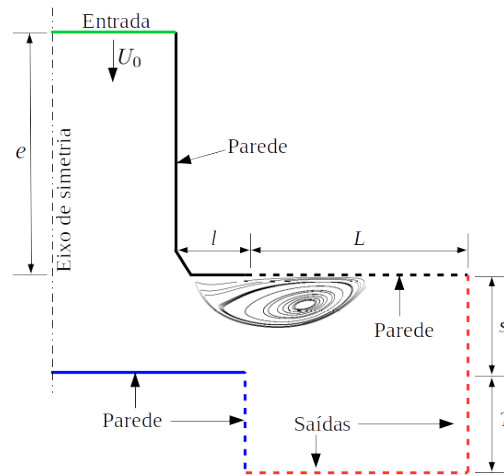
METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

O campo bidimensional de escoamento de ar (com viscosidade cinemática igual a $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) foi simulado em um modelo axissimétrico, com equações governantes discretizadas pelo método dos volumes finitos, conforme apresentado em [Ferreira \(2020\)](#). Esta tarefa foi realizada por meio de um software gratuito e de código aberto denominado de OpenFOAM[®]. As simulações foram realizadas para diferentes afastamentos adimensionais entre os discos do difusor (0,01 até 0,05) para um ângulo de chanfro fixo de $\alpha = 23^\circ$, uma razão de diâmetros $D/d = 1,15$, com $d = 34,83\text{mm}$ e uma razão de diâmetro associado ao chanfro com o diâmetro do orifício de alimentação $d_c/d = 1,05$, implicando em $d_c = 36,57\text{mm}$. O comprimento do orifício de alimentação foi definido como $e = 25d$ para que o escoamento se desenvolva completamente mesmo com a imposição de um perfil uniforme na entrada do domínio com uma velocidade $U_0 = 1,292 \text{ m/s}$, conforme mostrado na [Fig. 2](#). Essas dimensões do difusor radial correspondem à mesma configuração utilizada por [Ferreira \(2020\)](#), diferindo apenas pela introdução do chanfro no modelo.

As demais condições de contorno empregadas são: condição de axissimetria no eixo central do difusor radial; condição de parede impermeável e de não deslizamento em todas regiões definidas como parede na [Fig. 2](#) e condição de derivada nula nas regiões de saída. Dependendo da velocidade imposta na entrada e do afastamento entre os discos (s) forma-se uma bolha de recirculação conforme mostrado na [Fig. 2](#) sem escala, meramente com o propósito ilustrativo. Dependendo das configurações geométricas e do escoamento, a bolha de recirculação cresce pra fora da região do difusor, obrigando o analista numérico a fazer um alongamento do domínio computacional na direção radial (de comprimento L) e também na direção axial (de comprimento T) para garantir a consistência física da condição de contorno imposta na região de saída. O recurso do domínio computacional estendido foi usado apenas para as configurações com $s/d=0,04$ e $0,05$ com $L=2D$ e com $T=0$.

As equações governantes deste escoamento, conservação da massa e do balanço da quantidade de movimento foram discretizadas utilizando a técnica dos volumes finitos explanadas por [Ferreira \(2020\)](#). A discretização do domínio computacional foi realizada por uma ferramenta interna (blockMesh) do OpenFOAM[®] para construção de malhas estruturadas. O algoritmo de acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC foi utilizado para a solução deste escoamento. As demais informações de solução, tais como esquemas de interpolação de segunda ordem, algoritmos de solução do sistema linear e modelos de turbulência são detalhados por [Ferreira \(2020\)](#).

Figura 2 – Domínio computacional e as condições de contornos empregadas



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A validação deste modelo numérico foi realizada por Ferreira (2020) visando: o delineamento correto do domínio computacional, uso adequado da discretização espacial do domínio realizando testes de refinamento de malha e melhor escolha de modelos de turbulência para cada configuração do difusor e do escoamento. Todos os requisitos para o uso correto do modelo numérico definido por Ferreira (2020) foram adotados para os casos simulados, para os quais empregou-se os modelos de turbulência $\kappa - \omega$ SST onde os afastamentos adimensionais variavam de 0,01 a 0,03 e RNG $\kappa - \epsilon$ para os demais.

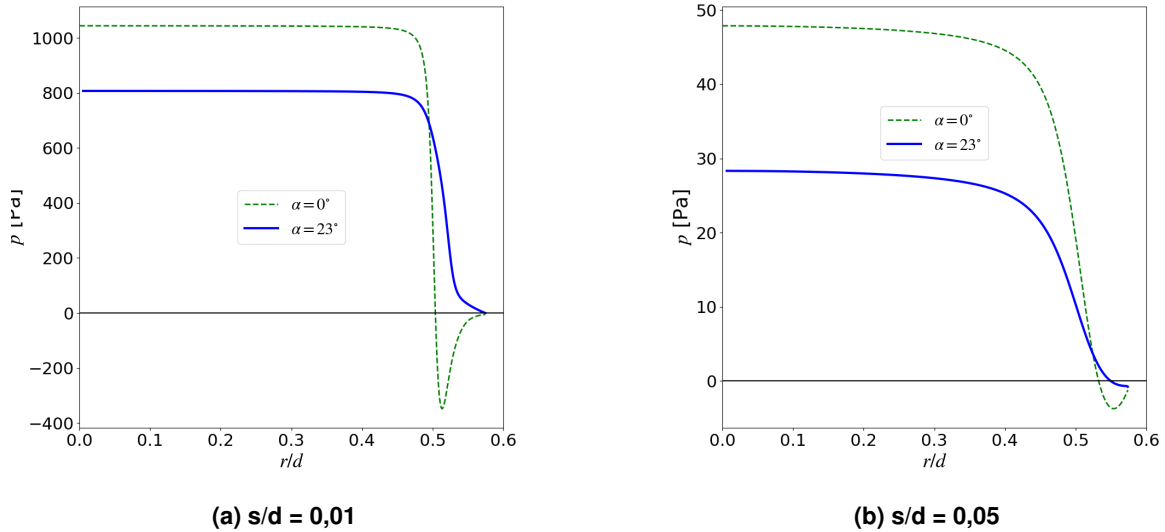
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para auxiliar na análise dos comportamentos dos parâmetros globais do escoamento em função do afastamento entre os discos, a Fig. 3 ilustra o comportamento da distribuição de pressão na superfície do disco frontal para os dois tipos de difusores. Apenas dois casos foram considerados, o de menor e maior afastamento entre os discos. Na Fig. 3a nota-se uma queda de pressão abrupta à medida que o escoamento aproxima da entrada do difusor ($r/d = 0,5$) para os dois tipos de difusores. Entretanto, apenas para o caso do difusor sem modificações constatou-se pressões negativas após a entrada do difusor, pois há formação de uma bolha de recirculação a qual diminui a área de passagem do escoamento reduzindo a pressão para valores negativos. Por outro lado, a influência da pressão negativa no disco frontal na região do difusor diminui à medida que se aumenta o afastamento, conforme pode ser observado na Fig. 3b. O contrário, portanto, ocorre com a pressão na região do difusor do tipo modificado.

As Figs. 4a e 4b mostram o comportamento dos adimensionais, área efetiva de força e coeficiente de descarga, respectivamente. O procedimento de cálculo destes adimensionais encontra-se no trabalho de Ferreira (2020).



Figura 3 – Distribuição de pressão na superfície do disco frontal

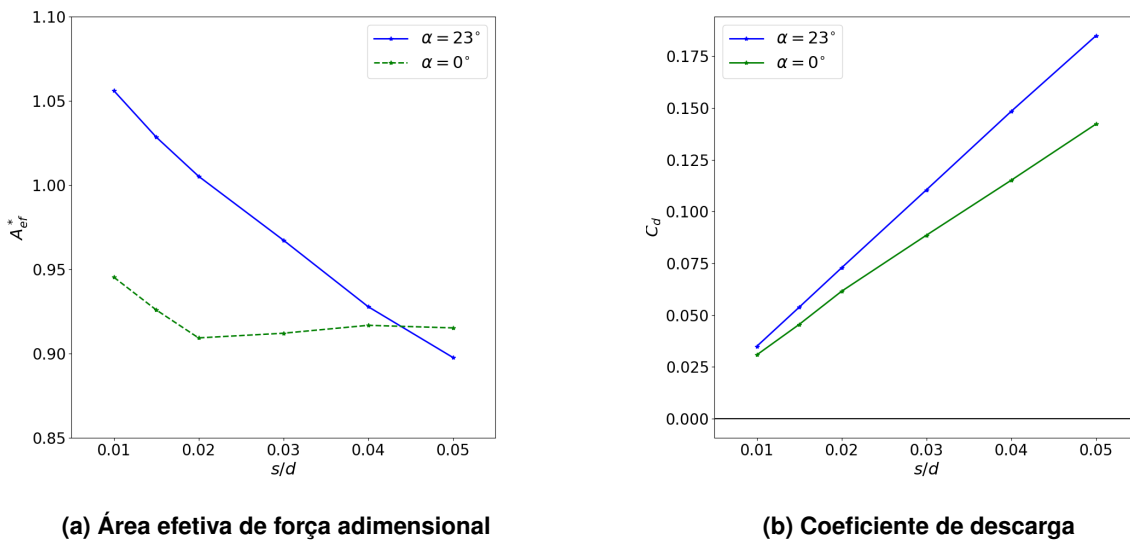


(a) $s/d = 0,01$

(b) $s/d = 0,05$

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 4 – Parâmetros globais do escoamento para os casos analisados



(a) Área efetiva de força adimensional

(b) Coeficiente de descarga

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A área efetiva de força (Fig. 4a) diminuiu linearmente com o afastamento s/d para o difusor modificado. Já para o difusor sem modificações, o comportamento é notadamente diferente, com áreas efetivas menores do que aquelas calculadas para o difusor modificado até $s/d = 0,04$. Para afastamentos maiores e avaliado até 0,05, o comportamento inverte, com otimização da área efetiva para o difusor sem modificações. Isto pode ser atribuído à redução da pressão na região plateau do perfil ($r/d < 0,5$) e ao aumento da região de pressão negativa (isto é, maior queda de pressão dentro do difusor, $r/d > 0,5$) à medida que cresce o afastamento entre os discos (Figs. 3a e 3b).

Conforme esperado, o coeficiente de descarga (Fig. 4b) aumentou linearmente com o afasta-



mentos entre os discos, sendo maior para o difusor modificado em todos os casos. Isso se deve a redução da queda de pressão ao longo do escoamento proporcionada pela modificação aplicada no difusor.

CONCLUSÕES

Os parâmetros globais extraídos das simulações do escoamento no difusor radial modificado mostraram comportamentos lineares: a área efetiva de força diminui e o coeficiente de descarga aumenta à medida que cresce o afastamento entre os discos. Em relação aos casos do difusor sem modificações, o difusor modificado otimizou os valores de coeficiente de descarga (para todos casos analisados) e de área efetiva de força para afastamentos até $s/d=0,04$.

Agradecimentos

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

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- FERREIRA, Ricardo 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. 125 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, dez. 2020. Disponível em: [🔗](#). Acesso em: 7 ago. 2023.
- FERREIRA, Ricardo L.; GASCHÉ, José L. Effective force area and discharge coefficient for reed type valves: A comprehensive data set from a numerical study. **International Journal of Refrigeration**, Elsevier, v. 103, p. 287–300, jul. 2019. ISSN 0140-7007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.04.017>.
- MARIANI, Viviana C.; PRATA, Alvaro T.; DESCHAMPS, Cesar 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 I& Fluids**, Elsevier, v. 39, n. 9, p. 1672–1684, out. 2010. ISSN 0045-7930. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.06.003>.
- PARK, Jeong D. et al. Determination of Effective Flow and Force Areas for Reed Type Compressor Valve Systems: Part 1—Model Derivation Using CFD Analysis Results. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 7, mar. 2023. ISSN 0894-1777. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16072951>.
- RIGOLA, J. et al. Numerical analysis of the turbulent fluid flow through valves. Geometrical aspects influence at different positions. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 90, set. 2015. DOI: [10.1088/1757-899X/90/1/012026](https://doi.org/10.1088/1757-899X/90/1/012026).