



# Simulação do escoamento a baixo número de Reynolds em um difusor radial modificado

## Flow simulation in modified radial diffuser for a low Reynolds number

Gustavo Henrique Cavalini<sup>1</sup>, Adailton Silva Borges<sup>2</sup>, Adriano Silva Borges<sup>3</sup>,  
Ricardo Lopes Ferreira<sup>4</sup>

### RESUMO

O modelo físico do difusor radial é frequentemente aplicado para simular o escoamento em válvulas de compressores alternativos, visto que a simulação do escoamento transiente incluindo todos os fenômenos físicos intrínsecos do problema é muito complexo, demandando alto recursos e tempo computacional. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo numérico utilizando um difusor radial modificado para avaliar o comportamento de dois parâmetros globais do escoamento bastante úteis como dados de entrada para simulações do sistema de compressão completo. O modelo numérico resolveu o escoamento permanente, turbulento e incompressível utilizando a técnica dos volumes finitos implementada no software de código aberto OpenFOAM®. As simulações foram realizadas com afastamento adimensional variando de 0,2 a 0,6, com ângulo de modificação do difusor igual a 68° e a um baixo número de Reynolds para o escoamento, igual a 3000.

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

### ABSTRACT

The physical model of the radial diffuser is often applied to simulate the flow in reciprocating compressor valves, because the simulation of the transient flow including all the problem physical phenomena is very complex and demands high resources and computational time. In this work, a numerical model was developed using a modified radial diffuser to evaluate the behavior of two global flow parameters that are very useful as input data for simulations of the complete compression system. The numerical model solved the steady, turbulent and incompressible flow using the finite volume technique implemented in the open source software OpenFOAM®. The simulations were carried out with dimensionless displacement varying from 0.2 up to 0.6, with a diffuser modification angle equal to 68°, and at a low Reynolds number for the flow, equal to 3000.

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

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: [gcavalini@alunos.utfpr.edu.br](mailto:gcavalini@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: 2852859888957055 .

<sup>2</sup> Docente no Curso de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: [adailton@utfpr.edu.br](mailto:adailton@utfpr.edu.br). ID Lattes: 1976568434573411 .

<sup>3</sup> Docente no Curso de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: [adrianoborges@utfpr.edu.br](mailto:adrianoborges@utfpr.edu.br). ID Lattes: 2015647660010183 .

<sup>4</sup> Docente no Curso de Engenharia Mecânica/Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: [ricardoferreira@utfpr.edu.br](mailto:ricardoferreira@utfpr.edu.br). ID Lattes: 3138126883628773 .



## INTRODUÇÃO

Um dos componentes amplamente utilizados na engenharia são os compressores, presentes, por exemplo, em sistemas de refrigeração. A procura da eficiência energética em equipamentos no geral é um tema altamente relevante atualmente, visando a economia de energia devido a questões financeiras e ambientais. Por meio da ferramenta computacional, é possível realizar simulações com inúmeras modificações de projeto, onde reduz a necessidade do desenvolvimento de protótipos, reduzindo o custo do total do projeto.

A compreensão dos mecanismos do escoamento através das válvulas que controlam a entrada e saída do fluido refrigerante é determinante para poder aumentar o desempenho dos compressores (FERREIRA, 2020). A ferramenta computacional é essencial para esta tarefa. Entretanto, a simulação transiente e simultânea de todos os fenômenos físicos que envolve a dinâmica da válvula é muito custosa do ponto de vista computacional, envolvendo grandes desafios para validação do modelo numérico.

Como alternativa, uma simplificação é adotar um modelo físico que representa o sistema de válvulas (difusor radial) e executar simulações para várias aberturas das mesmas. Esse método é denominado de quase-estático. Assim, com o conjunto destes dados de simulações, pode-se calcular os parâmetros globais do escoamento (área efetiva de força e coeficiente de descarga) para várias aberturas da válvula, de modo que esses parâmetros sejam dados de entrada para simulações do compressor para assegurar a força e a vazão que ocorre nas válvulas, respectivamente.

O modelo do difusor radial tem sido bastante empregado para simular o escoamento em válvulas de compressores. Ferreira e Gasche (2019) calcularam e avaliaram o comportamento dos parâmetros globais para diversas condições de operação de um compressor utilizando um difusor radial padrão (sem modificações). Recentemente, também usando um difusor padrão, Park et al. (2023) investigou numericamente as áreas efetivas de força e de escoamento em função da diferença de pressão e dimensões da válvula.

Por outro lado, trabalhos envolvendo estudos do escoamento em difusores modificados são bem menores. Por exemplo, Mariani, Prata e Deschamps (2010) analisaram 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. Além disso, avaliaram o comportamento dos parâmetros globais das áreas efetivas de força e 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. Portanto, existe uma lacuna a ser preenchida no estudo dos difusores radiais modificados: ainda não foram estudadas tantas configurações de geometria e de escoamento, tendo em vista a ampla faixa de valores para as condições de operação dos compressores alternativos.

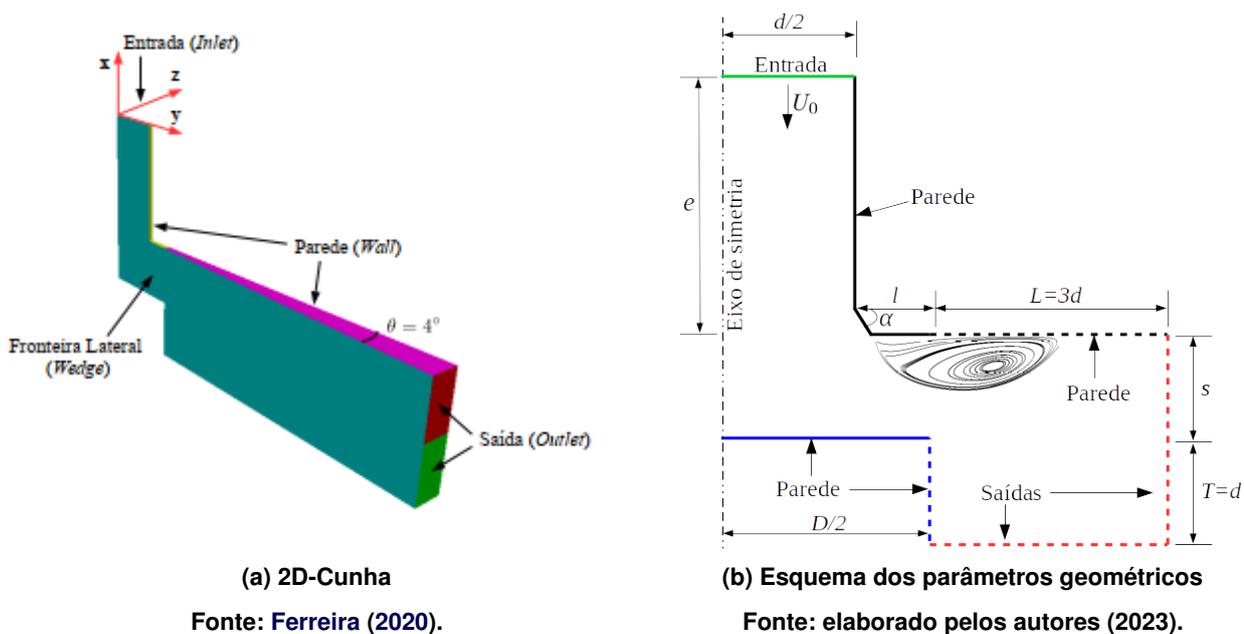
O objetivo principal deste trabalho é avaliar os parâmetros globais do escoamento para um número de Reynolds igual a 3000, utilizando um modelo quase-estacionário do difusor radial modificado (com um chanfro de 68°), variando os afastamentos adimensionais da válvula de 0,2 até 0,6.

## METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

Para a realização da simulação foi empregado o Método de Volumes Finitos implementado no software de código aberto e licença gratuita OpenFOAM®. O domínio computacional é bidimensional em formato de cunha (Figura 1a) com um ângulo de 4°, tornando o modelo mais econômico em recurso e tempo computacional. Este tipo de escoamento tem sido frequentemente modelado utilizando simetria de eixos, de modo que o resultado se estende para toda a circunferência da concepção do modelo físico real (FERREIRA, 2020).

Conforme mostra a Figura 1, o escoamento entra no domínio mediante uma imposição de um perfil uniforme de velocidade ( $U_0 = 1,292$  m/s). Condições de contornos de não deslizamento são aplicadas nas paredes de simetria no eixo e de derivada nula nas regiões de saída. O domínio computacional foi prolongado a fim de garantir a consistência física da condição de contorno imposta nas regiões de saída do domínio.

Figura 1 – Domínio computacional e parâmetros geométricos



(a) 2D-Cunha

Fonte: Ferreira (2020).

(b) Esquema dos parâmetros geométricos

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

O escoamento investigado neste trabalho foi simulado em regime permanente e possui característica incompressível. As equações que regem o escoamento para fluidos incompressíveis e Newtonianos são as equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento linear, descritas por Moukalled, Mangani e Darwish (2016):

$$\nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) - \nabla \cdot \left[ \nu_{\text{ef}} \left( \nabla \bar{\mathbf{u}} + \nabla \bar{\mathbf{u}}^T \right) \right] = -\frac{1}{\rho} \nabla \left( \bar{p} + \frac{2}{3} \rho \kappa \right), \quad (2)$$

onde  $\bar{\mathbf{u}}$  é o vetor de velocidade média (em relação ao tempo) do escoamento,  $\bar{p}$  é a pressão média do fluido,  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $\nu_{\text{ef}}$  é a viscosidade cinemática efetiva do fluido (soma



da viscosidade cinemática molecular,  $\nu$ , com a viscosidade turbulenta,  $\nu_t$ ) e  $\kappa$  é a energia cinética turbulenta, definida como:

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{u}'}, \quad (3)$$

onde  $\overline{\mathbf{u}'}$  é a parte flutuante do vetor velocidade ( $\mathbf{u} = \overline{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$ ) submetido à decomposição de Reynolds.

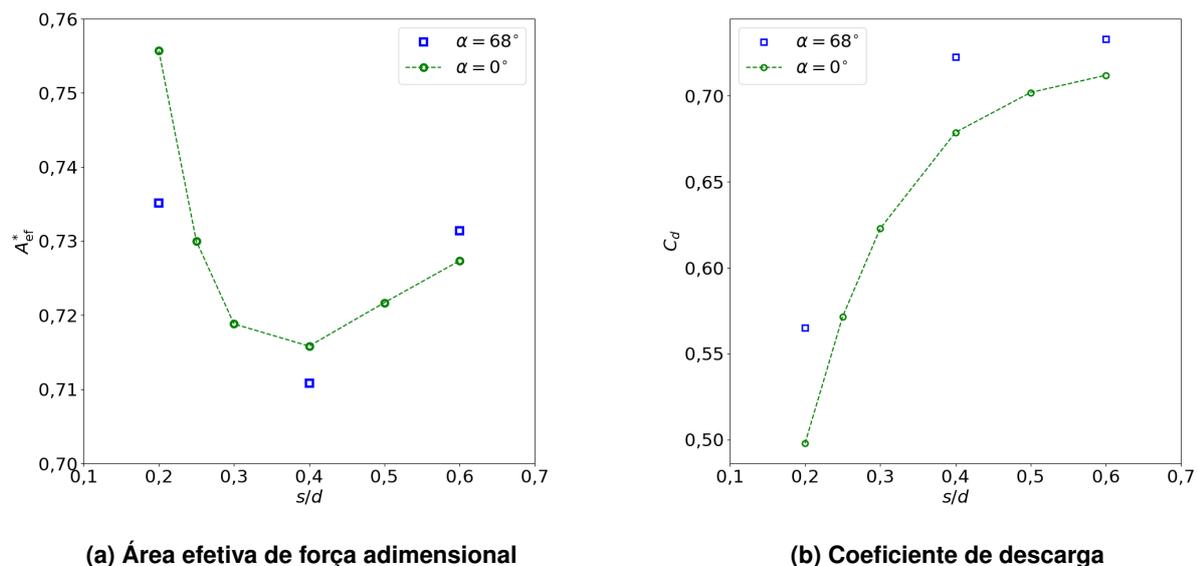
Para o cálculo da viscosidade turbulenta e da energia cinética turbulenta é necessário empregar modelos de turbulência. De acordo com Ferreira (2020), após a análise dos melhores modelos de turbulência a serem usados em simulações de difusores radiais, o modelo que melhor se adequa para o caso deste estudo é o modelo  $\text{RNG}\kappa - \epsilon$ , por ser um tipo de modelo indicado para escoamentos com gradientes adversos de pressão.

As equações discretizadas pelo método dos volumes finitos são solucionadas por um algoritmo de pressão-velocidade denominado SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) consistente (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). Demais detalhes para solução do problema, tais como esquemas de interpolação utilizados e métodos para solução do sistema linear são encontrados no trabalho de Ferreira (2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2a e 2b 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 2 – Parâmetros globais do escoamento para os casos analisados



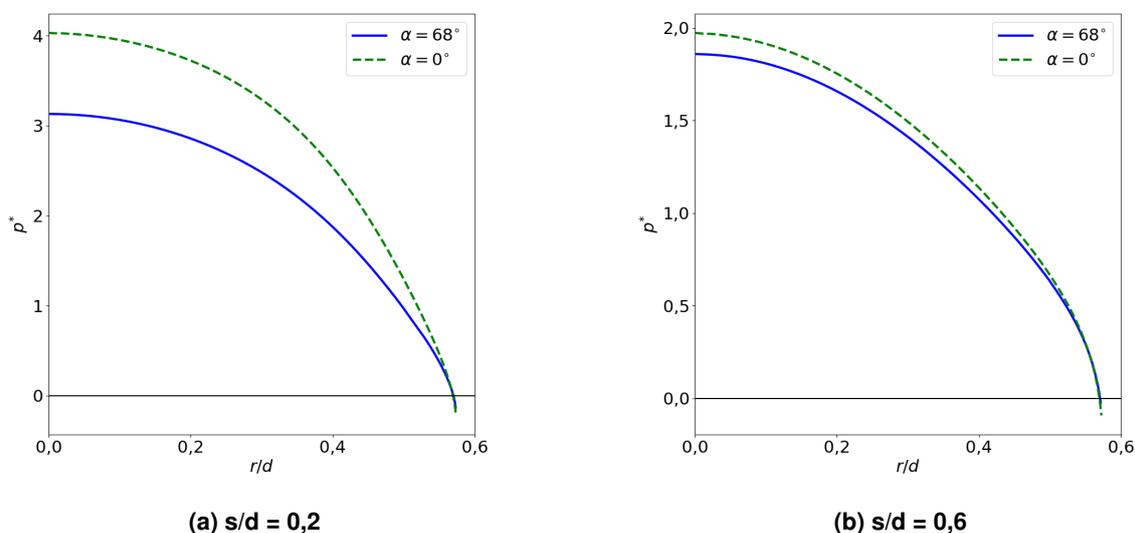
Fonte: elaborado pelos autores (2023).



Na Figura 2a nota-se que o valor da área efetiva calculada é menor para o difusor com modificação, exceto para último afastamento ( $s/d = 0,6$ ) em que este superou o valor correspondente ao escoamento no difusor sem modificações. Neste último caso, os valores da força atuante no disco frontal são muito próximos para os dois casos, como pode ser observado quando se compara as Figuras 3a e 3b mostrando a distribuição de pressão na superfície do disco frontal para os casos  $s/d = 0,2$  e  $s/d = 0,6$ , respectivamente. Desse modo, como as forças são próximas, a menor queda de pressão no difusor modificado tornou-se o valor da área efetiva de força maior para o último afastamento, lembrando que a área efetiva de força é a relação entre a força e a pressão no centro do disco frontal.

Por outro lado, os valores do coeficiente de descarga (Figura 2b) são maiores para todos os casos simulados quando comparado com aqueles calculados por Ferreira (2020) usando o difusor sem modificações. Conforme esperado, o comportamento do coeficiente de descarga para maiores valores de espaçamento entre os discos é não linear, tendendo para uma assintótica. Este comportamento assintótico para maiores afastamentos é justificado pela diminuição dos efeitos viscosos do escoamento, conforme o disco frontal se afasta do disco anterior, tendendo a uma condição idealizada de escoamento invíscido na região do difusor radial.

Figura 3 – Distribuição de pressão na superfície do disco frontal



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

## CONCLUSÃO

O modelo numérico construído permite avaliar o comportamento da área efetiva de força e do coeficiente de descarga do escoamento em difusores com modificações em forma de chanfro para vários ângulos. Estes parâmetros são importantes na simulação do compressor, no projeto ou na otimização do equipamento. Os resultados analisados, aplicados para válvulas de compressores alternativos, apontam para uma modificação que otimiza a válvula, por resultarem em coeficientes de



descarga maiores, propiciando vazões maiores do fluido refrigerante. Quanto a área efetiva de força, os resultados apontam para um mesmo comportamento quando simulado o escoamento para os dois tipos de difusores. Entretanto, para tirar conclusões precisas é necessário simular mais casos com afastamentos menores e maiores do que foi apresentado no trabalho.

## 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 & 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>.

MOUKALLED, F; MANGANI, L; DARWISH, M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. **Switzerland: Springer International Publishing**, 2016.

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).