



Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico. ISSN: 2446-6778
Nº 5, volume 5, artigo nº 88, Julho/Dezembro 2019
D.O.I: <http://dx.doi.org/10.20951/2446-6778/v5n5a88>
Edição Especial

ESTUDO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO DE AR NA CÂMARA DE TESTES DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO UTILIZANDO CFD

Victor Barbosa Souza²
Doutor em Engenharia Mecânica

George Guimaraes Dias Siqueira¹
Engenheiro Mecânico

Daniel Passos Galo¹
Engenheiro Mecânico

Amanda Camerini Lima²
Doutor em Engenharia e Ciências dos Materiais

¹ Centro Universitário Redentor, Eng. Mecânica, Itaperuna – RJ, georgeguimarae@hotmail.com

¹ Centro Universitário Redentor, Eng. Mecânica, Itaperuna – RJ, danielpassos@yahoo.com

² Centro Universitário Redentor, Eng. Mecânica, Itaperuna – RJ, prof.victorbsouza@gmail.com

² Centro Universitário Redentor, Eng. Mecânica, Itaperuna – RJ, amandacamerini@gmail.com

RESUMO

A Mecânica dos Fluidos é a área da ciência destinada ao estudo do comportamento de fluidos na natureza, seja em repouso ou em movimento. Utiliza-se de equações consagradas por famosos cientistas e engenheiros que buscam compreender e estudar seus fenômenos desde a Antiguidade, visando usufruir e trazer benefícios para a humanidade. Porém, devido à complexidade dos fenômenos analisados, a abordagem analítica clássica, por meio de equações, é muitas vezes restrita à determinadas condições, se tornando incapaz de fornecer resultados precisos em grande parte dos casos estudados. Outra abordagem, como a experimental, permite aos cientistas obter resultados satisfatórios e próximos com a realidade, mas com elevados custos e tempo de projeto. Assim, com o advento da computação nas últimas décadas, desenvolveu-se uma nova técnica para resolução de problemas de fluidodinâmica utilizando métodos numéricos: a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, da sigla em inglês). A CFD é uma poderosa ferramenta de simulação computacional que fornece aos engenheiros e cientistas resultados confiáveis e realísticos com os fenômenos estudados e tem sido amplamente utilizada em um vasto campo de aplicações. Esse trabalho visa a realização de uma simulação computacional, utilizando CFD, do escoamento de ar ao redor de dois blocos de madeira no interior da câmara de testes de um túnel de vento construído no laboratório da UniRedentor, em Itaperuna (RJ), simulando o escoamento ao redor de dois edifícios. Para tanto, foi utilizado o software de código-aberto *OpenFoam*, que é um software voltado para simulações de escoamento de fluidos, transferência de calor, mecânica dos sólidos, entre outros. Outras ferramentas utilizadas foram os softwares *gmsk*, responsável por construir o modelo CAD e elaborar a malha computacional e o *gnuplot*, utilizado para análise e monitoramento do erro residual. Além disso, a visualização dos campos de velocidade e pressão foi proporcionada pelo *paraView*. As condições de contorno empregadas na análise numérica foram obtidas através do Trabalho de Conclusão de Curso dos estudantes que construíram o túnel de vento e a validação da simulação teve como base um trabalho acadêmico sobre o escoamento de ar ao redor de um cilindro também imerso em um túnel de vento. Com os resultados obtidos foi possível observar os fenômenos físicos envolvidos, como a formação de vórtices e a região de separação do escoamento, além de concluir que não se torna viável realizar a instrumentação do túnel devido à sua limitação na visualização do escoamento em seu interior, o que dificulta a sua utilização para fins acadêmicos

Palavras – chave: Mecânica dos Fluidos. Métodos numéricos. CFD. OpenFoam. Túnel de vento.

ABSTRACT

Fluid Mechanics is an area of science that is designed to study the behavior of fluids in nature, whether in motion or not in motion. Use of equations consecrated by famous scientists and engineers who seek and study their phenomena from Antiquity, using the best practices for humanity. However, due to the difference in processing patterns, a classical analytical analysis, through equations, is extremely restricted to some conditions, making it unable to present accurate results in most of the cases studied. Another approach, such as

the experimental one, allows scientists to obtain satisfactory and upcoming results with reality, but with high costs and design time. Thus, with the advent of computation in the last decades, a new technique was developed to solve problems of fluid dynamics using numerical methods: Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD is a powerful computational simulation tool that provides engineers and scientists with reliable and realistic results with the studied phenomena and has been widely used in a wide range of applications. This work aims to perform a computational simulation using CFD of the air flow around two blocks of wood inside the test chamber of a wind tunnel built in the laboratory of UniRedentor in Itaperuna (RJ). For this purpose, *OpenFoam* open-source software was used, which is a software for simulations of fluid flow, heat transfer, solids mechanics, among others. Other tools used were the softwares *gmsk*, responsible for constructing the CAD model and elaborating the computational mesh and the *gnuplot*, used for analysis and monitoring of residual error. In addition, the visualization of velocity and pressure fields was provided by *paraView*. The contour conditions employed in the numerical analysis were obtained through the Course Completion Work of the students who built the wind tunnel and the validation of the simulation was based on an academic work on the air flow around a cylinder also immersed in a wind tunnel. With the results obtained, it was possible to observe the physical phenomena involved, such as the formation of vortices and the region of separation of the flow, besides concluding that it is not feasible to perform the tunnel instrumentation due to its limitation in the visualization of the flow inside, which hinders its use for academic purposes

Key - words: Fluid Mechanics. Numerical methods. CFD. OpenFoam. Wind tunnel.

1 INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos pode ser observado em praticamente toda a natureza, desde no ar, na água, em correntes marítimas e até na circulação sanguínea do corpo humano. O comportamento dos fluidos em repouso, ou em movimento vem sendo estudado largamente por cientistas desde épocas remotas, contribuindo para inovações em sistemas de abastecimento de fluidos, meios de transporte, como deslocamento de aeronaves, navios e veículos de corrida, estudos de condições climáticas, entre outros.

Entretanto, o estudo de fenômenos relacionados à Mecânica dos Fluidos pode se tornar bastante complexo, de forma que abordagens analíticas e suas equações sejam incapazes de proporcionar resultados realísticos e seguros. Assim, engenheiros e cientistas buscam em métodos experimentais, como testes em túneis de vento, um melhor entendimento desses fenômenos. Apesar de proporcionar resultados muito próximos e condizentes com a realidade, os métodos experimentais apresentam grandes desvantagens, como elevados custos operacionais e maiores prazos para se obter os resultados.

Assim, com o desenvolvimento e rápido avanço da tecnologia computacional, foi possível obter uma nova alternativa para análise de escoamento de fluidos, por meio da

simulação numérica. Essa abordagem, que ficou conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*), complementa tanto os métodos analíticos, como os experimentais, fornecendo resultados confiáveis e de entendimento adequado dos eventos físicos envolvidos. Embora ainda seja uma área relativamente recente, a CFD vem se expandindo e se desenvolvendo rapidamente, sendo uma ferramenta poderosa de simulação computacional utilizada por engenheiros, pesquisadores e cientistas em experimentos e estudos que abrangem desde as engenharias, até a medicina e a meteorologia.

Esse trabalho apresenta os resultados de um estudo computacional do escoamento de ar na câmara de testes do túnel de vento didático do laboratório de metalografia da UniRedentor, por meio da CFD. Os fenômenos físicos foram observados e descritos com base na literatura, além disso, comparou-se as linhas de corrente dos resultados experimental e numérico, utilizando como validação da simulação numérica um trabalho acadêmico sobre o escoamento de ar ao redor de um cilindro imerso também em um túnel de vento subsônico.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO E MODELOS DE TURBULÊNCIA

Problemas que abrangem dinâmica de fluidos geralmente envolvem três equações principais de conservação: massa, quantidade de movimento e energia.

2.1.1 Conservação da Massa

Na Mecânica dos Fluidos, a equação da conservação da massa também é conhecida como equação da continuidade e, sua forma diferencial em coordenadas cartesianas para fluido incompressível é dada na Eq. 1 (Fox et al, 2012):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

u, v, w = componentes cartesianas da velocidade (m/s);

x, y, z = coordenadas cartesianas (m).

2.1.2 Conservação da Quantidade de Movimento

O princípio da conservação da quantidade de movimento linear se baseia na Segunda Lei de Newton, em que a aceleração sofrida por um corpo é proporcional à intensidade da força aplicada sobre ele e inversamente proporcional à sua massa. Na Mecânica dos Fluidos, a conservação da quantidade de movimento é conhecida como as equações de Navier-Stokes, que são equações de transporte utilizadas no escoamento de fluidos Newtonianos, incompressíveis e, sem a influência da gravidade, são dadas em coordenadas cartesianas pela Eq. 2 (Fox et al, 2012):

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

ρ = massa específica (Kg/m³);

t = tempo(s);

p = Pressão (Pa);

μ = viscosidade dinâmica (Kg/m.s).

Assim, forma-se um sistema com quatro equações e quatro incógnitas (u, v, w, p), que são reescritas através de notação vetorial, como cita Ribeiro (2009). Portanto, a equação da conservação da massa (Eq. 1) e a equação da conservação da quantidade de movimento (Eq. 2) assumem, respectivamente, as seguintes formas mostradas nas equações 3 e 4: (RIBEIRO, 2009, *apud* ANDERSON, 1995):

$$\nabla \cdot U = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

U = vetor com as componentes de velocidade u, v, w (m/s)

2.2 MODELOS DE TURBULÊNCIA

Os métodos de cálculo de escoamentos turbulentos se dividem em três grupos, de acordo com autores como Versteeg & Malalasekera (2007), que são o DNS, LES e RANS, onde este último foi explorado durante a execução deste estudo.

2.2.1 Equações de médias de Reynolds Navier-Stokes (RANS)

O método RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) é um método mais simples e econômico de resolver escoamentos turbulentos, realizando uma aproximação através da modelagem das escalas de turbulência, permitindo grande redução de esforço computacional (RIBEIRO, 2009). Dahl (2015) afirma que o RANS “apresenta como foco principal o escoamento médio e os efeitos de turbulência nas propriedades médias, visto que as variáveis envolvidas nas equações são definidas por uma componente média e uma componente flutuante”.

Para Dahl (2015), na maior parte dos problemas de engenharia, os modelos RANS são os mais indicados porque não é necessário solucionar detalhadamente os fenômenos de turbulência, apenas obter informações sobre as propriedades médias no tempo de escoamento.

De acordo com Çengel & Cimbala (2015), vários modelos de turbulência se baseiam nas equações RANS, entre eles, os modelos de turbulência de duas equações, pois adicionam duas equações de transporte que devem ser solucionadas simultaneamente com as equações de conservação. Esses modelos são o $k-\epsilon$ e suas variantes (RNG e Realizable) e o $k-\omega$ e suas variantes (Standard e SST). Juntamente com as duas equações adicionais, devem ser especificadas duas novas condições de contorno na entrada e saída do domínio computacional para as propriedades de turbulência. (ÇENGEL & CIMBALA, 2015)

2.2.2 Modelo $k-\omega$ SST

O presente trabalho utiliza o modelo $k-\omega$ SST (no inglês, *Shear Stress Transport*), uma das variantes do $k-\omega$. Esse modelo utiliza uma função de mistura entre os modelos $k-\epsilon$, utilizado em regiões de escoamento livre, e $k-\omega$, utilizado em regiões próximas às paredes. Também utiliza duas equações adicionais, de acordo com a hipótese de Boussinesq da viscosidade turbulenta (μ_t) (Eq. 5) (VASCONCELLOS *et al*, 2014). Esses recursos fazem o $k-\omega$ SST mais preciso e confiável para uma classe mais ampla de fluxos (por exemplo,

fluxos de gradiente de pressão adversos, aerofólios, transônicos, ondas de choque) do que o padrão k- ω . (RIBEIRO, 2009)

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$$

As equações adicionais do modelo k- ω SST devem ser solucionadas simultaneamente com as equações de conservação. As equações da energia cinética turbulenta (k) e da frequência de dissipação da energia cinética turbulenta (ω) são apresentadas por Versteeg e Malalasekera (2007), Eq. 6 e Eq. 7, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho k \vec{V}) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad \text{Eq. 6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho \omega \vec{V}) = & \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,t}} \right) \Delta(\omega) \right] + \quad \text{Eq 7} \\ & + \gamma_2 \left(2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \right) k \rho \omega \frac{\partial V}{\partial X_j} - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \end{aligned}$$

Onde, as constantes desse modelo são: $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_{\omega,1} = 2,0$; $\sigma_{\omega,2} = 1,17$; $\gamma_2 = 0,44$; $\beta_2 = 0,083$; $\beta^* = 0,09$ e μ é a viscosidade do fluido.

2.3 MODELAGEM EM CAD DO TÚNEL DE VENTO DA UNIRENTOR

O túnel de vento da UniRedentor foi construído de madeira tipo compensado, devido ao seu baixo custo e facilidade em obtê-lo, apresentando simplicidade na construção. A figura 1 apresenta o túnel de vento montado no laboratório de metalografia da UniRedentor e a suas dimensões são apresentadas na tabela 1. (ROCHA & SOARES, 2013)



Figura 1 - Túnel de vento montado

Fonte: Rocha & Soares, 2013

Tabela 1 - Dimensões do túnel de vento

Componentes	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Bocal	650	600	750
Câmara de teste	300	250	500
Câmara de estabilização	650	600	300
Difusor	400	400	700
Comprimento Total	2250 mm		

De acordo com as características do ar no laboratório de metrologia da UniRedentor, foram adotados temperatura de 25° C, massa específica (ρ) de 1,19 Kg/m³, viscosidade dinâmica (μ) de 1,84⁻⁵ N.s/m². A velocidade do escoamento de ar projetada na entrada da câmara de testes é de 12 m/s e sua área de seção transversal é de 75000 mm², proporcionando um diâmetro hidráulico (D_h) de 272,7 mm. (ROCHA & SOARES, 2013)

Na análise numérica do escoamento no túnel, foi realizado apenas o estudo na câmara de testes, para simplificar a análise e pelo fato de já ter sido fornecida a velocidade de entrada nessa região (12 m/s), onde a câmara foi modelada através do software *gms*.

Foram modelados também dois blocos de madeira simulando o escoamento ao redor de dois prédios de diferentes tamanhos, como pode-se observar pela figura 2. O bloco menor possui altura de 80 mm e o maior possui altura de 240 mm, separados por uma distância de 96 mm.

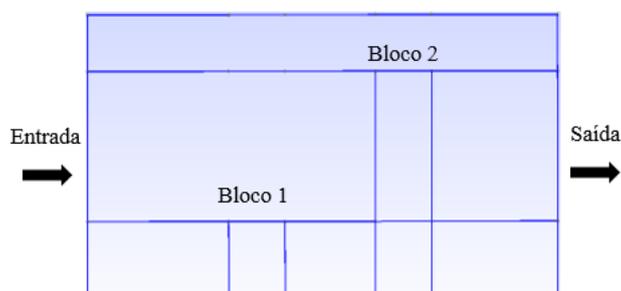


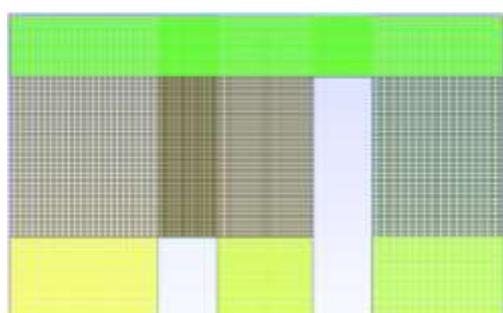
Figura 2 - Modelagem de dois blocos, de diferentes tamanhos, na câmara de testes reproduzindo o escoamento ao redor de dois edifícios

Em relação às fronteiras do domínio computacional, elas foram determinadas no *gms*, através da função “physical Surface”, em que foram definidas quatro fronteiras: *inlet*, *outlet*, *fixedwalls* e *frontAndback*, correspondendo, respectivamente à entrada, saída, paredes fixas e as regiões que se encontram atrás e a frente do domínio.

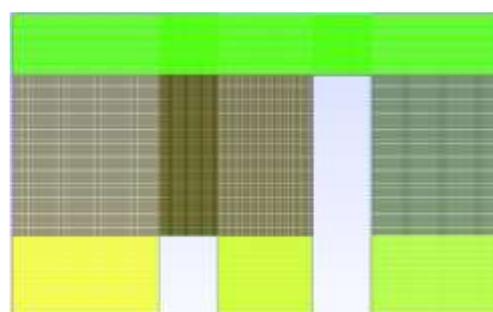
2.4 CONSTRUÇÃO DA MALHA

A malha empregada foi hexaédrica estruturada em todo o domínio, com maior refinamento ao redor das paredes da câmara para fornecer resultados mais exatos nessas regiões críticas e na região superior dos blocos, devido à camada limite.

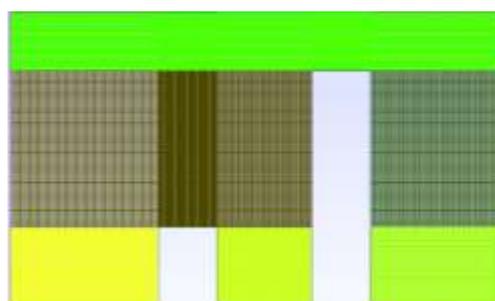
Foram construídas três malhas computacionais para o estudo do escoamento ao redor dos edifícios. A figura 3a apresenta a malha 1, com 28812 elementos hexaédricos, a figura 3b mostra a malha 2, com 57132 elementos e, a malha 3, é a apresentada pela figura 3c, contendo 95052 elementos hexaédricos.



(a) - Malha 1



(b) - Malha 2



(c) - Malha 3

Figura 3 - Refinamento da malha para o escoamento ao redor de dois edifícios

2.5 PROCESSAMENTO NO OPENFOAM

A malha foi exportada para o OpenFOAM por meio da função “*gmshToFoam*”, que permite com que arquivos gerados pelo *gmsh* possam ser codificados e “lidos” pelo OpenFoam, que utiliza linguagem C++.

O OpenFoam é dividido em pastas chamadas diretórios, onde se encontram seus arquivos como os *solvers*. Eles são divididos de acordo com sua função e características

como, por exemplo, para problemas envolvendo escoamento incompressível, compressível, fluido newtoniano e não-newtoniano, problemas de transferência de calor, combustão, eletromagnético, entre outros.

De acordo com as características físicas do problema apresentado pelo presente trabalho, como escoamento em regime permanente, turbulento, subsônico e com fluido incompressível (que $Mach = 0,3$), optou-se por um *solver* que fosse mais indicado para esse caso, apresentando características semelhantes para essas condições. Assim, utilizou-se o *simpleFoam*.

A etapa de pós-processamento foi realizada através do *paraView*, que pode ser acessado a partir do terminal do Ubuntu utilizando a função *paraFoam*. O *paraView* forneceu os resultados das propriedades analisadas, como os campos de velocidade, pressão, as variáveis de turbulência “k” e “ ω ”, e as linhas de corrente do escoamento. Em seguida, foi utilizado o software “*gnuplot*” para monitorar os resíduos.

2.6 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Para esse estudo, a validação foi executada com base em um trabalho sobre o escoamento ao redor de um cilindro em um túnel de vento, realizado por Vasconcellos *et al* (2014), onde as mesmas condições de contorno e o mesmo modelo de turbulência foram utilizados. O processamento e o pós-processamento também foram realizados pelo OpenFOAM e pelo *paraView*, respectivamente.

Na etapa de pré-processamento, foi realizada, também pelo *gmsk*, a modelagem do domínio computacional, que incluiu a câmara de teste do túnel de vento e o cilindro. As dimensões utilizadas na modelagem e fornecidas por Vasconcellos *et al* (2014), foram: 940 mm de comprimento por 200 mm de altura e 200 mm de largura, cujos valores representam as dimensões da câmara de testes desse túnel de vento e, um círculo de 30 mm de diâmetro, de acordo com as dimensões do cilindro, conforme mostra a figura 4. (VASCONCELLOS *et al*, 2014)



Figura 4 - Sessão de teste do túnel de vento com cilindro vazado inserido no centro

As fronteiras estabelecidas para o domínio computacional receberam a mesma denominação das fronteiras do estudo realizado na câmara de testes do túnel da UniRedentor (*inlet*, *outlet*, *fixedwalls* e *frontAndback*), assim como valor para a pressão. A magnitude da velocidade de entrada foi fornecido por Vasconcellos *et al*, (2014). A figura 5 mostra o domínio e a geometria do cilindro e a figura 6 mostra a reprodução do mesmo, com o apoio do software *gms*.

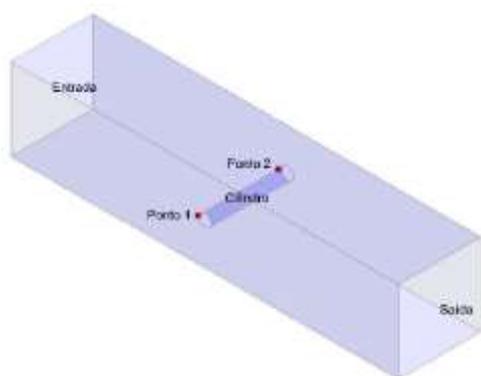


Figura 5 – Estudo esquemático do escoamento ao redor de um cilindro em um túnel de vento.

Fonte: Vasconcellos *et al*, (2014)

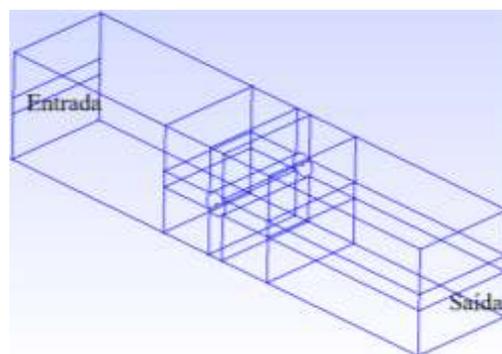
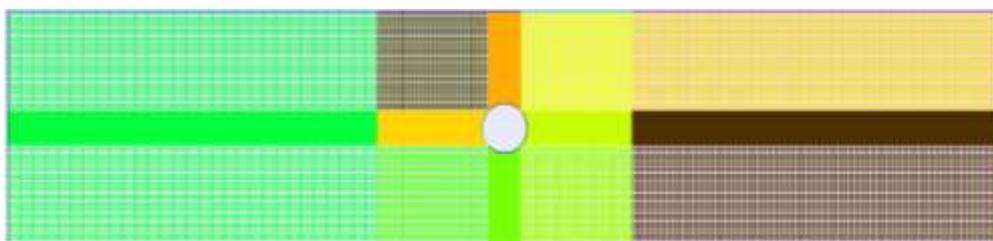
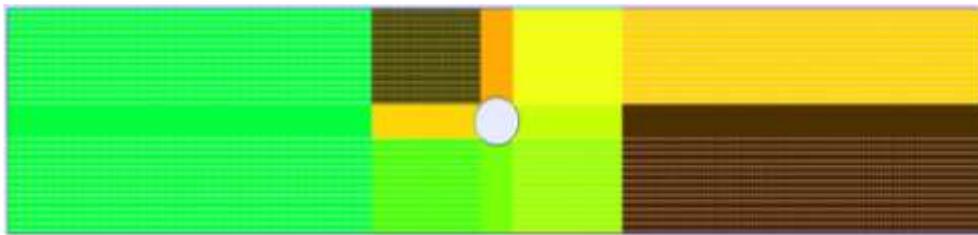


Figura 6 – Reprodução do modelo criado no gms

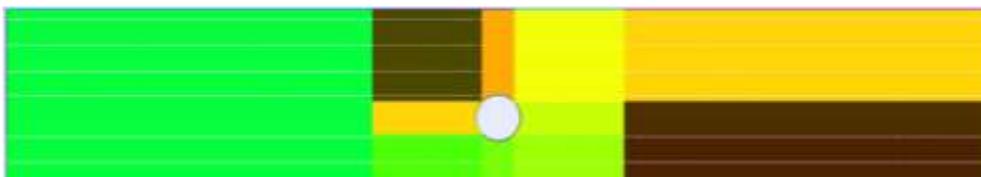
Assim como na discretização do túnel de vento da UniRedentor, a construção da malha foi executada com auxílio do *gms*, com grau acentuado de refinamento nas direções horizontal e vertical das paredes do cilindro. Essa metodologia foi imposta para alcançar resultados mais precisos a montante e a jusante do escoamento sobre o cilindro, devido à fenômenos como formação de vórtices e desprendimento da camada limite.

Foram construídas três malhas computacionais para o estudo em questão, com o objetivo de atingir a convergência e, conseqüentemente, resultados mais precisos e próximos aos obtidos por Vasconcellos *et al* (2014). A malha 1 é formada por 26774 elementos hexaédricos, conforme mostrado pela figura 7a, a malha 2 possui 69905 elementos, como apresenta a figura 7b e, a figura 7c mostra a malha 3, com 96464 elementos.





(b) - Malha 2



(c) - Malha 3

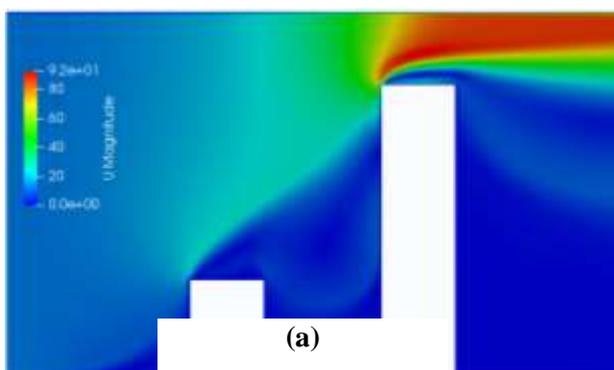
Figura 7 - Refinamento da malha para o escoamento ao redor de um cilindro

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

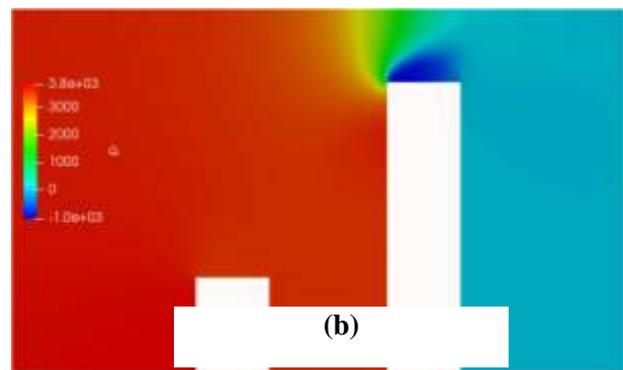
3.1 ESCOAMENTO AO REDOR DE DOIS BLOCOS

Utilizou-se o *simpleFoam*, com modelo de turbulência *k- ω SST*, no processamento da simulação e os resultados obtidos foram reproduzidos com o auxílio do *paraView*. Foram realizadas 5000 iterações para se atingir a convergência da simulação.

Seguindo as dimensões da câmara de testes e as condições de contorno, com velocidade projetada na entrada da câmara de 12 m/s, foram analisados os campos de velocidade e pressão para as três malhas construídas para esse domínio. As figuras 8, 9 e 10 apresentam os resultados fornecidos pelo *paraView*.



(a)



(b)

Figura 8 - Campos de velocidade e pressão da malha 1

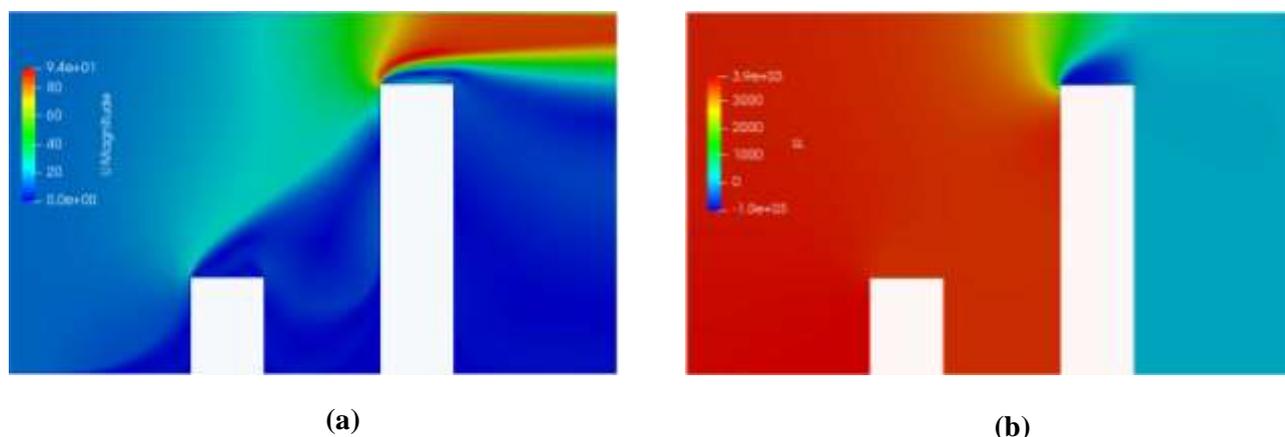


Figura 9 - Campos de velocidade e pressão da malha 2

Pela análise da figura 8, pode-se observar que o campo de velocidade (figura 8a) atingiu um valor máximo de 92 m/s no topo do bloco maior. Conclui-se que o resultado está em concordância com a equação da conservação da massa (Eq. 3), em que ocorre um aumento na velocidade com a diminuição da área da seção transversal. Observa-se também que, devido ao ângulo de ataque agudo no topo desse bloco, ocorre uma separação do escoamento do fluido com o bloco, formando uma região de baixa pressão conhecida como região de separação. A figura 8b mostra a magnitude máxima da pressão estática, na região de entrada da câmara, com valor de 38000 Pa. A pressão mínima ocorreu justamente onde o valor da velocidade foi máximo, no topo do bloco maior e, observa-se também uma pressão estática zero na saída do túnel, que representa a perda de pressão da câmara de testes do túnel, conforme determinado nas condições de contorno.

A figura 9a mostra a distribuição da velocidade no escoamento ao redor de dois blocos, simulando dois edifícios, em que o valor máximo desta foi de 94 m/s no topo do bloco maior, também em concordância com a equação da conservação da massa (Eq. 3). Assim como na figura 8, a região de separação ocorre no topo desse bloco, onde também acontece a formação da camada limite. A pressão estática máxima ocorreu na entrada da câmara (figura 9b), com magnitude de 39000 Pa, atingindo um valor mínimo de -1000 Pa no topo do bloco maior devido à região de separação, que proporciona esse gradiente de pressão, como já mencionado.

Através do estudo da figura 10, observa-se, assim como nas figuras 8a e 9a, a separação do escoamento de fluido com as paredes do bloco maior na região superior desse bloco,

onde também se forma a camada limite (figura 10a). Um gradiente de pressão também se forma na região de separação, no topo do bloco, conforme mostra a figura 10b. A velocidade máxima do escoamento ocorre entre a parte superior do bloco maior e a parede do teto da câmara de testes, devido à redução da área dessa seção transversal, atingindo 94 m/s e a pressão estática máxima atinge 39000 Pa na região de entrada da câmara (figura 10b). A tabela 3 apresenta os resultados para velocidade e pressão das malhas 1,2 e 3 do escoamento ao redor de dois blocos.

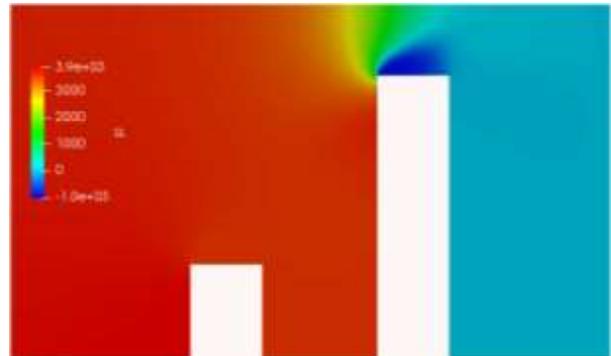
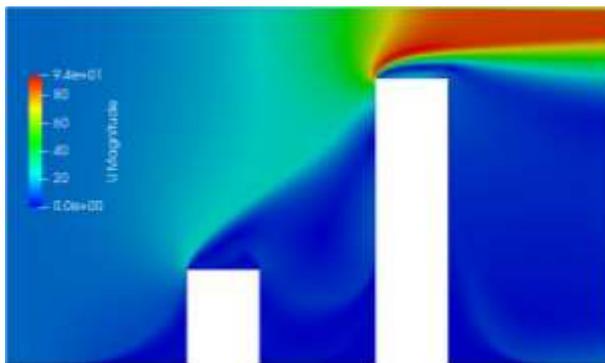


Tabela 2 - Resultados para os campos de velocidade e pressão da análise do escoamento ao redor de dois blocos.

Figura 10 - Campos de velocidade e pressão da malha 3

	Nº Elementos	Vel. Máxima (m/s)	Pressão Máxima (Pa)
Malha 1	28812	92	38000
Malha 2	57132	94	39000
Malha 3	95052	94	39000

Analisando as figuras 8, 9, 10 e a tabela 2, pode-se notar que os fenômenos da mecânica dos fluidos ocorreram de forma muito semelhante e os resultados obtidos para velocidade e pressão se mantiveram próximos, com uma variação de 2, 13% entre as malhas 1 e 2 para a velocidade e 2,56% para a pressão. Já as malhas 2 e 3 apresentaram os mesmos resultados para velocidade e pressão, indicando assim que foi alcançada a convergência de malha.

Em seguida, realizou-se a análise e acompanhamento do resíduo (diferença entre uma solução encontrada em uma dada iteração e a iteração anterior) das propriedades da simulação por meio do software *gnuplot*, como mostra a figura 11.

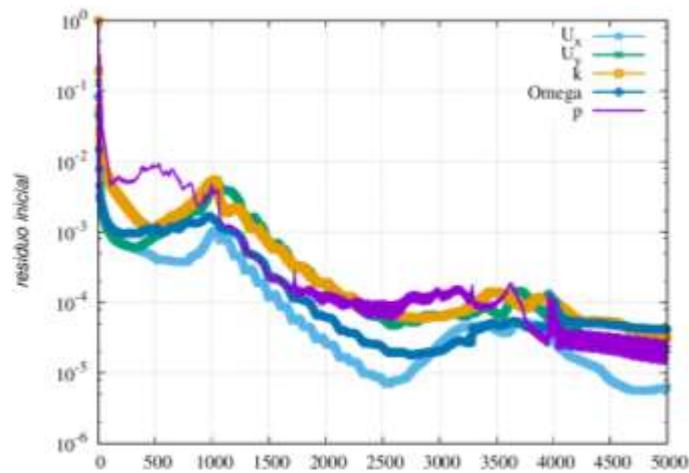


Figura 11 - Gráfico do resíduo da simulação do escoamento ao redor de dois blocos, em função do número de iterações

Fica evidente, pela figura 11, a dificuldade de convergência da simulação, em que ocorreu uma flutuação dos resíduos, principalmente nas últimas 1000 iterações. Apesar disso, a velocidade na direção x (U_x) apresentou resíduos abaixo da ordem de 10^{-5} e as outras propriedades, como a velocidade na direção y (U_y), energia cinética turbulenta (k), frequência de dissipação da energia cinética turbulenta (ω) e a pressão apresentaram resíduos da ordem de 10^{-4} , que são resultados satisfatórios.

Além disso, foi realizada uma análise qualitativa das linhas de corrente (mecanismos de visualização do escoamento) teórica, presentes na literatura, experimental, obtidas por Rocha & Soares (2013) e numérica, fornecidas pelo *paraView*, conforme mostra a figura 12.



a)

b)

c)

Figura 12 - Linhas de corrente do escoamento ao redor de dois blocos, fornecidas pela literatura (a), método experimental (b) e método numérico (c)

Fonte: Rocha & Soares (2013)

Verificando a figura 12a, conclui-se que, de acordo com a literatura, há formação de um pequeno vórtice a montante do menor edifício e um grande vórtice entre ambos. A figura 12b mostra, de forma não muito nítida, a formação do vórtice entre os blocos e, devido à limitação da imagem, não é possível visualizar o escoamento na região superior do bloco maior. Finalmente, a figura 12c, disponibilizado pelo *paraView*, deixa claro a formação de dois vórtices entre os edifícios, divergindo dos resultados apresentados pelas análises teórica e experimental.

3.2 ESCOAMENTO AO REDOR DE UM CILINDRO

Segundo as informações fornecidas por Vasconcellos *et al* (2014), foram realizadas simulações para rotações de 1800 rpm e 2500 rpm do ventilador utilizado no túnel, porém, a validação do presente trabalho baseou-se nos dados da simulação de 2500 rpm. Para as condições de contorno, foi estabelecida, com dados experimentais, uma vazão mássica na entrada da sessão de teste de 0,294 Kg/s, com pressão relativa de 0 Pa na saída e propriedades do ar determinadas com a hipótese de gás ideal para uma temperatura de 15° C e pressão de 101.325 Pa (VASCONCELLOS *et al*, 2014). Por meio da equação da continuidade (Eq. 3), foi possível determinar a velocidade de entrada do escoamento, que teve uma magnitude de 6 m/s. Além disso, considerou-se o escoamento em regime permanente.

Os autores ressaltam que a simulação foi realizada antes do início do fenômeno de desprendimento de vórtices. As figuras 12, 13 e 14 apresentam os resultados obtidos por Vasconcellos *et al*, (2014) para a distribuição da velocidade, pressão e linhas de corrente ao longo da seção de testes para a rotação de 2500 rpm. (VASCONCELLOS *et al*, 2014).

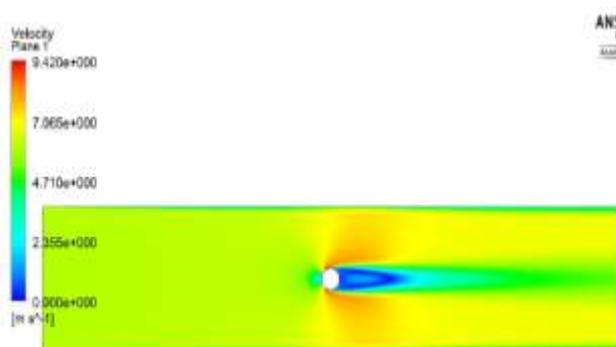


Figura 12 - Campo de velocidade do escoamento ao redor de um cilindro
Fonte: Vasconcellos *et al* (2014)

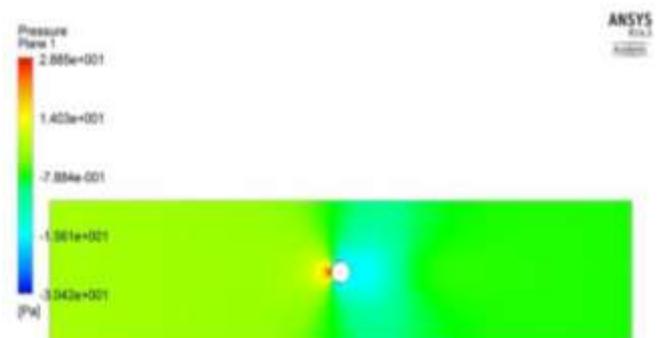


Figura 13 - Campo de pressão do escoamento ao redor de um cilindro
Fonte: Vasconcellos *et al* (2014)

A figura 12 mostra o aumento da velocidade do fluido na região de separação do escoamento, que ocorre próximo a um ângulo de 90° do cilindro, onde o escoamento atinge 9,42 m/s. Esse aumento de velocidade está atrelado à restrição da área da seção transversal da câmara, imposta pelo cilindro. (VASCONCELLOS *et al*, 2014)

É possível notar claramente através da figura 14, um gradiente de pressão entre as regiões a montante e jusante do cilindro, o que proporcionou a separação do escoamento. A pressão máxima ocorreu na parte frontal do cilindro, com um valor de 28,85 Pa. (VASCONCELLOS *et al*, 2014)

As linhas de corrente observadas na figura 14 estão no mesmo plano do escoamento mostrado nos campos de velocidade e pressão, evidenciando a formação de dois vórtices e a região de esteira a jusante do cilindro. (VASCONCELLOS *et al*, 2014)

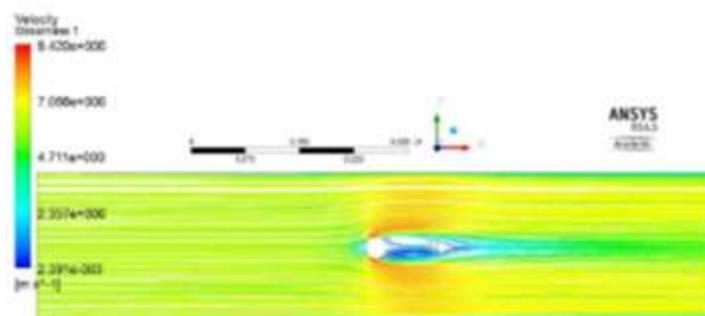
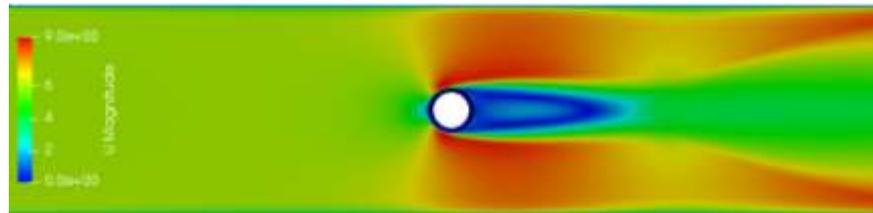


Figura 14 - Distribuição das linhas de corrente do escoamento ao redor de um cilindro

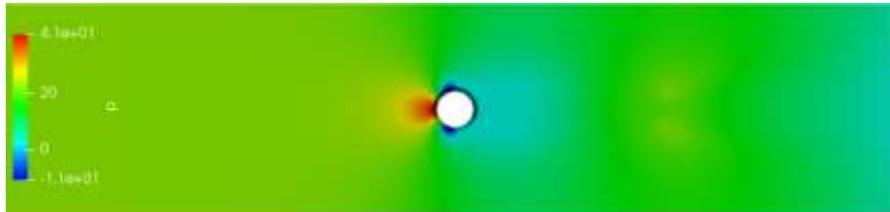
Fonte: Vasconcellos *et al* (2014)

A simulação numérica foi mais uma vez executada no OpenFOAM, utilizando o *simpleFoam* na resolução das equações, em um total de 5000 iterações, e o *paraView* como ferramenta de análise dos resultados obtidos na etapa de pós-processamento

As figuras 15, 16 e 17 apresentam os resultados fornecidos pelo *paraView* para os campos de velocidade e pressão das malhas 1, 2 e 3, respectivamente, do escoamento ao redor de um cilindro na seção de testes de um túnel de vento.



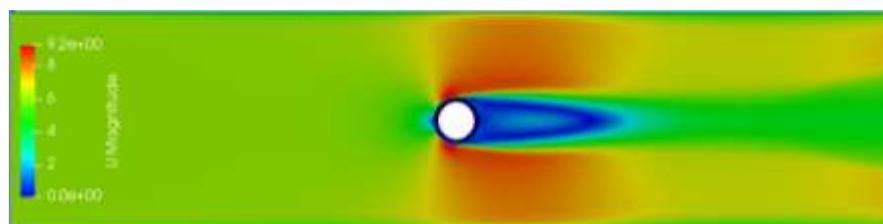
(a)



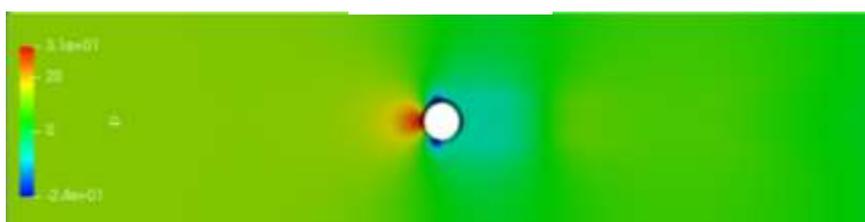
(b)

Figura 15 - Campos de velocidade e pressão para a malha 1 do escoamento ao redor de um cilindro

Observa-se nitidamente através da figura 15a a formação da região de esteira a jusante do cilindro e a separação do escoamento em um ângulo de aproximadamente 90° do cilindro, onde a velocidade atingiu seu valor máximo de 9 m/s. O campo de pressão (figura 15b) apresenta uma magnitude máxima de 41 Pa na região a montante do escoamento, até que este se encontre com o cilindro e, o menor valor da pressão ocorreu na separação do escoamento.



(a)



(b)

Figura 16 - Campos de velocidade e pressão para a malha 2 do escoamento ao redor de um cilindro

O campo de velocidade da malha 2, apresentado pela figura 16a, atingiu um valor máximo de

9,2 m/s também na região de separação do escoamento, formando fenômenos de recirculações a jusante. Já o campo de pressão (figura 16b), cujo maior valor foi 31 Pa, também apresentou um gradiente entre a montante e a jusante do cilindro devido à formação da esteira e arrasto de pressão.

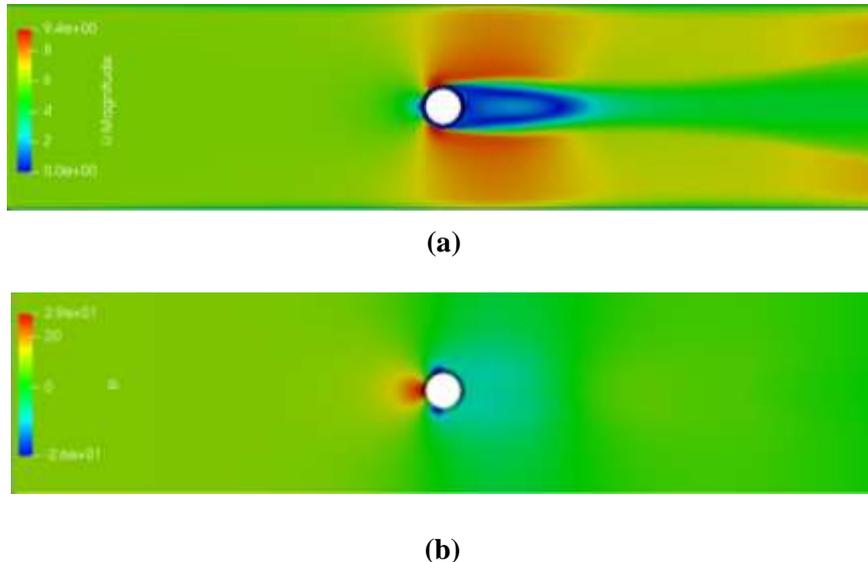


Figura 17 - Campos de velocidade e pressão para a malha 3 do escoamento ao redor de um cilindro

A figura 17a apresenta o escoamento na malha 3, com velocidade máxima de 9,4 m/s, que assim como nas figuras 15a e 16a, ocorreu na região de separação do escoamento, nas proximidades do ângulo de 90° entre o cilindro e o escoamento de ar. Também formou-se uma região de esteira e de recirculação a jusante do cilindro. No campo de pressão (figura 17b), é possível observar a menor magnitude (-26Pa) na região de separação, onde a velocidade é máxima, e magnitudes maiores a montante do escoamento, atingindo 29 Pa. A tabela 4 mostra os resultados das malhas 1, 2 e 3 do escoamento ao redor de um cilindro, comparando os valores obtidos pelos resultados apresentados por Vasconcellos *et al* (2014).

A figura 18 apresenta as linhas de corrente do campo de escoamento para a malha 3.



Figura 18 - Linhas de corrente da malha 3 do escoamento ao redor de um cilindro

Pode-se observar pela figura 18, a formação de dois vórtices na região de esteira do cilindro, confirmando qualitativamente a validação da simulação, de acordo com os resultados de Vasconcellos *et al* (2014), e a região onde ocorre a separação do escoamento, onde a velocidade é máxima e a pressão é mínima.

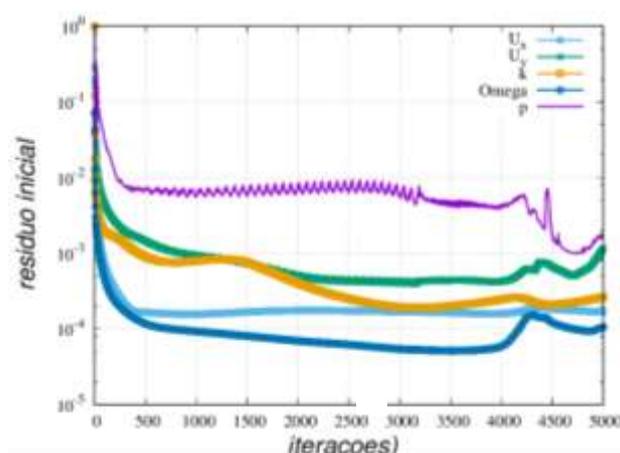


Figura 19 - Gráfico do resíduo em função do número de iterações da simulação do escoamento ao redor de um cilindro

O gráfico dos resíduos em função do número de iterações foi fornecido pelo *gnuplot* e mostra claramente a dificuldade de convergência da simulação, em que houve uma flutuação constante dos resíduos durante praticamente toda a simulação. Apesar disso, eles se mantiveram baixos, como observa-se na figura 19, na ordem de 10^{-4} para a frequência de dissipação da energia cinética turbulenta (ω) e 10^{-3} para as demais propriedades estudadas.

5 CONCLUSÃO

Por meio do presente trabalho, pôde-se observar e compreender, por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional, o comportamento de fenômenos da mecânica dos fluidos em escoamentos de ar ao redor de dois blocos e um cilindro na câmara de teste de um túnel de vento.

Foi realizado um estudo numérico do escoamento ao redor de dois blocos, simulando dois edifícios, na câmara de testes do túnel de vento da UniRedentor, gerando três malhas com diferente grau de refinamento, em que alcançou-se a convergência na malha 3. Em seguida, obteve-se resultados para os campos de velocidade e pressão do escoamento, além de uma comparação qualitativa das linhas de corrente fornecidas pelo *paraView* e as linhas de corrente mostradas por Rocha & Soares (2013), com base na literatura e em métodos experimentais. Pôde-se observar uma divergência em relação à esses resultados, pois devido às limitações do túnel de vento, não é possível observar com clareza a formação dos vórtices e o comportamento do escoamento na câmara de testes, o que impossibilita a realização de estudos com fins acadêmicos nesse túnel. Portanto, não se torna viável realizar sua instrumentação devido a esse fato.

Além disso, o objetivo de validar a simulação foi alcançado, pois os resultados da análise numérica realizada para a distribuição de velocidade e pressão do escoamento ao redor de um cilindro na câmara de testes foram muito próximos aos apresentados por Vasconcellos *et al* (2014). As linhas de corrente do escoamento também foram analisadas, ratificando qualitativamente a validação.

Para concluir, deve-se ressaltar o conhecimento e a aprendizagem adquirida pelo autor ao longo desse trabalho, em que foram tratados temas complexos, como modelagem de turbulência e emprego de análise numérica. Foi obtida uma maior compreensão dos fenômenos físicos estudados, além da metodologia utilizada por um software de CFD e sua importância e capacidade de resolver problemas práticos de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações**. 3ª ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2015.

DAHL, P. M. **Simulação Computacional de Escoamento Turbulento em Subcanal de PWR Usando OpenFOAM, 2015**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro. 76p.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica dos Fluidos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

REBELLO, B. F.; CARONI, F. M. **Caracterização do Escoamento no Túnel de Vento e Acessórios do Laboratório de Máquinas de Fluxo, 2013**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória. 139p.

RIBEIRO, A. F. P. **Análise Aerodinâmica de um Edifício por Dinâmica dos Fluidos Computacional, 2009**. Monografia (Graduação em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre. 78p.

ROCHA, R. E.; SOARES, L. C. C. **Dimensionamento e Construção de um Túnel de Vento Didático, 2013.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Faculdade Redentor – SUR, Itaperuna. 72p.

VASCONCELLOS, G. L. F.; MELO, A. B.; FREITAS, P. H. A.; HANRIOT, S. M.; MAIA, C. B. **Estudo Numérico do Escoamento ao Redor de um Cilindro Circular em um Túnel de Vento para Baixas Velocidades para Diferentes Rotações.** SIMMEC/EMMCOMP. Juiz de Fora, 2014.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics.** 1ª ed. Nova York: Longman Scientific & Technical, 1995.