

PERFIL DE VELOCIDADE E FATOR DE ATRITO EM ESCOAMENTOS LAMINAR E TURBULENTO EM UM DUTO CIRCULAR LISO OBTIDOS ATRAVÉS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONALGustavo Luiz Macedo da Silva¹

Centro Universitário - Católica de Santa Catarina

RESUMO

Atualmente a utilização do CFD permite a solução de problemas de escoamentos laminares com relativa facilidade, porém as soluções da maioria dos problemas de escoamentos turbulentos exigem a utilização de modelos de turbulência. A escolha do modelo de turbulência está diretamente atrelada ao tipo de problema que está sendo resolvido e a demanda computacional necessária. O presente artigo apresenta uma análise dos perfis de velocidade e dos fatores de atrito obtidos em escoamentos em um duto circular em regime laminar e turbulento. Para o escoamento turbulento, foram analisados os modelos de turbulência $k-\epsilon$, $k-\omega$ e SST. Os resultados mostraram que os dois últimos modelos são mais adequados para a análise do escoamento perto da parede. Sendo que o melhor resultado de fator de atrito obtido para o modelo $k-\epsilon$ foi de 8,2% de diferença em relação ao exato, valor este muito superior do que o 0,1% do $k-\omega$ e o 1,2% do SST nas suas melhores configurações.

Palavras-chave: CFD; laminar; turbulento; fator de atrito.

VELOCITY PROFILE AND FRICTION FACTOR IN LAMINAR AND TURBULENT FLOWS IN A CIRCULAR SMOOTH PIPE BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**ABSTRACT**

Currently the use of CFD allows the solution of laminar flow problems with relative ease, however the solutions of most turbulent flow problems require the use of turbulence models. The choice of the turbulence model is directly tied to the type of problem being solved and the computational demand required. This paper presents an analysis of velocity profiles and friction factors obtained in laminar and turbulent flows in a circular pipe. For the turbulent flow, the turbulence models $k-\epsilon$, $k-\omega$ and SST were analyzed. The results showed that the last two models are more suitable for analysis of the flow near the wall. The best friction factor result obtained for the $k-\epsilon$ model was 8.2% of the difference compared to the analytical result, which is much higher than the 0.1% of $k-\omega$ and 1.2% of the SST in its best configurations.

Keywords: CFD; laminar; turbulent; friction factor.

¹ E-mail: gustavo.macedo@catolicasc.org.br. Endereço para currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8439464117216510>.

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é uma área de estudo voltada a resolução das equações diferenciais de transporte de quantidade de movimento e da conservação da massa com o auxílio de computadores. Sua utilização está cada vez mais presente na engenharia devido à possibilidade de redução de ciclos de projeto, através de estudos paramétricos que reduzem a quantidade de testes experimentais (ÇENGEL, 2015).

Atualmente a utilização do CFD permite a solução de problemas de escoamentos laminares com relativa facilidade, porém as soluções da maioria dos problemas de escoamentos turbulentos exigem a utilização de modelos de turbulência. A escolha do modelo de turbulência está diretamente atrelada ao tipo de problema que está sendo resolvido e a demanda computacional necessária. Existem modelos que não adicionam equações de conservação durante o processo iterativo de resolução, porém são bastante dependentes de dados experimentais de entrada. Já outros modelos adicionam até duas equações adicionais de conservação no processo iterativo, resultando em um maior tempo computacional, porém não são tão dependentes de dados experimentais de entrada.

O presente artigo apresenta a solução de um escoamento laminar e de um escoamento turbulento completamente desenvolvido em um duto circular liso, obtida através da utilização do CFD. Para o escoamento laminar, as soluções numéricas do fator de atrito e do perfil de velocidade desenvolvido são validadas através da comparação com resultados analíticos. Já para o escoamento turbulento, o fator de atrito será validado com a utilização da equação de Colebrook.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EQUAÇÕES DA CONSERVAÇÃO DA MASSA E DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A solução de um escoamento ao longo de um duto circular pode ser obtida através da resolução das equações diferenciais da conservação da massa e da quantidade de movimento. Se tais equações forem simplificadas para um escoamento em regime permanente, incompressível, isotérmico e com viscosidade constante, apresentam a forma da equação 1, para conservação da massa, e das equações 2, 3 e 4, para conservação da quantidade de movimento nas componentes x, y e z, respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

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

2.2 FATOR DE ATRITO

Em escoamentos internos, um dos parâmetros mais utilizados para o cálculo da perda de carga ao longo de uma tubulação é o fator de atrito. Ele relaciona a tensão de cisalhamento na parede e a pressão dinâmica do escoamento, resultando na equação 5. Tal parâmetro adimensional é chamado de fator de atrito de Darcy-Weisbach.

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho V_{med}^2} \quad (5)$$

Para um escoamento laminar completamente desenvolvido em um duto circular, o fator de atrito pode ser calculado através da equação 6.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Já para um escoamento turbulento ele é altamente influenciado, além do número de Reynolds, pela rugosidade do material da tubulação. Para o caso de um escoamento turbulento completamente desenvolvido, o fator de atrito pode ser obtido através da resolução da equação implícita de Colebrook, representada pela equação 7.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

2.3 PERFIL DE VELOCIDADE

Um escoamento laminar completamente desenvolvido apresenta um perfil de velocidade ao longo do raio conforme a equação 8.

$$u(r) = 2V_{med} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (8)$$

Já para um escoamento turbulento é difícil de obter uma relação analítica para o perfil de velocidade, como a obtida para um escoamento turbulento. Assim, os perfis de velocidade em um escoamento turbulento se baseiam tanto em análises quanto em dados experimentais, tendo uma natureza semiempírica (ÇENGEL, 2015). Existem diversos perfis de velocidade empíricos para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos, sendo

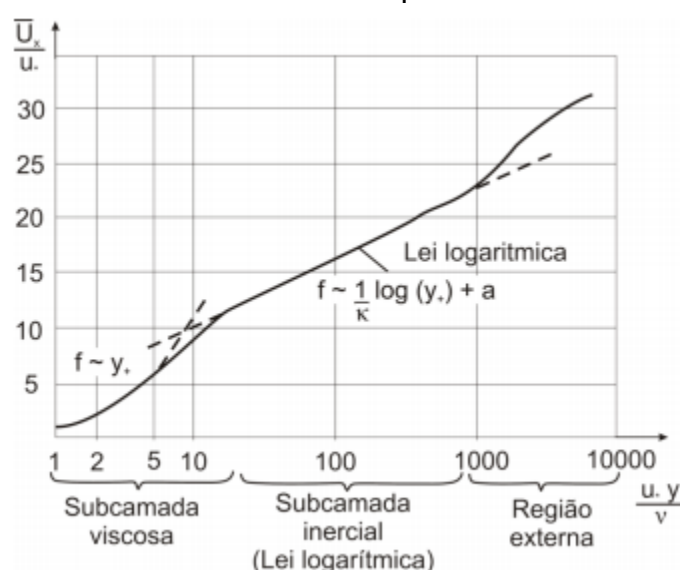
que o mais conhecido é o perfil de velocidade da lei de potência, representado na equação 9.

$$u(r) = u_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{1/n} \quad (9)$$

A velocidade $u_{m\acute{a}x}$ se refere a velocidade na linha central do duto e o coeficiente n é uma constante que depende do número de Reynolds.

A análise da velocidade do escoamento perto da parede merece um destaque. Devido à condição de não deslizamento na parede, três regiões são identificadas próximas às paredes: a camada viscosa, a camada logarítmica e a camada externa (POSSAMAI, 2014). O perfil representativo dessas regiões é ilustrado em um formato adimensional na figura 1. No eixo das ordenadas é apresentada a velocidade adimensional do escoamento $u^+ = u/u_*$, e no eixo das abscissas é apresentada uma distância adimensional à parede $y^+ = u_* y / \nu$. O parâmetro u_* é chamado de velocidade de fricção e é calculado conforme equação 10, onde τ_w representa a tensão de cisalhamento na parede.

Figura 1 – Distribuição de velocidade adimensional em função da distância adimensional à parede.



Fonte: Possamai (2014).

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (10)$$

Nota-se que na subcamada viscosa ($0 < y^+ < 5$), a velocidade adimensional u^+ é aproximadamente igual a distância adimensional y^+ . Já na camada logarítmica u^+ está relacionada a y^+ conforme equação 11, onde κ e C são constantes.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (11)$$

Alguns modelos de turbulência não resolvem numericamente o escoamento da camada limite e sim utilizam tais equações para prever o perfil de velocidade perto da parede. Tal método é chamado de função parede e é muito utilizado, por exemplo, no modelo de turbulência $k - \varepsilon$.

2.4 MODELOS DE TURBULÊNCIA

A velocidade instantânea de um escoamento turbulento pode ser representada como a soma de uma velocidade média $\bar{u}$ e uma componente de flutuação u' . Segundo Çengel (2015) a tensão de cisalhamento total no escoamento pode ser expressa como uma soma de uma componente laminar ($\tau_{lam} = \mu \frac{du}{dy}$), e uma componente turbulenta ($\tau_{turb} = -\rho u'v'$). Tais termos que são função de flutuações de velocidade são chamados de tensões de Reynolds, e as formulações semiempíricas que modelam a tensão de Reynolds, em função de gradientes de velocidade média, são chamadas de modelos de turbulência (ÇENGEL, 2015).

Os modelos de turbulência são divididos em modelos de 0,1 e 2 equações. Nos modelos de 0 equações, a tensão de Reynolds é escrita em um formato similar da tensão de cisalhamento laminar, porém a viscosidade é substituída por um termo chamado de viscosidade turbulenta. Tal viscosidade turbulenta μ_t é calculada em função do comprimento de mistura L_m , parâmetro experimental que está relacionado ao tamanho médio dos vórtices responsáveis pela mistura.

Nos modelos de 1 equação, uma variável para a turbulência é adicionada. Tal parâmetro é a energia cinética turbulenta k e uma equação de conservação é adicionada ao processo iterativo em conjunto com as equações de conservação de quantidade de movimento e conservação da massa.

Por fim, nos modelos de 2 equações, além a energia cinética turbulenta, uma segunda equação de conservação é adicionada em relação a um segundo parâmetro. Os modelos mais comuns utilizam como segunda variável a taxa de dissipação viscosa ε ou uma variável de turbulência por tempo ω .

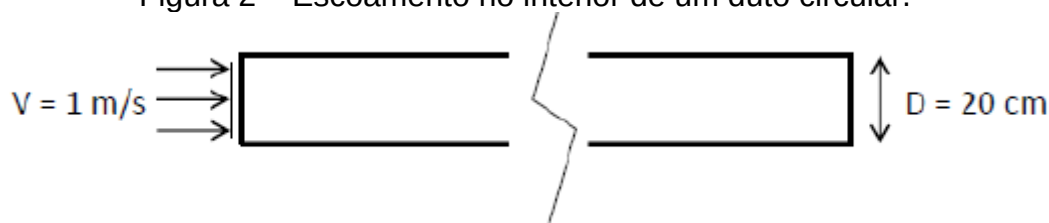
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 APRESENTAÇÃO DO CASO

Os casos do presente estudo consistem em um problema de escoamento laminar e um problema de escoamento turbulento plenamente desenvolvido em um duto circular liso de 20 cm de diâmetro interno. O fluido hipotético utilizado apresenta uma densidade de 1 kg/m^3 e uma viscosidade dinâmica de 2.10^{-3} Pa.s para o escoamento laminar e de 2.10^{-5} Pa.s para o escoamento turbulento. É considerado como condições de contorno um perfil uniforme de velocidade de entrada igual a 1 m/s e uma condição de pressão

atmosférica na saída do duto. Para tais condições o escoamento laminar apresenta um $Re = 100$ e o turbulento um $Re = 10000$. O comprimento do duto foi alterado dependendo da configuração do escoamento para garantir um perfil de velocidade completamente desenvolvido na saída do tubo. A figura 2 apresenta a geometria do problema.

Figura 2 – Escoamento no interior de um duto circular.



Fonte: O autor (2017).

Ambos os problemas são resolvidos com o pacote ANSYS Academic Student Release 18.2. A geometria do problema foi construída com o software ANSYS SpaceClaim, a malha gerada com o ANSYS Meshing, a resolução do escoamento com o ANSYS CFX e o pós processamento dos resultados com o ANSYS CFD-Post. O software ANSYS CFX utiliza o método de volumes finitos na discretização das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento.

3.2 ESCOAMENTO LAMINAR

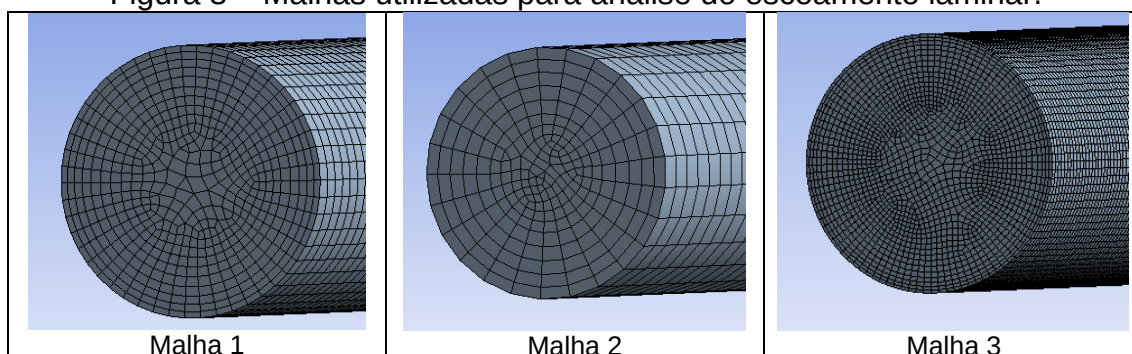
Para o caso do escoamento laminar é inicialmente definido um comprimento para a tubulação para garantir um escoamento completamente desenvolvido. Para tanto se calcula o comprimento de entrada conforme a equação 12 (FOX, 2010).

$$L \approx 0,06DRe \quad (12)$$

O comprimento de entrada para a configuração estudada resulta em um valor de aproximadamente de 1,2 m. Para a visualização do perfil de velocidade completamente desenvolvido ao longo de uma parte do comprimento tubo, foi definido um comprimento total do duto de 2 m.

Foram geradas 3 malhas para análise de refino de malha, conforme ilustrado na figura 3. A malha 1 apresenta 66120 nós e 62941 elementos, a malha 2 apresenta 17496 nós e 16401 elementos, e a malha 3 apresenta 469800 nós e 457600 elementos. Em todas as malhas foram utilizadas o comando *Inflation* e *Edge Sizing* para um maior controle dos volumes gerados próximo a parede do duto.

Figura 3 – Malhas utilizadas para análise do escoamento laminar.



Fonte: O autor (2017).

As propriedades do fluido foram adicionadas como um novo material, e para tal simulação não foi adicionado nenhum modelo de transferência de calor e de turbulência.

O método de advecção selecionado foi o *Upwind* (UDS) visto que o escoamento tem uma direção preferencial bem definida e por tal método não provocar oscilação numérica, pois não possibilita a ocorrência de coeficientes negativos nas equações discretizadas de conservação de quantidade de movimento.

O critério de convergência utilizado foi 1.10^{-5} RMS. Tal critério foi escolhido com base no manual da ANSYS que afirma que tal critério apresenta boa convergência e geralmente é suficiente para a maioria das aplicações de engenharia. Além do critério RMS foi selecionado a opção *Conservation Target* com um valor de 0,001. Esta opção garante um balanço global das equações de conservação com um erro abaixo de 0,1% antes do fim do processo de convergência.

3.3 ESCOAMENTO TURBULENTO

Para o caso do escoamento turbulento é inicialmente definido um comprimento para a tubulação para garantir um escoamento completamente desenvolvido. Para tanto se calcula o comprimento de entrada conforme a equação 13 (ÇENGEL, 2015).

$$L = 1,359 D Re^{1/4} \quad (13)$$

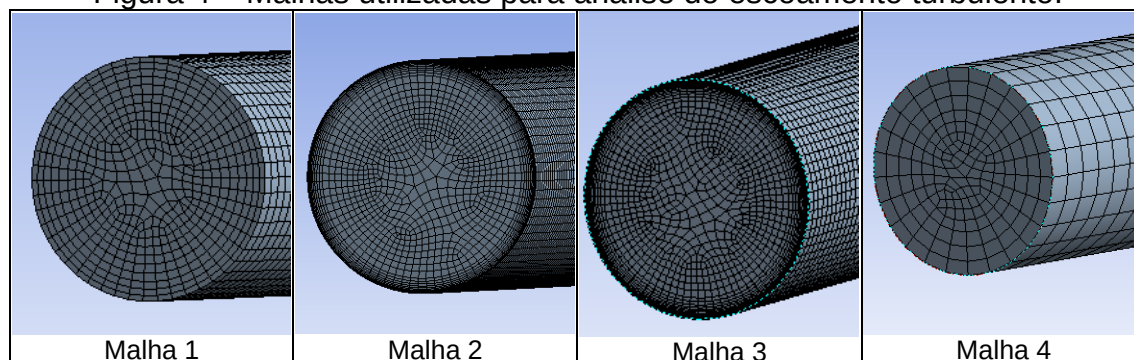
O comprimento de entrada para a configuração estudada resulta em valor de aproximadamente de 2,7 m. Para a visualização do perfil de velocidade completamente desenvolvido ao longo de uma parte do comprimento tubo, foi definido um comprimento total do duto de 3 m.

Foram utilizadas quatro malhas para a análise do refino de malha, conforme ilustrado na figura 4. A malha 1 apresenta 95418 nós e 91290 elementos, a malha 2 apresenta 505936 nós e 494190 elementos, a malha 3 apresenta 501216 nós e 490875 elementos e por fim a malha 4 contém 20196 nós e 18725 elementos. Apesar das malhas 2 e 3 apresentarem números de nós e elementos semelhantes, a malha 3 foi gerada para criar volumes na

superfície da parede menores quando comparado com a malha 2. O objetivo é obter diferentes valores de y^+ para cada malha gerada e assim avaliar a influência do modelo de turbulência utilizado. O procedimento de geração das malhas foi análogo ao utilizado para o escoamento laminar.

O modelo de advecção utilizado foi o *Upwind* (UDS). Já os modelos de turbulência analisados foram o $k - \varepsilon$, $k - \omega$ e *SST*. O critério de convergência utilizado foi mantido igual a 1.10^{-5} RMS, porém apenas para as equações de conservação da massa e quantidade de movimento.

Figura 4 – Malhas utilizadas para análise do escoamento turbulento.



Fonte: O autor (2017).

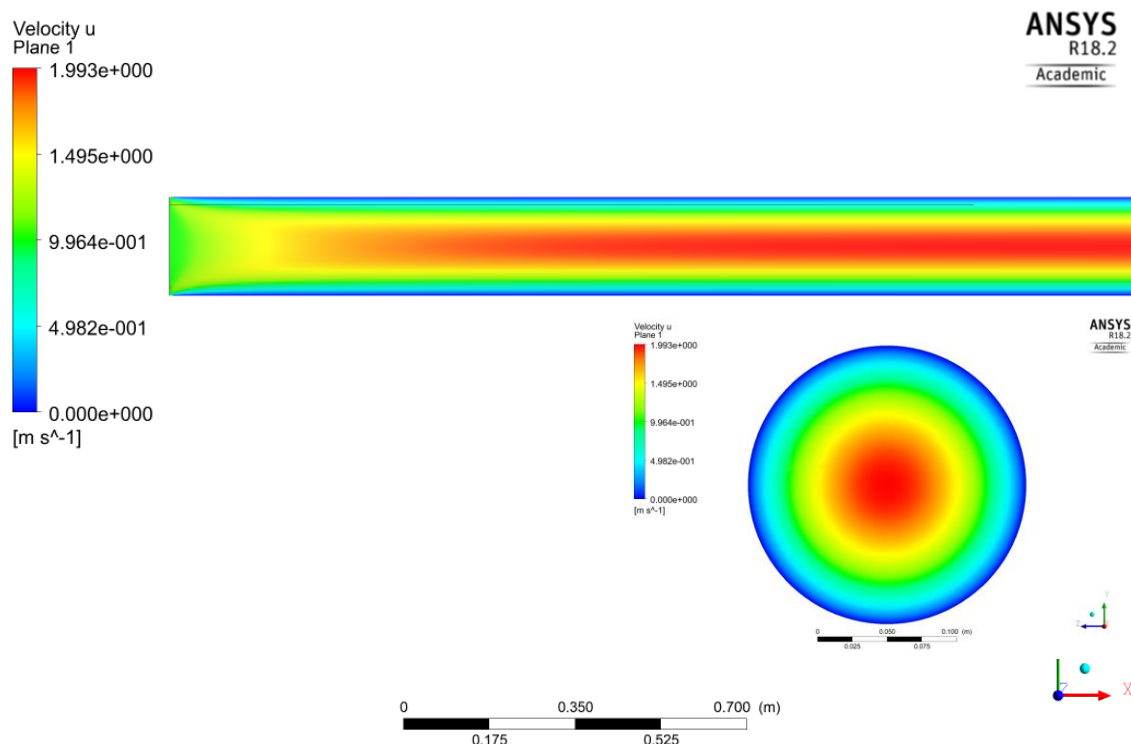
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção é destinada para a apresentação inicial dos resultados do escoamento laminar plenamente desenvolvido e na sequência os resultados do escoamento turbulento.

4.1 ESCOAMENTO LAMINAR COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO

A figura 5 ilustra a distribuição de velocidade ao longo do comprimento do duto com o detalhe do perfil de velocidade completamente desenvolvido na saída do duto. Tais resultados foram obtidos com a malha mais refinada (malha 3). Nota-se que o escoamento parte de um perfil de velocidade uniforme na entrada do duto (fronteira esquerda da figura) e vai se transformando em um perfil parabólico ao longo do duto devido a condição de não deslizamento na parede. É possível perceber também que a partir de aproximadamente metade do duto o perfil de velocidade não se modifica, tornando-se completamente desenvolvido.

Figura 5 – Distribuição de velocidade em regime laminar com a malha 3.

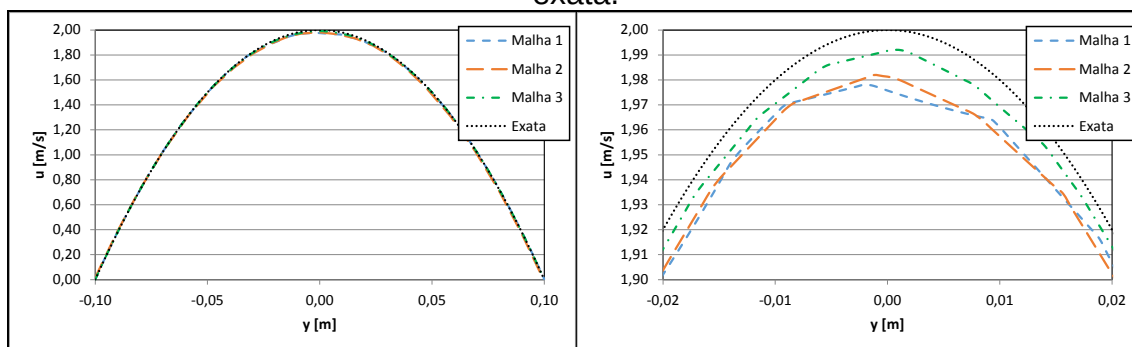


Fonte: O autor (2017).

Um estudo de refino de malha foi realizado para verificar a precisão dos resultados frente ao resultado analítico representado pela equação 8, conforme apresentado na figura 6. Nota-se que de modo geral as três malhas fornecem resultados muito próximos do analítico, porém a malha mais refinada (malha 3) apresenta um resultado mais preciso quando se observa a velocidade máxima do escoamento.

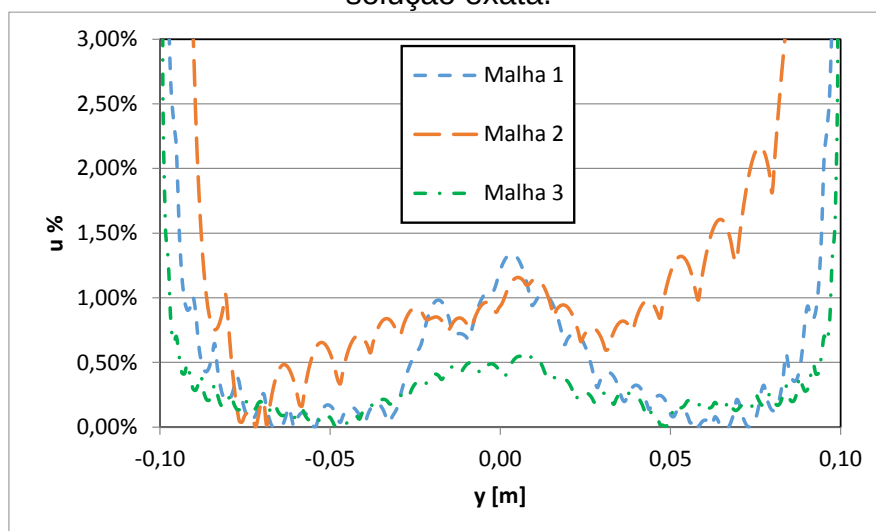
A figura 7 apresenta a diferença percentual absoluta entre os resultados obtidos com as malhas e o resultado analítico. Tal gráfico mostra que apesar da malha 2 (mais grosseira) apresentar uma velocidade na linha de centro do duto mais próxima do analítico em comparação com a malha 1, ela é a que resulta no perfil menos preciso, ocasionado erros de acima de 3% em regiões próximas da parede. Por outro lado, a malha 3 apresenta os melhores resultados, com erros menores de 0,5% ao longo da maior parte do perfil.

Figura 6 – Comparação do perfil de velocidade com as três malhas e a solução exata.



Fonte: O autor (2017).

Figura 7 – Diferença percentual absoluta de velocidade entre as 3 malhas e a solução exata.



Fonte: O autor (2017).

Com o objetivo de garantir que o balanço de massa foi satisfeito, foi verificado o fluxo de massa na entrada do duto e comparado com a saída do duto. Os resultados são apresentados no quadro 1, em conjunto com a diferença percentual absoluta entre os fluxos de massa em relação ao fluxo de massa de entrada. Nota-se que os resultados do balanço de massa mostram que o fluxo de massa de entrada é praticamente igual ao de saída.

Quadro 1 – Fluxo de massa na entrada e na saída do duto.

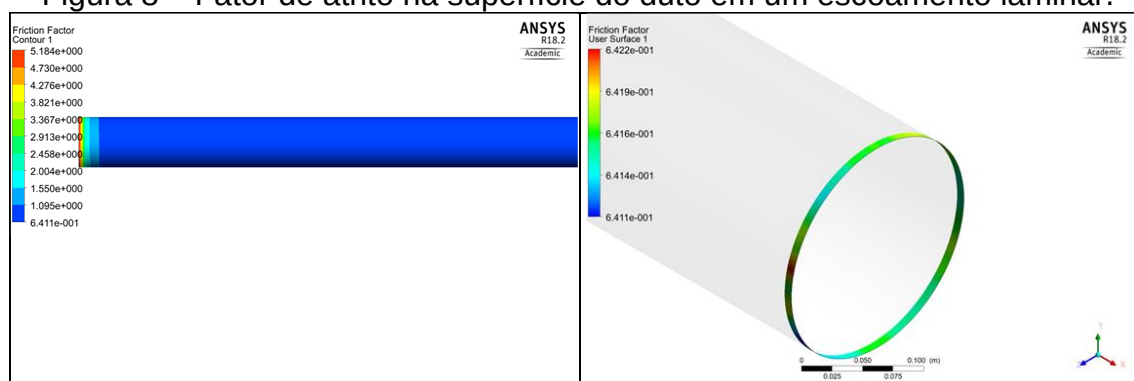
Malha	$\dot{m}_{entrada}$ [kg/s]	$\dot{m}_{saída}$ [kg/s]	Diferença % em relação ao $\dot{m}_{entrada}$
1	0,0313333	-0,0313333	0,000000%
2	0,0310862	-0,0310863	0,000322%
3	0,0313953	-0,0313955	0,000637%

Fonte: O autor (2017).

Além do perfil de velocidade e do balanço de massa, foi verificado o fator de atrito ao longo da superfície da parede, com detalhe na saída do duto, conforme ilustra a figura 8. Conforme apresentado o fator de atrito é maior na entrada do tubo e vai diminuindo à medida que o perfil de velocidade se desenvolve. Isso acontece, pois o fator de atrito é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento na parede (equação 5), e a tensão de cisalhamento varia com a inclinação do perfil de velocidade na superfície. Como a inclinação do perfil é maior no início do duto devido a menor espessura da camada limite, a tensão de cisalhamento e consequentemente o fator de atrito são maiores na entrada do duto. A figura 9 ilustra qualitativamente a mudança do perfil de velocidade ao longo da entrada do duto.

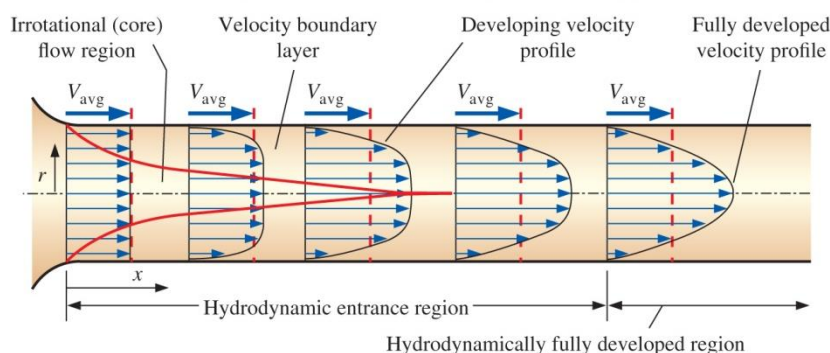
O fator de atrito na superfície da parede na parte final do duto apresentou valores mínimos, máximos e médios conforme ilustrado no quadro 2. Além disso, o quadro apresenta a diferença percentual absoluta do valor médio de fator de atrito no final do duto para cada malha em relação ao valor exato obtido através da equação 6. O valor exato para fator de atrito para a presente situação é igual a 0,64. Nota-se que as 3 malhas apresentam valores de fator de atrito com erros menores do que 1% em relação ao resultado analítico, destacando-se o resultado da malha 1 que apresentou um erro de apenas 0,12%.

Figura 8 – Fator de atrito na superfície do duto em um escoamento laminar.



Fonte: O autor (2017).

Figura 9 – Desenvolvimento da camada limite de velocidade em um duto circular.



Fonte: Çengel (2015).

Quadro 2 – Fator de atrito no final do duto.

Malha	f mínimo	f máximo	f médio	Diferença % em relação ao valor exato
1	0,640035	0,641135	0,640738	0,12%
2	0,636024	0,636794	0,636308	0,58%
3	0,641084	0,642205	0,641593	0,25%

Fonte: O autor (2017).

4.2 ESCOAMENTO TURBULENTO COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO

O quadro 3 apresenta as velocidades máximas (em m/s) na saída do duto, obtidas com as 4 malhas e com os 3 modelos de turbulência utilizados. Nota-se que de modo geral a velocidade máxima obtida com as malhas 2 e 3 são as que apresentam os maiores valores. Isso é justificado por serem estas as malhas mais refinadas. Em relação ao modelo de turbulência, não foi observado uma grande diferença entre os modelos $k - \omega$ e SST , visto que são modelos bastante semelhantes na região afastada da parede, local onde ocorre a velocidade máxima de escoamento. Por outro lado, o modelo $k - \varepsilon$, que apresenta uma formulação diferente, apresentou valores menores de velocidade máxima.

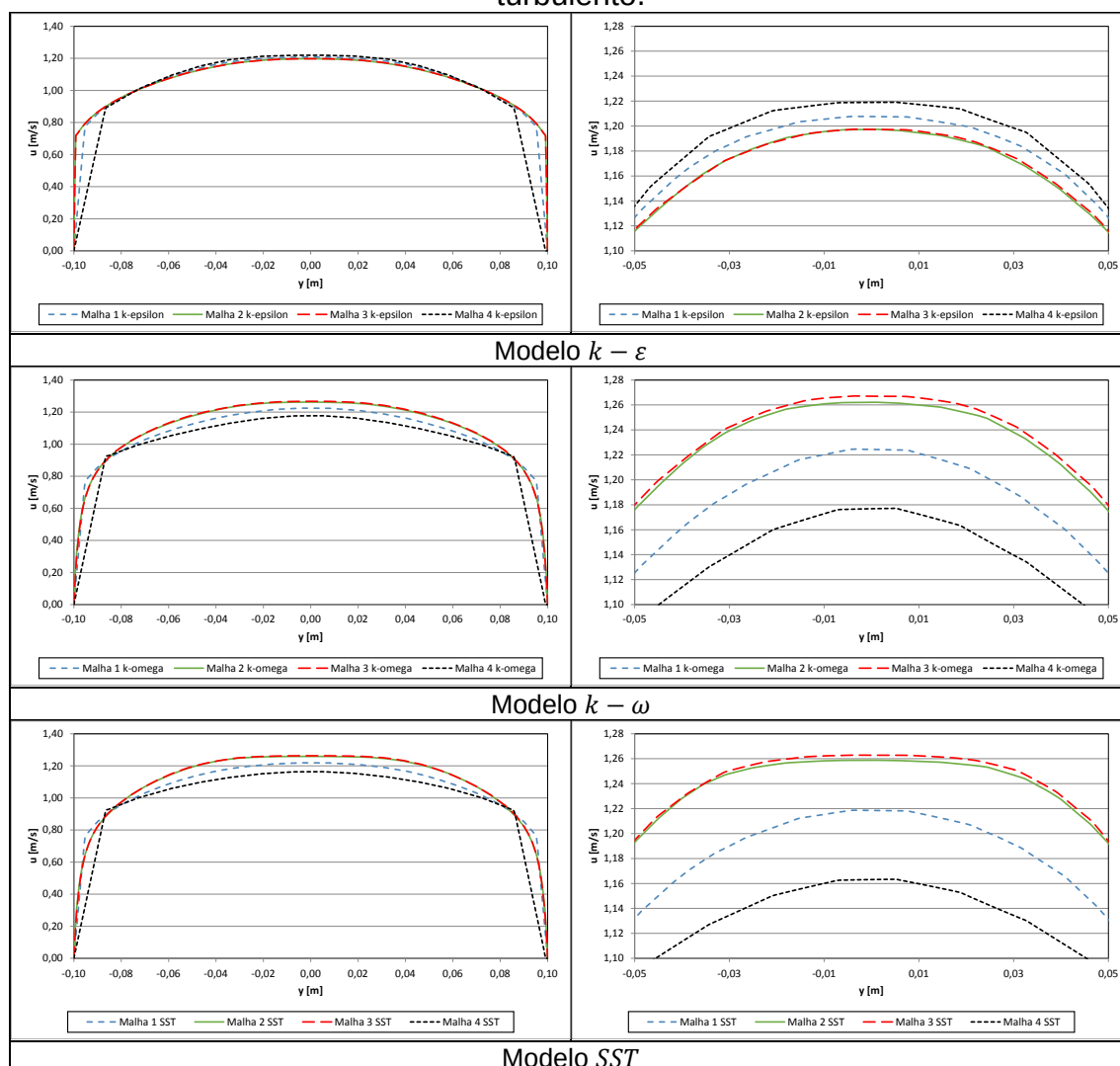
Quadro 3 – Velocidades máximas em m/s no final do duto.

Modelo de turbulência	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Média
k-epsilon	1,211	1,198	1,198	1,219	1,206
k-omega	1,225	1,262	1,267	1,178	1,233
SST	1,219	1,259	1,263	1,164	1,226
Média	1,218	1,240	1,243	1,187	1,222

Fonte: O autor (2017).

Os perfis de velocidade para as 4 malhas utilizadas, divididas por modelo de turbulência, são mostradas na figura 10. Além do perfil completo, é destacada a região próxima da maior velocidade do escoamento.

Figura 10 – Perfil de velocidade na saída do duto para o escoamento turbulento.



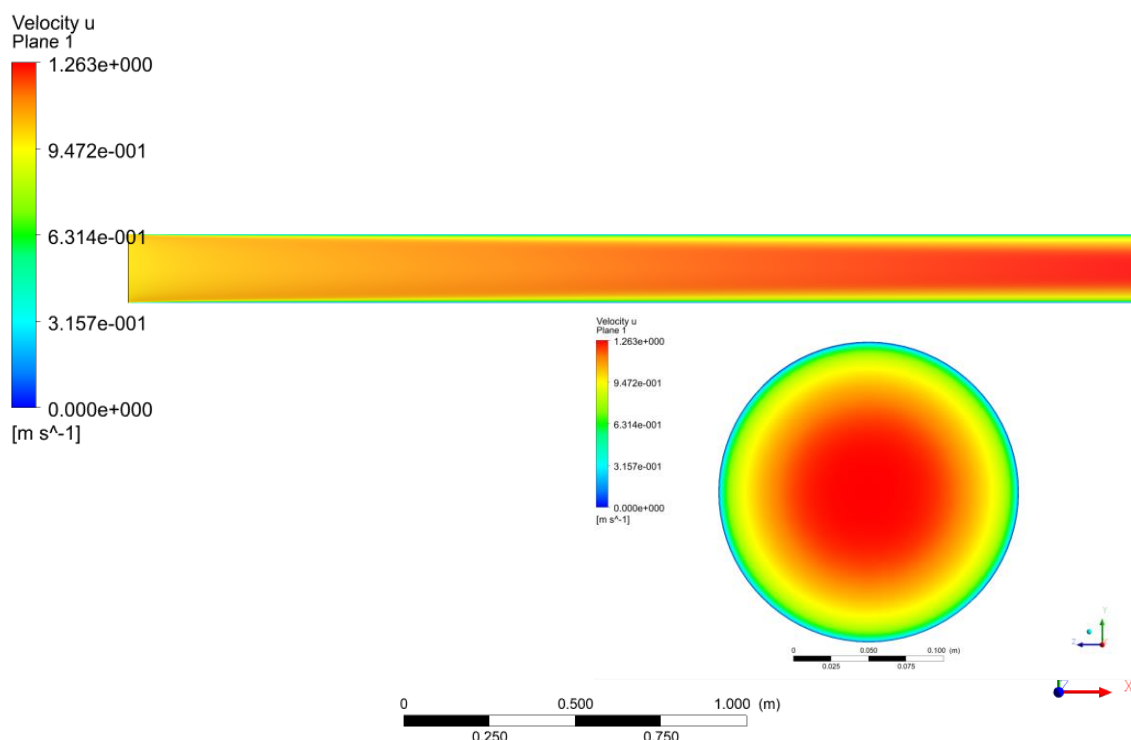
Fonte: O autor (2017).

Nota-se que a malha 4 (mais grosseira), não consegue captar adequadamente o perfil de velocidade próximo a parede, diferentemente do que acontece com as malhas 2 e 3 (mais refinadas). Ainda na região próxima da parede, é possível perceber que a malha 1, não consegue representar tão bem o perfil desenvolvido com a utilização do modelo $k - \varepsilon$, mas se aproxima satisfatoriamente das malhas mais refinadas nos modelos $k - \omega$ e SST. Tal resultado mostra que esses dois últimos modelos são mais adequados para a análise do fenômeno perto da parede.

Na região central do escoamento, observa-se que o modelo $k - \varepsilon$ fornece uma velocidade menor do que as obtidas com os outros dois modelos, que fornecem resultados muito semelhantes entre si. É possível perceber também que o refino de malha é mais influente na região central para os modelos $k - \omega$ e SST do que para o modelo $k - \varepsilon$.

A figura 11 ilustra a distribuição de velocidade ao longo do comprimento do duto com o detalhe do perfil de velocidade completamente desenvolvido na saída do duto. Tais resultados foram obtidos com a malha 3 e com o modelo de turbulência *SST*. Nota-se o desenvolvimento do perfil ao longo do duto devido a condição de não deslizamento na parede, e que, comparado com o escoamento laminar, o comprimento necessário para o completo desenvolvimento da camada limite é maior para o caso turbulento. Além disso é possível perceber que o gradiente de velocidade próximo a parede é maior no escoamento turbulento quando comparado ao laminar.

Figura 11 – Distribuição de velocidade em regime turbulento com a malha 3 e modelo de turbulência *SST*.



Fonte: O autor (2017).

A garantia do balanço de massa do problema foi comprovada avaliando o fluxo de massa na entrada e na saída do duto, análogo ao realizado com o escoamento laminar, conforme ilustra o quadro 4. Não foram observadas mudanças nos fluxos de massa com os diferentes modelos de turbulência utilizados, apenas com o refino de malha utilizado.

Quadro 4 – Fluxo de massa na entrada e na saída do duto.

Malha	$\dot{m}_{entrada}$ [kg/s]	$\dot{m}_{saída}$ [kg/s]
1	0,0313333	-0,0313333
2	0,0313836	-0,0313836
3	0,0313836	-0,0313836
4	0,0310862	-0,0310862

Fonte: O autor (2017).

O fator de atrito na superfície da parede na parte final do duto apresentou valores médios conforme ilustrado no quadro 5, para as 4 malhas analisadas e os 3 modelos de turbulência. Já o quadro 6 apresenta a diferença percentual absoluta do valor médio de fator de atrito em relação ao valor exato obtido através da equação de Colebrook (equação 7). O valor exato para fator de atrito para a presente situação é igual a 0,030883. Por fim, o quadro 7 apresenta os valores médios na seção final do duto da distância adimensional y^+ para cada configuração simulada.

É possível perceber que a utilização do modelo $k - \varepsilon$ resultou em valores de fator de atrito menos precisos que os outros dois modelos de turbulência. Sendo que o melhor resultado obtido para o modelo $k - \varepsilon$ foi de 8,2% de diferença em relação ao exato, valor este muito superior do que o 0,1% do $k - \omega$ e o 1,2% do SST nas suas melhores configurações. É interessante observar que o refino de malha afeta diferentemente a qualidade dos resultados dependendo do modelo de turbulência utilizado. Nota-se que de forma geral, malhas mais refinadas na parede provocam resultados mais precisos de fator de atrito para os modelos $k - \omega$ e SST . Já o contrário acontece com o modelo $k - \varepsilon$. Isso pode ser explicado pela forma como cada modelo resolve o escoamento perto da parede.

Os modelos $k - \omega$ e SST realmente resolvem o escoamento no interior da camada limite que se forma a partir da superfície da parede, consequentemente tais modelos necessitam de um alto refino de malha perto da parede para representar o fenômeno físico que está acontecendo. Já o modelo $k - \varepsilon$ utilizado, não resolve o escoamento perto da parede, e sim utiliza a chamada lei de parede. Nota-se que a utilização de malhas mais grosseiras com o modelo $k - \varepsilon$ resultou em valores de y^+ maiores (quadro 7) até que o seu valor entrou no intervalo sugerido para aplicação do perfil logarítmico comentado na seção 2.3. Assim, obteve-se um resultado mais preciso do que com as malhas mais refinadas na parede.

De forma geral, os resultados sugerem a utilização dos modelos $k - \omega$ e SST para resultados mais precisos perto da parede. Porém a utilização desses modelos necessita de um alto refino da malha na região próxima a parede para que se possa resolver o escoamento na camada limite. Dependendo do tamanho do problema a ser analisado, esse refino pode ocasionar um demanda computacional muito elevada. Já o modelo $k - \varepsilon$ utiliza de uma função parede para representar o perfil de velocidade adjacente a superfície da parede.

Os resultados não são tão precisos como os obtidos pelos outros modelos, mas a demanda computacional pode ser bastante reduzida. Um cuidado importante na utilização dos modelos de turbulência é a verificação dos valores de y^+ obtidos na superfície sólido do problema a ser resolvido. Tal parâmetro auxilia na verificação da qualidade da malha junto a parede em relação ao modelo de turbulência escolhido.

Quadro 5 – Fator de atrito médio no final do duto.

Modelo de turbulência	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Média
k-epsilon	0,02771	0,02628	0,02616	0,02836	0,02713
k-omega	0,03050	0,03090	0,03138	0,02721	0,03000
SST	0,02990	0,02984	0,03052	0,02659	0,02921

Fonte: O autor (2017).

Quadro 6 – Diferença percentual absoluta do fator de atrito no final do duto em relação ao valor exato.

Modelo de turbulência	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Média
k-epsilon	10,3%	14,9%	15,3%	8,2%	12,2%
k-omega	1,2%	0,1%	1,6%	11,9%	3,7%
SST	3,2%	3,4%	1,2%	13,9%	5,4%

Fonte: O autor (2017).

Quadro 7 – y^+ médio no final do duto.

Modelo de turbulência	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
k-epsilon	13,67	1,43	0,86	39,59
k-omega	14,37	1,55	0,94	38,78
SST	14,23	1,53	0,93	38,34
Média	14,09	1,50	0,91	38,90

Fonte: O autor (2017).

5 CONSIDERAÇÕES

O presente artigo apresentou os resultados de perfil de velocidade na saída do duto em um escoamento laminar e um escoamento turbulento. Além disso, foram analisados os fatores de atrito obtidos na saída do duto para as duas configurações e os mesmos foram comparados com valores da literatura, obtidos de forma analítica e experimental, para os escoamentos laminar e turbulento, respectivamente. Para o escoamento laminar, as três malhas utilizadas apresentaram resultados de perfil de velocidade e fator de atrito próximo aos obtidos analiticamente.

Para o perfil de velocidade a malha 3 apresenta os melhores resultados, com erros menores de 0,5% ao longo da maior parte do perfil. Já para o fator de atrito a utilização da malha 2 proporcionou um erro de apenas 0,12%. Para o escoamento turbulento, observou-se que a malha 4 (mais grosseira), não consegue captar adequadamente o perfil de velocidade próximo a parede, diferentemente do que acontece com as malhas 2 e 3 (mais refinadas). Ainda na região próxima da parede, é possível perceber que a malha 1, não consegue representar tão bem o perfil desenvolvido com a utilização do modelo $k - \varepsilon$, mas se aproxima satisfatoriamente das malhas mais refinadas nos modelos $k - \omega$ e SST .

Na região central do escoamento, observa-se que o refino de malha é mais influente para os modelos $k - \omega$ e SST do que para o modelo $k - \varepsilon$. Em relação ao fator de atrito no escoamento turbulento, foi possível perceber que a utilização do modelo $k - \varepsilon$ resultou em valores menos precisos que os outros dois modelos de turbulência. Sendo que o melhor resultado obtido para o modelo $k - \varepsilon$ foi de 8,2% de diferença em relação ao exato, valor este muito superior do que o 0,1% do $k - \omega$ e o 1,2% do SST nas suas melhores configurações. Por fim, os resultados mostraram que utilizando o modelo $k - \varepsilon$, a malha mais grosseira utilizada proporcionou um melhor resultado de fator de atrito. Isso aconteceu devido ao valor de y^+ na superfície da parede que com a malha mais grosseira ficou no intervalo correspondente a equação logarítmica utilizada pela lei de parede do modelo $k - \varepsilon$.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2015. 821p.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J; MCDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010-2012

POSSAMAI, Talita S.: **Análise Térmica e Modelagem Numérica de um Forno de Fusão de Material Vítreo a Gás Natural**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. Disponível em: <<http://tede.ufsc.br/teses/PEMC1498-T.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2018

ANSYS Academic Student Release 18.2 (software)