

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS
MODELAMENTO TÉRMICO E FLUIDODINÂMICO APLICADO A SISTEMAS METALÚRGICOS
PROFESSOR ROBERTO PARREIRAS TAVARES

QUARTO TRABALHO:

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TUBO CILÍNDRICO

Aluno: Dickson Alves de Souza

Matr.: 2017658310

BELO HORIZONTE
29 DE NOVEMBRO DE 2017

INTRODUÇÃO

O escoamento e transferência de calor em tubo cilíndrico foram simulados através do método dos volumes finitos por meio do software Ansys R18.1 / Solver Fluent. O caso base foi apresentado pelo professor Rajesh Bhaskaran em vídeos do curso “A Hands-on Introduction to Engineering Simulations”, disponível na plataforma edX, e consistiu da seguinte geometria, propriedades do fluido e condições de contorno:

- Geometria: tubo cilíndrico reto, diâmetro de 20 *cm* e comprimento de 3 *m*. Paredes lisas.
- Regime de escoamento laminar
- Fluido de densidade igual a 1 *kg/m³*, viscosidade igual a 0,002 *kg/m.s*, calor específico igual a 1006,43 *J/kg.K* e condutividade térmica igual a 0,0242 *W/m.K*.
- Velocidade e temperatura do fluido constantes na entrada do tubo e iguais a 1 *m/s* e 373,15 *K*, respectivamente.
- Pressão na saída do tubo igual a 1 *atm*.
- Fluxo de calor na parede do tubo igual a 100 *W/m²* e dirigido para fora (ou seja, promovendo o resfriamento do fluido).

As condições de contorno térmicas são exclusivas desse trabalho e não estavam presentes no problema inicial, que consistia somente do escoamento laminar no tubo.

Para o escoamento isotérmico no tubo, há solução analítica para fluido newtoniano de propriedades constantes e uniformes para a região de fluxo plenamente desenvolvido, ou seja, após um comprimento crítico de 70 *cm* ($L_e = 0,035 \cdot D \cdot Re$). A solução analítica prevê um perfil parabólico descrito pela equação abaixo:

$$\frac{v}{v_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

onde v_{max} é expresso por:

$$v_{max} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) \frac{R^2}{4}$$

A velocidade média, por outro lado, é descrita por:

$$\bar{v} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{P_0 - P_L}{L} \right) \frac{R^2}{8}$$

Assim, $v_{max} = 2\bar{v}$ e, então,

$$\frac{v}{2\bar{v}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2$$

Por fim, sendo $\bar{v} = 1 \text{ m/s}$,

$$v = 2 \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)$$

A introdução do fenômeno de transferência de calor nesse problema não leva ao abandono dessa solução, visto que a viscosidade foi considerada independente da temperatura.

SOLUÇÃO DO PROBLEMA

O primeiro passo para a solução é a definição da geometria. A natureza desse problema indica que a solução axissimétrica é adequada, visto que a componente angular da velocidade é nula e não há força motriz que gere movimento rotacional. Logo, somente metade do tubo precisa ser modelada, ou seja, uma região de 10 cm por 3 m (Figura 1). Em seguida, o domínio deve ser discretizado: a malha deve ser gerada. Para testar o efeito da malha sobre a solução do problema, considerou-se uma malha grosseira como ponto de partida. O número de nós na direção radial e na direção axial foi definido de forma a obter um elemento de volume quadrado.

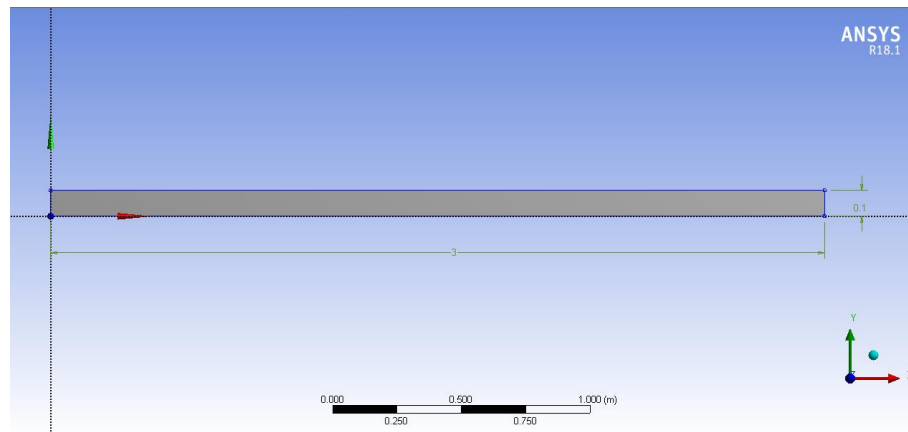


Figura 1: Geometria para solução do problema de escoamento e transferência de calor em tubo cilíndrico.

INDEPENDÊNCIA DE MALHA

A malha inicial apresenta elementos de volume com 5 cm de lado (Figura 2, acima): logo 2 elementos na direção radial e 60 elementos na direção axial: 120 elementos de volume no domínio. Malhas com elementos de volume com 2 cm (Figura 2, abaixo), 1 cm (Figura 3, acima), 0,5 (Figura 3, abaixo) e 0,25 cm de lado (750, 3000, 12000 e 24000 elementos de volume) foram avaliadas. Observou-se que o uso de 12000 elementos de volume é suficiente para obter uma solução satisfatória e a diferença obtida com o uso de 24000 elementos de volume é pouco significativa.

As Figuras 2 e 3 mostram o efeito do refinamento de malha sobre o perfil de temperatura obtido próximo à saída. Uma visão mais quantitativa é possível observando o perfil de velocidade e a temperatura no plano da saída do tubo, como pode ser visto nas Figuras 4 e 6, respectivamente. Os perfis de velocidade superpõem-se para malhas com mais de 3000 elementos; as diferenças são pequenas. A Figura 5 apresenta a comparação da solução analítica com a solução numérica obtida usando o algoritmo Coupled de acoplamento pressão-velocidade. Como mencionado anteriormente, a transferência de calor não afeta o escoamento para as condições estudadas nesse problema. Para a temperatura, no entanto, há ainda diferença significativa na região de maior gradiente térmico junto à parede. Para essa variável, somente após o uso de 12000 elementos de volume, no mínimo, parece ser

adequado: salvo pequenas diferenças, os perfis de 12000 e 24000 elementos são bem próximos.

Por fim, aumentar o número de elementos de volume, embora diminua os erros de discretização, aumenta o tempo necessário para obtenção da resposta (expresso em iterações, Figura 7). Assim, visto que a solução com 12000 elementos de volume foi satisfatória, tanto em termos da temperatura como da velocidade no plano de saída do tubo, adotou-se essa malha para os estudos subseqüentes.

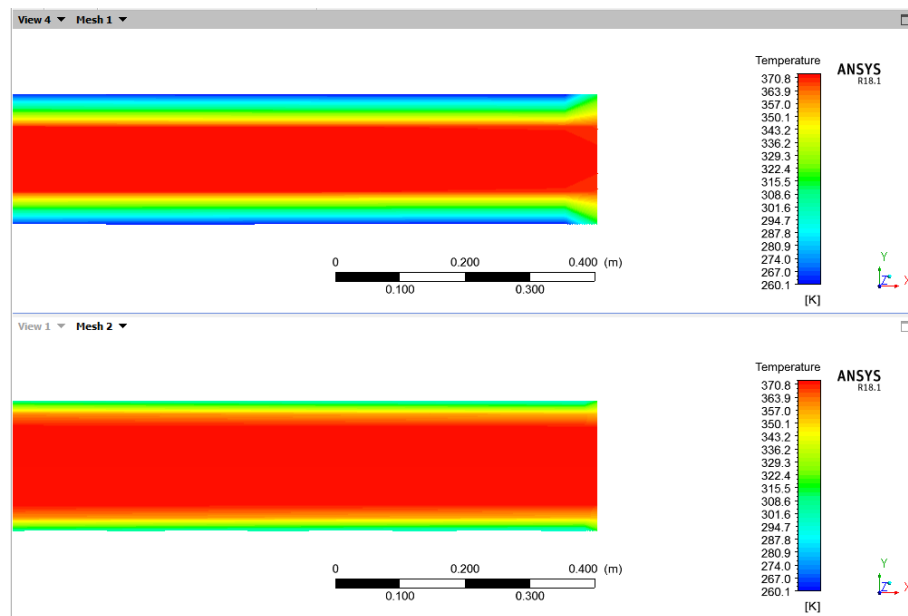


Figura 2: Perfil de temperatura próximo à saída do tubo, obtido para malha de 120 elementos de volume (acima) e para malha de 750 elementos de volume (abaixo).

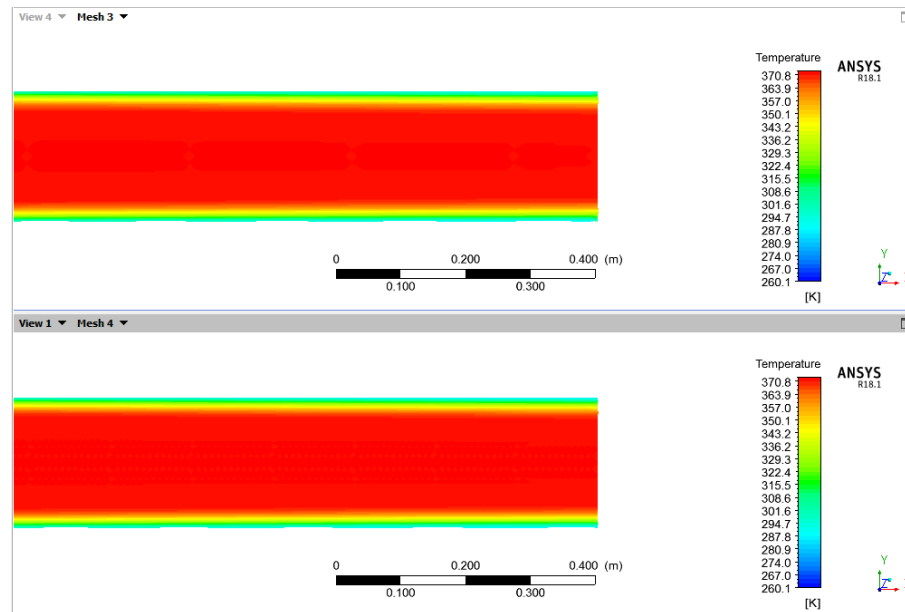


Figura 3: Perfil de temperatura próximo à saída do tubo, obtido para malha de 3000 elementos de volume (acima) e para malha de 12000 elementos de volume (abaixo).

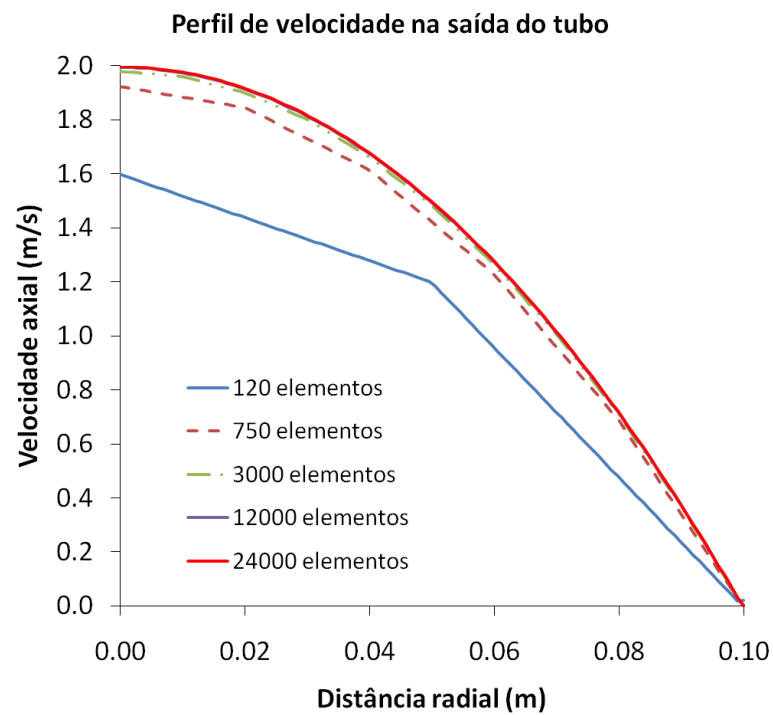


Figura 4: Perfil de velocidade axial na seção transversal na saída do tubo em função da malha adotada.

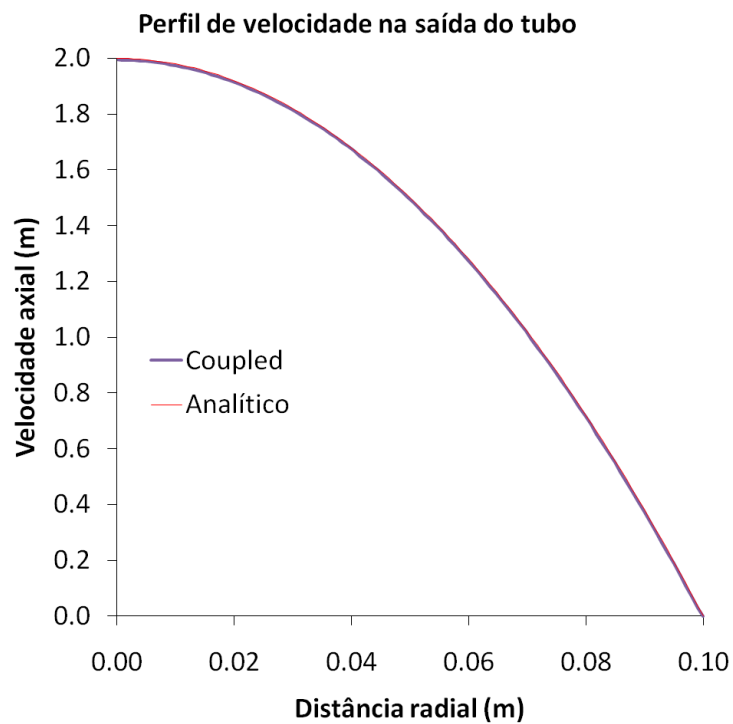


Figura 5: Comparação da solução analítica com a solução numérica obtida usando o acoplamento pressão-velocidade do tipo Coupled, disponível no Ansys Fluent.

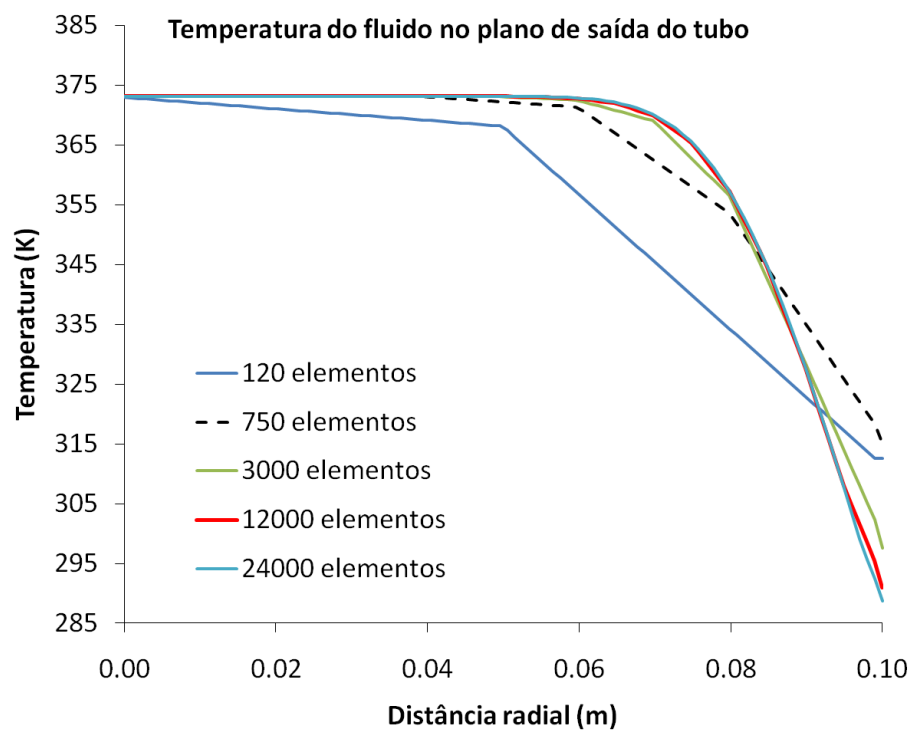


Figura 6: Temperatura do fluido na seção transversal na saída do tubo em função da malha adotada.

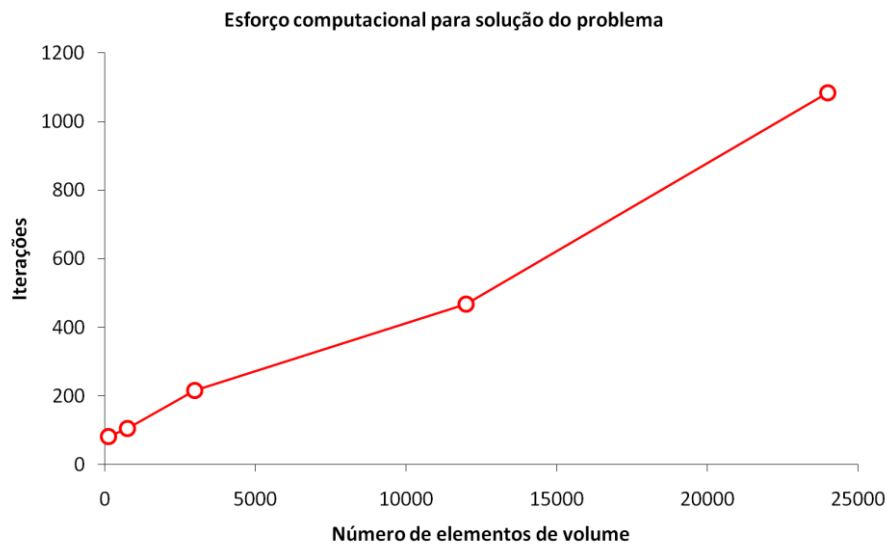


Figura 7: Efeito do número de elementos de volume sob o esforço computacional, medido em número de iterações, para solução do problema.

EFEITO DO ALGORITMO DE ACOPLAMENTO PRESSÃO – VELOCIDADE

O modo de cálculo do acoplamento pressão – velocidade não afeta na solução, como pode ser visto na Figura 8. Por outro lado, o tipo de acoplamento empregado tem efeito significativo sobre a velocidade de convergência. O algoritmo Coupled é o que permite obter a mais rápida convergência para o problema considerado. O número de iterações empregado pelo algoritmo Coupled para atingir a solução atendendo às tolerâncias especificadas de 10^{-6} é inferior a 10% do número de iterações empregado pelos métodos SIMPLE, SIMPLEC e PISO (Figura 9). A simplicidade do problema (escoamento laminar, modelo axisimétrico, propriedades independentes da temperatura) não permite maiores observações sobre o efeito do algoritmo responsável pelo cálculo do acoplamento.

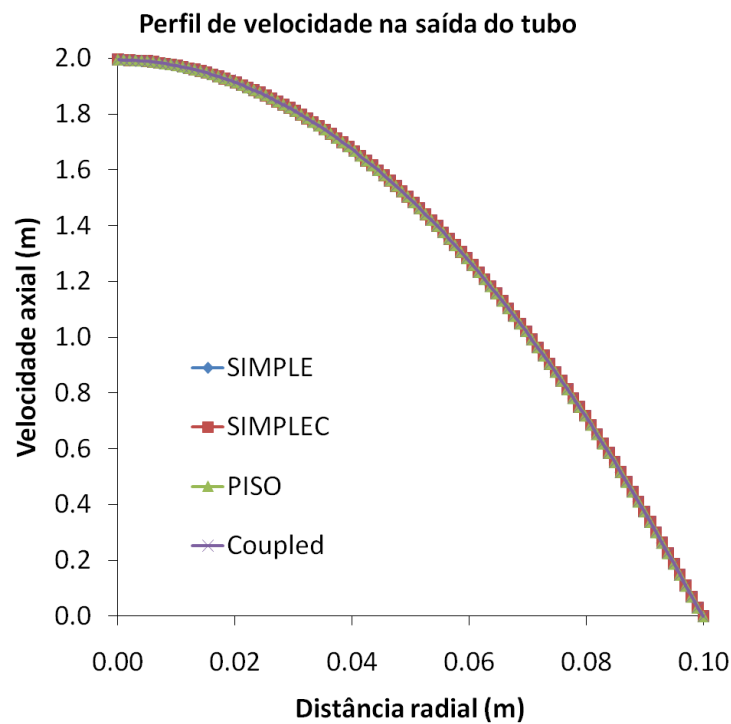


Figura 8: Perfil de velocidade na saída do tubo para diferentes modos de acoplamento de pressão-velocidade.

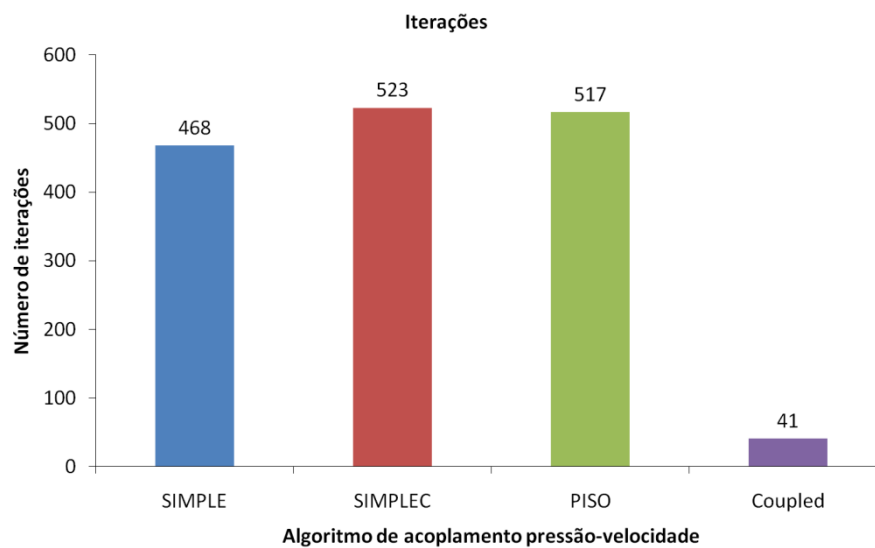


Figura 9: Efeito do algoritmo de acoplamento pressão-velocidade sobre o número de iterações.

EFEITO DO ESQUEMA DE INTERPOLAÇÃO ADOTADO

O Ansys Fluent possui diferentes esquemas de discretização de acordo com a variável escolhida. Para pressão, as opções disponíveis são Second Order, Standard, PRESTO!, Linear

e Body Force Weighted. Para velocidades (momento) e temperatura (energia), as opções disponíveis são First Order Upwind, Second Order Upwind, Power Law, QUICK e Third Order MUSCL.

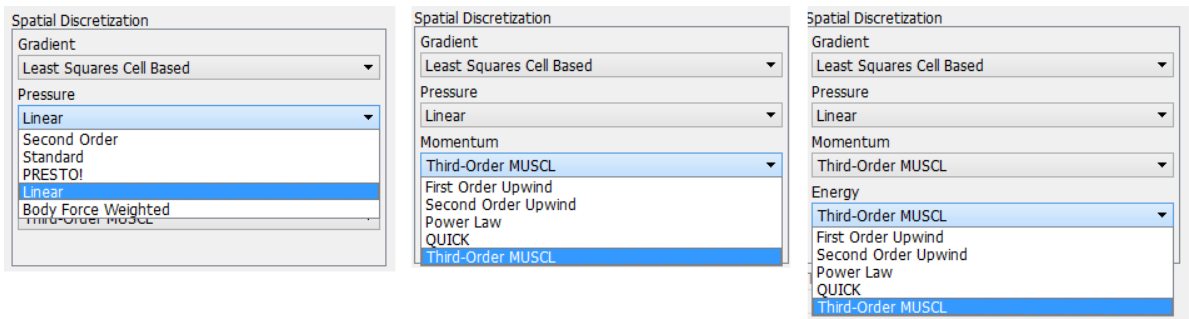


Figura 10: Opções de discretização espacial no Ansys Fluent.

Cinco combinações de discretização espacial foram escolhidas e são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1: Combinações de métodos de discretização espacial

	Combinação #01	Combinação #02	Combinação #03	Combinação #04	Combinação #05
Pressão	Second Order	Standard	Linear	PRESTO!	Linear
Momentum	Second Order Upwind	First Order Upwind	Power Law	QUICK	Third-Order MUSCL
Energia	Second Order Upwind	First Order Upwind	Power Law	QUICK	Third-Order MUSCL

Usou-se o acoplamento pressão-velocidade descrito pelo algoritmo SIMPLEC (maior número de iterações para essas condições de simulação – 523 iterações). O principal efeito notado na mudança do critério de discretização foi a velocidade de convergência: a combinação #03 teve convergência acelerada para 406 iterações. As demais combinações apresentaram convergência bastante similar à combinação padrão (#01). A Figura 11 apresenta o efeito das diferentes combinações apresentadas na Tabela 1. A análise dos resultados mostra pouca influência das técnicas de discretização sobre o resultado final. A Figura 11 mostra a comparação da temperatura calculada ao longo do tubo, a 7,5 cm do eixo central. Note que a diferença é desprezível.

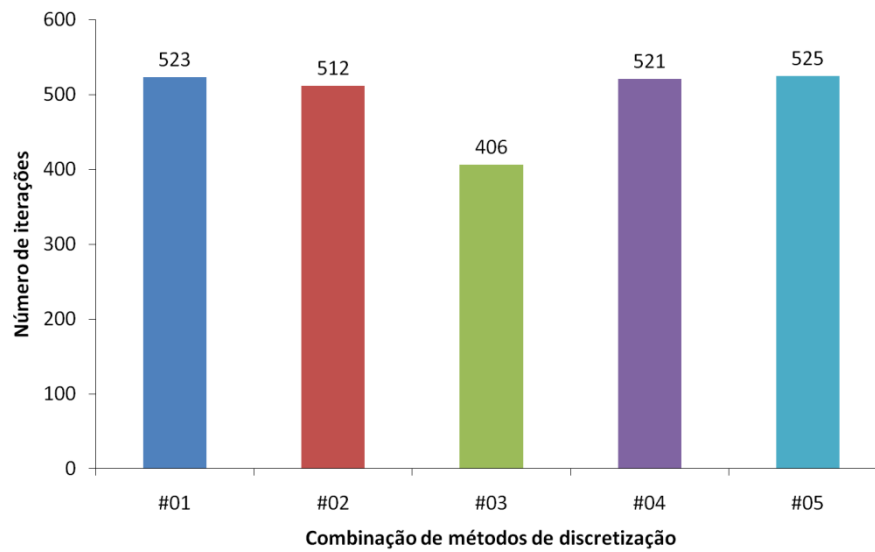


Figura 11: Efeito da discretização espacial sobre a velocidade de convergência.

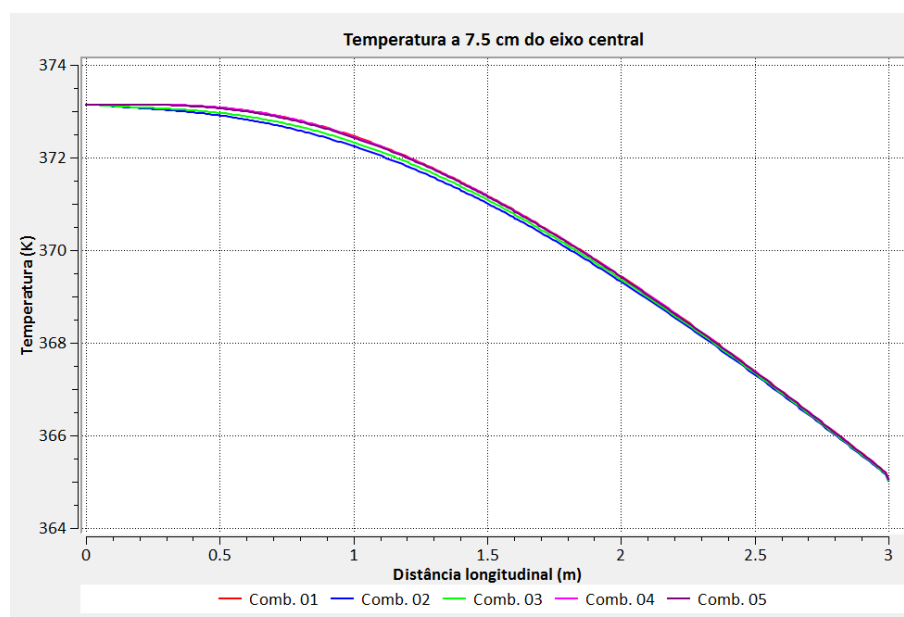


Figura 12: Efeito das técnicas de discretização sobre a temperatura ao longo do tubo, a 7,5 cm do eixo central.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema de escoamento e transferência de calor em um tubo cilíndrico foi resolvido usando o Ansys Fluent. O teste de independência de malha indicou que acima de 3000 elementos quadrados os erros de discretização na solução final são baixos. Usou-se como

referência 12000 elementos para a execução das demais simulações e análises ao longo desse trabalho. Os resultados globais são apresentados abaixo

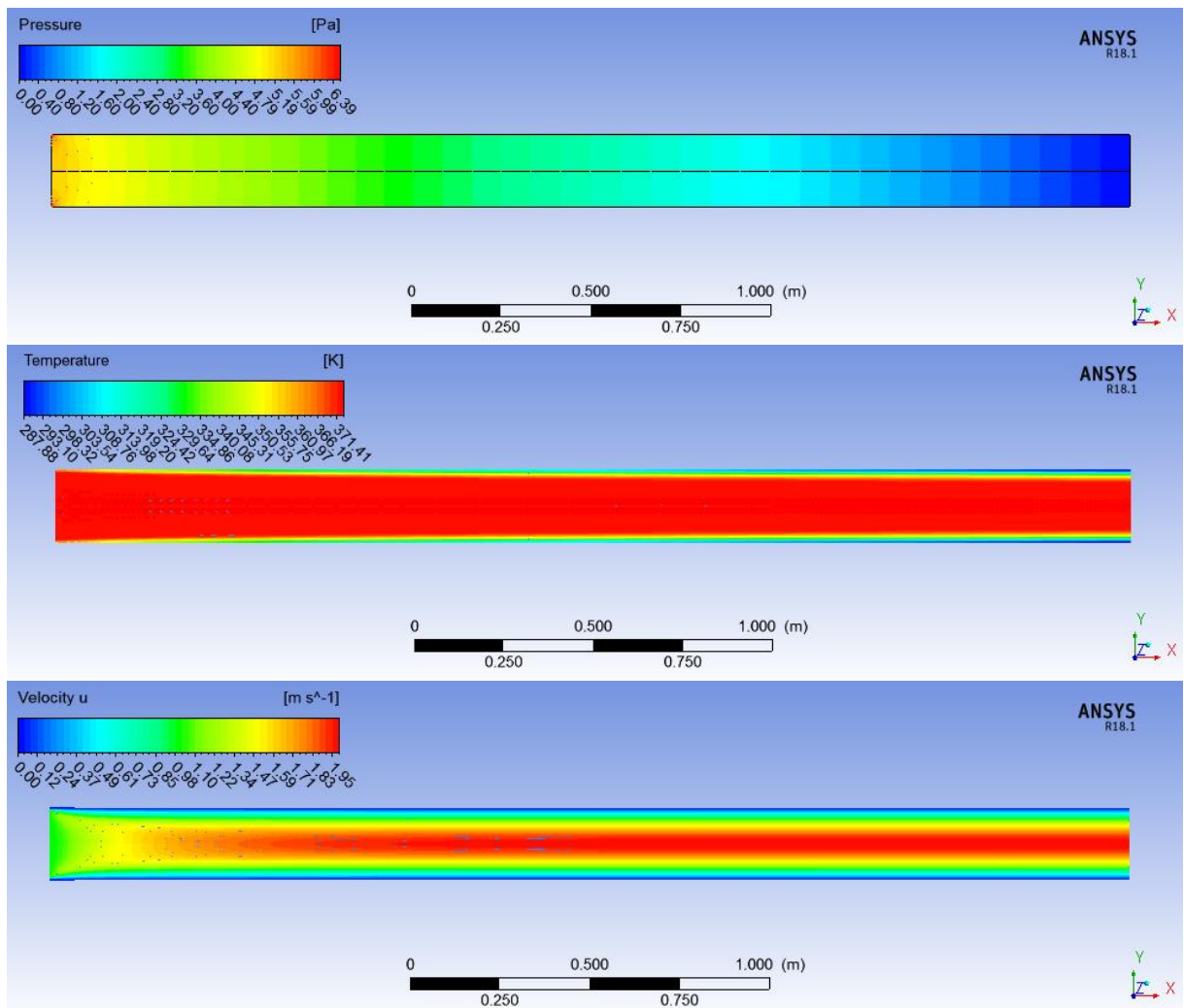


Figura 13: Pressão relativa, temperatura e velocidade axial no tubo cilíndrico estudado nesse problema.

O acoplamento pressão-velocidade foi avaliado e o principal efeito detectado foi a redução no número de iterações, ou seja, há um aumento na velocidade de convergência ao passar do acoplamento padrão SIMPLE para o acoplamento Coupled: o ganho de velocidade pode chegar a 92% de redução no número de iterações, considerando o método SIMPLER. Partindo do método SIMPLE, o ganho em velocidade é 91%.

A técnica de discretização das variáveis pressão, temperatura e velocidades também apresenta influência sobre a velocidade de convergência, mas o alcance é limitado: aqui a redução máxima atinge 23%. Não observou-se diferença detectável sobre os resultados finais.

