

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

WANDERLEY ALVES DA SILVA NETO

**ANÁLISE NUMÉRICO/COMPUTACIONAL DE UM ESCOAMENTO
EM CONTRAÇÃO ABRUPTA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

WANDERLEY ALVES DA SILVA NETO

**ANÁLISE NUMÉRICO/COMPUTACIONAL DE UM ESCOAMENTO
EM CONTRAÇÃO ABRUPTA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Lourenço

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE NUMÉRICO/COMPUTACIONAL DE UM ESCOAMENTO
NEWTONIANO EM CONTRAÇÃO ABRUPTA**

POR

WANDERLEY ALVES DA SILVA NETO

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 14 hs do dia 14 de Junho de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECÂNICO, linha de pesquisa - Dinâmica de fluidos computadorizada, no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Lourenço - Presidente (UTFPR)

Prof. Dr. Henrique Cotait Razuk (UTFPR)

Prof. Dr. Rubens Gallo (UTFPR)
(UTFPR)

“A Folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação de Curso.”

Dedico este trabalho à minha família, amigos, professores e a todos que puderem ser beneficiados de alguma forma com ele.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Alessandra Klippel Bueno e Fernando C. Bueno por me ensinarem o valor da educação, responsabilidade, caráter, honestidade e humildade.

Agradeço também, ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Lourenço, que sempre foi muito prestativo e solícito com minha pessoa.

Aos meus amigos de faculdade, que se tornaram uma segunda família para mim.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio pelos conhecimentos e conselhos compartilhados ao longo desses anos.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento e a realização desta pesquisa.

EPÍGRAFE

“Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo, não precisa temer o resultado de cem batalhas. Se você se conhece, mas não conhece o inimigo, para cada vitória ganha sofrerá também uma derrota. Se você não conhece nem o inimigo nem a si mesmo, perderá todas as batalhas”

(Sun Tzu)

RESUMO

NETO, Wanderley Alves da Silva. **Análise numérico computacional de um escoamento em contração abrupta**. 2017. 37p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2017.

Neste trabalho é apresentada uma análise numérico/computacional em um escoamento de um fluido newtoniano (água) em uma região de contração abrupta axissimétrica com razão de contração de $\beta = 1,97$ e dois números de Reynolds a montante da contração, nos valores de 5300 e 10000. O método de discretização utilizado foi o Método dos Volumes Finitos com o auxílio do software livre OpenFOAM. Escoamentos em contração são muito frequentes em processos de extrusão, trocadores de calor, resfriadores de gases e líquidos, extração de petróleo, entre outros. Para a realização do trabalho foi separado três etapas de estudo, primeiro o pré-processamento relacionado à geração de malha computacional, depois o processamento relacionado à etapa da simulação em si e por último o pós-processamento relacionado à extração dos resultados simulados, com a ajuda do software VisIt. Os perfis de velocidades, avaliados ao longo da tubulação, apresentaram boa concordância quando comparados com resultados encontrados na literatura. Observou-se também, a presença de recirculação a montante da contração e *vena contracta* a jusante. Dessa forma, esse trabalho visa complementar dados e informações dos efeitos da contração nesse tipo de escoamento para estudos futuros mais complexos.

Palavras-chave: Simulação por Volumes Finitos, contração abrupta axissimétrica, escoamento newtoniano, OpenFOAM.

. ABSTRACT

NETO, Wanderley Alves da Silva. **Análise numérico computacional de um escoamento em contração abrupta**. 2017. 37p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2017.

In this work, a numerical/computational analysis is presented on a flow of a Newtonian fluid (water) in a region of abrupt axisymmetric contraction with contraction ratio of $\beta = 1,97$ and two Reynolds numbers upstream of the contraction, at the values of 5300 and 10000. The method of discretization used was the finite volumes method with the aid of free software OpenFOAM. Flow in contraction are very common in extrusion processes, heat exchangers, liquid na gas coolers, oil extraction, among others. For the accomplishment of the work three stages of study were separated, first the preprocessing related to the generation of computational mesh, then the processing related to the stage of the simulation itself and finally the postprocessing related to the extraction of the simulated results, with the VisIt software help. The velocity profiles evaluated along the tubing presented good agreement when compared with results found in the literature. It was also observed the presence of recirculation upstream of contraction and *vein contracted* downstream. Thus, this work aims to complemente data and information on the effects of contraction in this type of flow for more complex future studies.

Keywords: Simulation by finite volumes method, abrupt axisymmetric contraction, newtonian flow, OpenFOAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da geometria de estudo	12
Figura 2 –(a) Representação do escoamento na geometria estudada (b) Distribuição de pressão	18
Figura 3 – Vista lateral da malha utilizada na solução do problema	27
Figura 4 – Vista axial da malha utilizada no problema de contração.....	28
Figura 5 – Esquema com geometria e condições de contorno	28
Figura 6 – Curva de pressão para Reynolds igual a 5300	30
Figura 7 – Curva de pressão para Reynolds igual a 10000	31
Figura 8 – Curva de magnitude do campo de velocidade para $Re = 5300$	33
Figura 9 – Curva de magnitude do campo de velocidade para $Re = 10000$	34
Figura 10 – Representação 2D da velocidade radial para $Re = 10000$	35
Figura 11 – Curva de velocidade radial para $Re = 10000$	36
Figura 12 – Linhas de vetores da velocidade de escoamento.....	38
Figura 13 – Linhas de corrente para $Re = 10000$	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Conceitos básicos.....	15
3.2 Estudos anteriores	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
4.1 Método numérico.....	23
4.2 Malha computacional.....	25
4.3 Queda de pressão.....	29
4.4 Campo de velocidade.....	32
4.5 Módulo do vetor velocidade e linhas de corrente.....	37
5 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos se constitui como uma das áreas mais abrangentes da engenharia. A humanidade, desde muito tempo, demonstrou seu interesse por esta ciência, como pode ser visto nos estudos de Arquimedes (285-212 a.c.) sobre as leis para flutuação de um corpo, Leonardo da Vinci (1452-1519), com a equação da conservação da massa em escoamento permanente unidimensional, até Ludwig Prandtl (1875-1953) que publicou um artigo, talvez o mais importante já escrito, sobre mecânica dos fluidos, com a Teoria de Camada Limite.

A essência do estudo do escoamento dos fluidos é o compromisso criterioso entre a teoria e a experimentação. Como o escoamento dos fluidos é um ramo da mecânica, ele satisfaz a um conjunto de leis fundamentais bem definidas e, portanto, temos disponível uma grande quantidade de tratados teóricos (WHITE, 2002). Porém, grande parte desta teoria se aplica somente em situações idealizadas, devido à dificuldade na derivação de soluções analíticas. As equações básicas do movimento dos fluidos são muito complexas para que se possa fazer uma escolha arbitrária em diferentes configurações geométricas.

Nas últimas décadas, surgiu a possibilidade de se utilizar os computadores no estudo da mecânica dos fluidos, dado o avanço na capacidade de processamento (Lei de Moore) e armazenamento destes. Notavelmente, esta área de estudo computacional se estendeu a tal ponto, que hoje o uso de computadores na simulação de escoamentos se tornou uma generalidade. Esse campo é conhecido como a *Dinâmica dos Fluidos Computacional* (CFD), e consiste em uma gama de metodologias para resolver as equações que descrevem diversos fenômenos relacionados ao escoamento de fluidos.

Com o avanço no estudo de CFD, é possível fazer análises de diversos tipos e configurações de escoamentos. Uma dessas configurações é o escoamento de um fluido newtoniano em contrações abruptas, de presença frequente em diversas aplicações práticas, como moldagem, extrusão, resfriadores de gases e líquidos, escoamentos internos em geral e até em modelos simples de brocas utilizadas na perfuração de poços para exploração de petróleo.

A presença de contrações abruptas como parte de um sistema, como já é bem sabido, produz perdas de energia, mais comumente conhecidas por perdas de carga. Estas são geradas devido à presença de recirculações, cujos efeitos podem ser notados tanto na seção a montante assim como a jusante de uma determinada contração (PALACIOS S, 2011).

O parâmetro geométrico que caracteriza o escoamento de fluidos em contrações é a razão de contração, definida como $\beta = (D/d)$ onde D é o diâmetro de entrada da contração e d é o diâmetro de saída da mesma, como pode ser visto na Fig.1:

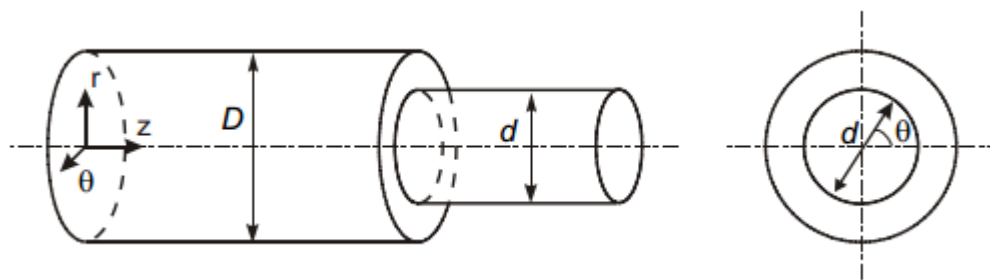


Figura 1 - Representação da geometria de estudo

Fonte - Adaptado de Palacios et al. (2011)

Vórtices, que aparecem a montante da contração, são dependentes do número de Reynolds, do tipo de fluido e dos parâmetros geométricos da contração (BOGER, 1987). Para escoamentos laminares observa-se um

aumento do comprimento do vórtice quando se aumenta o número de Reynolds, já para escoamentos turbulentos ocorre o contrário, o comprimento do vórtice diminui com o aumento do número de Reynolds. Essas tendências dos comprimentos dos vórtices foram encontradas numericamente por IHS ESDU(2003), o qual utilizou uma razão de contração de $\beta = 1,87$.

Embora o escoamento em contrações abruptas seja frequentemente encontrado em aplicações práticas, encontram-se poucos trabalhos na literatura que abordam sobre os efeitos da contração no comportamento do escoamento e qual a relação da razão de contração com os parâmetros que compõem uma análise comportamental de um escoamento.

Este assunto é de grande importância, pois escoamentos altamente turbulentos e com altas velocidades podem ocasionar erosões ou mesmo cavitações na estrutura que comporta o escoamento. Como é o caso da exploração e produção de petróleo no oceano, em que são usados risers acoplados em tubulações cilíndricas com presença de regiões de contração abrupta. Na etapa de perfuração de poços, o caminho seguido pelo fluido de perfuração através dos canais internos da broca implica na passagem por contrações súbitas; ocorre também a passagem de sedimentos rochosos pela tubulação cilíndrica, que em certas ocasiões podem danificar a parede desta tubulação.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é fazer um estudo do escoamento para Reynolds nos valores de 5300 e 10000 e fazer um comparativo com o trabalho de Palacios et al. (2011) analisando a influência da região de contração no comportamento do escoamento e poder incrementar na literatura novas informações referentes a esse tipo de escoamento e os efeitos que a contração abrupta causa no sistema.

2. OBJETIVOS

No presente trabalho é investigado através de simulações computacionais, o escoamento de fluido newtoniano (água) incompressível, em regime turbulento, situado em uma geometria que apresenta uma contração abrupta axissimétrica de razão $\beta = 1,97$, com o uso do software livre OpenFOAM de CFD(Computational Fluid Dynamics), que de forma geral é a simulação numérica de todos aqueles processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento.

Na literatura, encontra-se muitos trabalhos relacionados a esse tipo de situação. Os quais identificaram a presença de regiões de recirculações ou vórtices, chamadas regiões de escoamento secundário situadas a montante próximo à contração e observaram também, a formação de uma região denominada *vena contracta*, um fenômeno que forma um jato semelhante aos dos escoamentos em orifícios, o que torna a seção útil do escoamento menor e, conseqüentemente, ocasiona o aumento da velocidade de escoamento na região a jusante logo após a contração, e por fim uma queda abrupta de pressão na contração.

As simulações foram feitas no laboratório de mecânica dos fluidos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio. O trabalho foi desenvolvido com o intuito de fornecer subsídios para análises mais complexas do escoamento newtoniano em região de contração abrupta axissimétrica para diferentes razões de contração (β) e diferentes números de Reynolds.

Para atingir os objetivos propostos, foi necessário usar as equações de Navier-Stokes no contexto dos volumes finitos por meio do aplicativo livre OpenFOAM, analisar cuidadosamente os parâmetros que regem o escoamento nesse tipo de geometria, como a demarcação da região de contorno, a

definição das condições iniciais do escoamento para uma correta interpretação do software na hora de simular e o refinamento das malhas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste presente capítulo serão apresentados alguns estudos anteriores que tiveram grande influência no avanço do conhecimento do comportamento dos fluidos newtonianos em regiões de contrações abruptas axissimétricas, assim como alguns conceitos básicos para um melhor entendimento da situação abordada.

3.1 Conceitos Básicos

O escoamento de fluidos com ou sem transferência de calor está envolvido, praticamente, em todos os processos de produção de energia, nos fenômenos ambientais, nos projetos de equipamentos térmicos, na engenharia aeronáutica e aeroespacial, engenharia de reatores, bioenergia entre outros (MALISKA, 2010).

A natureza do escoamento em tubos depende muito se o escoamento do fluido é laminar ou turbulento. Esta é uma consequência direta das diferenças entre a tensão de cisalhamento nos escoamentos laminares e àquela nos escoamentos turbulentos. Uma diferença fundamental entre o escoamento laminar e o turbulento é que a tensão de cisalhamento para o escoamento turbulento é uma função da massa específica do fluido, ρ . A tensão de cisalhamento no escoamento laminar independente da massa específica e a viscosidade torna-se a única propriedade relevante do fluido (MUSON B., 1940).

A tensão de cisalhamento no escoamento laminar é o resultado direto da transferência da quantidade de movimento provocada pelas moléculas que se

movem aleatoriamente (um fenômeno microscópico). Já a tensão de cisalhamento no escoamento turbulento é, em grande parte, resultado da transferência de quantidade de movimento entre os movimentos aleatórios de partículas fluidas de tamanhos finitos (um fenômeno macroscópico). Assim, para “pequenas vazões” (escoamento laminar), a vazão é diretamente proporcional a queda de pressão. Para “grandes vazões” (escoamento turbulento), a vazão é menos sentida pela queda de pressão (MUNSON B., 1940).

A característica mais notável da turbulência é sua natureza irregular e aleatória. Sem a turbulência seria virtualmente impossível termos a vida como a conhecemos. Em algumas situações, o escoamento turbulento é necessário. Por exemplo, para transferir a taxa de transferência de calor necessária de um sólido para um fluido (como nas serpentinas do resfriador de um ar condicionado ou nos tubos da caldeira de uma termoelétrica) seria necessária uma enorme área de transferência de calor se o escoamento fosse laminar.

O presente trabalho estuda um escoamento newtoniano, incompressível e desprovido de viscosidade para facilitar no equacionamento do movimento do fluido, já que os efeitos de inércia têm “pequenos” impactos associados a aleatoriedade do escoamento turbulento. Isso é verdade por causa das acelerações e desacelerações relativamente grandes sofridas pelo fluido enquanto escoar por trajetórias com áreas variáveis. A velocidade utilizada nos cálculos é a velocidade média temporal do escoamento. Como já é sabido um fluido newtoniano tem como característica a proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, tendo como constante de proporcionalidade a *viscosidade absoluta* (ou dinâmica), μ .

A incompressibilidade se deve ao fato da massa específica do fluido de trabalho, água no caso, não ser função nem das coordenadas espaciais e nem do tempo (WHITE, 2002).

Para o caso de um escoamento incompressível, no qual as variações de massa dentro do volume de controle são desprezíveis, pode-se simplificar a equação da conservação da massa como (FOX E MCDONALD, 1998):

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

Outra equação importante para o estudo do escoamento é a equação do balanço da quantidade de movimento, como mostrado a seguir (FOX E MCDONALD, 1998):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

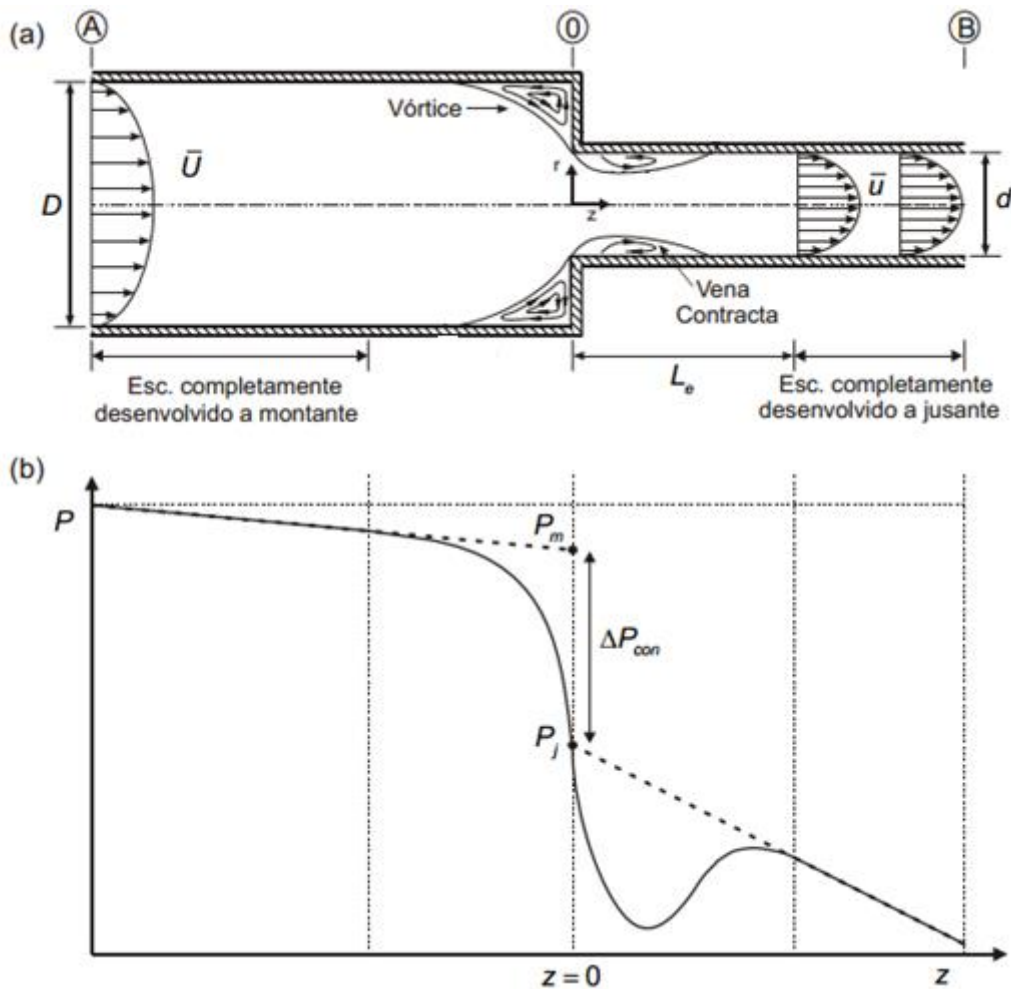
Onde \mathbf{u} , P , ρ , ν são o vetor velocidade, a pressão, a massa específica e a viscosidade cinemática do fluido, respectivamente. Estas duas últimas são tomadas como uniformes em todo o domínio e constantes no tempo.

Como já visto anteriormente, o parâmetro geométrico que caracteriza o escoamento de fluidos em contrações é a razão de contração, definida como:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (3)$$

Onde D é o diâmetro de entrada da contração e d é o diâmetro de saída, como apresentado na Fig.2 de (PALACIOS S, 2011):

Figura 2- (a) Representação do escoamento na geometria estudada. (b) Distribuição de pressão.



Fonte - Palacios et al. (2011)

Como mostrado na Fig.2(a), a passagem do escoamento para uma região de área menor, como é o caso de uma contração, gera a formação de recirculações devido à separação das linhas de corrente na região a jusante. Essas recirculações produzem uma região de área mínima, denominada *vena contracta*, em que ocorre a convergência das linhas de corrente, acelerando o fluido nessa região. Após passar pela *vena contracta* as linhas de corrente começam a se expandir, a fim de preencherem o espaço da seção corrente a jusante, ocasionando na desaceleração do fluido (PALACIOS S, 2011). Um ponto muito importante nessa fase é a definição do comprimento de

desenvolvimento (L_e), pois ele irá garantir na simulação que o escoamento esteja completamente desenvolvido a jusante. Ele é definido como a distância requerida, medida desde o plano de contração, $z = 0$, a fim de permitir que a velocidade na linha de centro se torne 98 ou 99% do seu valor completamente desenvolvido à jusante (BOGER, 1987). Na Fig.2(b) percebe-se uma queda brusca de pressão decorrente da mudança abrupta de direção e da magnitude da velocidade do fluido na sua passagem pela contração.

Muitas tubulações contêm várias seções de transição, como no caso em que o diâmetro do tubo de alimentação é diferente do de descarga. Estas mudanças de diâmetros podem ocorrer abruptamente ou suavemente. Qualquer mudança na área de escoamento introduz perdas energéticas, no qual o seu coeficiente é dependente da geometria.

Em tubulações ocorre perdas energéticas denominadas perdas de cargas, que são subdivididas em perdas distribuídas e perdas localizadas. Essas perdas expressam o decaimento da energia dinâmica do fluido devido à fricção das partículas entre si e contra as paredes da tubulação. A mudança brusca de seção provoca grandes perdas energéticas localizadas, devido à formação da *vena contracta*, como pode ser observado na Fig.2(b). Essas perdas localizadas são dependentes das características geométricas e do número de Reynolds e podem ser expressas como (FOX E MCDONALD, 1998):

$$h_l = k \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (4)$$

Sendo, h_l a perda de carga localizada, k o coeficiente de perda de pressão, geralmente determinado experimentalmente, \bar{V} a velocidade média do escoamento e g a aceleração da gravidade.

Na Fig.2(b), pode-se verificar os efeitos da perda de carga distribuída na pressão, em que essa sofre uma perda energética linear a montante, longe do plano de contração, na região onde o escoamento está completamente desenvolvido. Na localidade a jusante, longe do plano de contração, na região

após o comprimento de desenvolvimento (L_e) nota-se um comportamento linear decrescente, com inclinação maior que no caso a montante. Isso ocorre porque a parte a jusante possui menor diâmetro, sofrendo maior influência do atrito da tubulação, caracterizando maior perda de carga distribuída (PALACIOS S, 2011).

Tomando conhecimento dos conceitos básicos para um melhor entendimento do trabalho, serão agora apresentados alguns trabalhos relacionados ao escoamento de fluidos newtonianos em uma contração abrupta.

3.2 Estudos Anteriores

Desde o final do século XVIII há o interesse no estudo e compreensão dos fenômenos que acontecem em situações que envolvem geometrias diferentes, como no caso da contração presente nesse trabalho. Pesquisadores como Hagenback, Boussinesq e Couette estudaram a queda de pressão produzida na passagem do escoamento de fluidos em contrações abruptas. Suas pesquisas foram motivadas pelo interesse em desenvolver reômetros capilares a fim de medir de forma precisa a viscosidade de fluidos newtonianos (BOGER, 1987).

Astarita e Greco (1968) avaliaram experimentalmente a queda de pressão em uma contração com $\beta = 2,49$, em regime laminar, com valores de Reynolds variando entre $10 < Re_d < 2000$. Os fluidos newtonianos usados foram água e uma mistura de água com glicerina. Os resultados mostraram duas zonas de influência do número de Reynolds. Para $Re_d < 146$, observou-se que o número de Reynolds é inversamente proporcional à queda de pressão. Foi identificado também a presença da *vena contracta* na região a jusante da contração.

Outros trabalhos focaram no estudo da relação do coeficiente de perda de pressão da contração com a queda de pressão, e a influência do arredondamento da quina da contração nos resultados analisados. Um desses trabalhos foram de Bullen et al. (1987), que fizeram uma abordagem teórica e

experimental de um escoamento newtoniano, em regime turbulento, com Reynolds a montante da contração variando entre $4 \cdot 10^4 < Re_D < 2 \cdot 10^5$ e razões de contração entre $1,2 < \beta < 2,72$. Esses valores de Reynolds são definidos pela expressão $Re_D = \rho \mathbf{U} D / \mu$. Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que o valor do coeficiente de perda de pressão é dependente do número de Reynolds, entretanto, essa dependência diminui com o aumento do número de Reynolds. O arredondamento da quina surtiu efeitos positivos no valor do coeficiente de perda de pressão.

Posteriormente, com o avanço tecnológico e científico no estudo da mecânica dos fluidos, surgiram novas técnicas para uma análise mais detalhada e com mais qualidade do escoamento (PALACIOS S, 2011). Dentre elas podem ser mencionadas a Dinâmica dos Fluidos Computadorizada (DFC), com softwares como Ansys e OpenFOAM; A anemometria Laser-Doppler (ALD) e a Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP).

Com esses avanços, Bullen et al. (1996) realizaram um outro trabalho, utilizando a técnica ALD, para determinar experimentalmente o coeficiente de perda de pressão. A razão de contração usada foi $\beta = 1,73$ e $Re_D = 153800$. Com essa técnica foi possível medir as grandezas do escoamento, como velocidade axial e radial, flutuações da velocidade e as tensões de Reynolds, em diferentes posições axiais ao longo da geometria estudada. Concluíram que o escoamento sofreu aceleração na região da contração e houve presença de *vena contracta*.

O modelo numérico consiste na reprodução do escoamento estudado num ambiente computacional, conhecido como Dinâmica dos Fluidos Computadorizada (DFC). A experimentação numérica praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com uma rapidez fascinante (MALISKA, 2010).

Ajayi et al. (1998) estudaram numericamente o escoamento turbulento de um fluido newtoniano em uma contração abrupta de razão $\beta = 2$ e com $Re_D = 5300$. Utilizaram o método dos volumes finitos (MVF) para resolver as equações de Navier-Stokes e o método *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE) para a solução do problema de acoplamento pressão-

velocidade (FERZIGER, 1996). Os resultados obtidos apontam que o aumento do número de Reynolds provoca, aparentemente, uma atenuação da zona de recirculação. Entretanto, a alta turbulência exige um comprimento de desenvolvimento, L_e , maior para que se possa garantir a total convergência da solução na saída do escoamento (PALACIOS S, 2010).

No trabalho de Palacios et al. (2011), foi realizado um estudo experimental de um escoamento newtoniano numa região de contração abrupta, com razão de contração de $\beta = 1,97$ e número de Reynolds na faixa $5300 \leq Re_D \leq 40065$, utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV), a fim de observar e comparar as tendências calculadas entre os diferentes campos de velocidade medidos para diferentes número de Reynolds. Foi observado que a velocidade axial adimensionalizada com a velocidade \bar{U} , u/\bar{U} , apresenta seus valores máximos sobre a linha de centro ($r/D = 0$), aumentando significativamente na medida em que se aproxima da contração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados numéricos obtidos através de uma simulação computacional no OpenFOAM do comportamento de um fluido newtoniano, com números de Reynolds igual a 5300 e 10000, numa região de contração abrupta. É feito também uma análise do trabalho de Palacios et al (2011) para que se possa validar os resultados numéricos e ser de grande valia para futuros trabalhos.

4.1 Método numérico

O modelo numérico consiste na reprodução do escoamento estudado num ambiente computacional, conhecido como Dinâmica dos fluidos computadorizada (DFC), que consiste na criação da geometria por meio de um software; geração de uma malha computacional com o auxílio do software aberto OpenFOAM; implementação do modelo físico no qual o escoamento está sujeito; utilização de métodos numéricos no modelo matemático, para a obtenção de um resultado numérico; análise dos resultados numéricos obtidos e uso do módulo de pós-processamento do software VisIt.

A tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Quando não é possível a solução analítica, e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceita-se ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro,

esperando que quanto maior for este número de pontos, mais próximo da solução exata será a solução numérica (MALISKA, 2004).

O processo de discretização da geometria foi desenvolvido em conjunto com um estudo de simplificação e de independência de malha, visando criar um modelo de simulação robusto e de baixo custo computacional. A discretização das equações governantes foi realizada por meio do método dos volumes finitos (MVF) com malhas deslocadas (Patankar, 1980) e o esquema híbrido de interpolação para os termos convectivos. Esta alternativa permite uma solução conservativa para o campo de pressão e velocidade, uma vez que no MVF as equações a serem integradas são baseadas nos fluxos das propriedades em cada um dos volumes de controle que compõem o domínio computacional (SILVA, 2008).

De modo a resolver o problema de uma forma mais eficiente, a partir da natureza quase axissimétrica do problema, foi decidido que seria resolvido somente um quarto da região polar do domínio apresentado. Nesse caso, foram testadas duas condições de contorno para as faces axissimétricas, das quais deliberou-se pela utilização da condição de periodicidade. Dessa forma $\frac{3}{4}$ do problema não precisou ser resolvido, economizando tempo e gasto computacional.

O solver utilizado para a solução das equações governantes, simpleFoam, é baseado no algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), o qual primeiro calcula a componente da velocidade a partir da equação do momento através de um palpite no valor da pressão. As pressões e velocidades são então corrigidas até atingir a convergência da solução (Ceretto et al., 1972). Neste, a solução buscada é do tipo em regime permanente, quando a variação média das propriedades se torna desprezível. Para os presentes resultados, a simulação entrou em regime permanente em cerca de 20640 iterações de solução para Reynolds igual a 5300 e 16640 para Reynolds igual a 10000.

Para resolver o problema do acoplamento pressão-velocidade, oriundo do algoritmo SIMPLE, foi utilizado um pré-condicionador do tipo Multigrid Algébrico

(AMG), que tornou bem mais rápida a solução, mesmo em um computador pessoal comum.

A solução das equações de conservação em cada um dos volumes de controle da malha envolve a solução de um sistema linear do tipo $Ax = b$. Em DFC emprega-se a solução iterativa do sistema de equações, o qual resulta em um sistema sob a forma $Ax - b = r$, onde r é o resíduo em uma determinada iteração. Esse resíduo se deve ao fato de existir diferença entre a equação discretizada e a equação exata. Diz-se que uma solução convergiu quando o resíduo atinge um valor abaixo de um critério previamente especificado pelo usuário (MALISKA, 2004).

Para monitorar a convergência da solução foi utilizado um controle de convergência de iteração dos resíduos globais normalizados de cada equação. A solução é considerada convergida para as equações da quantidade de movimento quando a soma dos resíduos locais para cada variável é menor que 1.10^{-3} (Rigoberto E., 2015). De modo geral, a conservação da massa nas últimas iterações ficou na ordem de 1.10^{-6} que reflete, de modo quantitativo um comportamento coerente para a convergência da solução.

4.2 Malha Computacional

Todo modelo de escoamento envolve equações diferenciais parciais (EDP) sujeitas às condições iniciais e de contorno do problema em questão. As condições de contorno dizem respeito às regiões que delimitam a geometria (superfícies) do problema físico.

No presente trabalho esta região coincide com o domínio computacional utilizado, o qual, para aplicação do Método de Volumes Finitos, deverá ser discretizado na forma de uma malha numérica. O método mais simples, para se gerar uma malha computacional é fazê-la manualmente, desenhando a

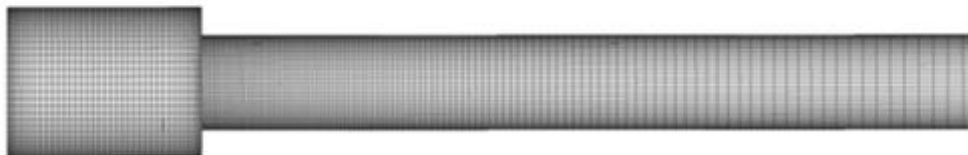
geometria que se deseja discretizar numa folha de papel milimetrado, identificando as coordenadas de cada ponto formado pela intersecção de várias linhas que representam toda região da geometria desejada. Essas coordenadas então são informadas ao computador, que automaticamente são lidas formando a malha computacional da geometria (MALISKA, 1995).

Quanto à classificação das malhas, uma malha dita estruturada é quando cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma sequência natural. E quando se diz que uma malha é não-estruturada, temos o número de vizinhos variando de volume para volume, ficando difícil estabelecer uma regra de ordenação (BORTOLI, 2000).

No presente trabalho foi utilizado uma malha bloco estruturada, na qual cada volume de controle possui a forma de hexaedro. A geometria do problema apresenta variação de áreas devido ao plano de contração, sendo diâmetro de entrada, $D = 23,9\text{mm}$ e o diâmetro de saída, $d = 12,13\text{mm}$. O comprimento de entrada, antes da contração foi definido como sendo maior que $1,3D$, pois segundo medidas experimentais realizadas por Durst e Loy (1985), a essa distância, as velocidades não são afetadas pela contração. Para o comprimento de saída, após a contração, definiu-se uma distância maior que $10D$ para garantir, segundo Durst e Loy (1985) que a condição de contorno utilizado na saída não influenciasse nos resultados, e garantisse um desenvolvimento completo do escoamento.

Utilizando o recurso blockMesh do OpenFOAM, foi possível a criação do domínio computacional para o problema. Tal abordagem permite a construção e refinamento de malhas bloco estruturadas do tipo hexaédricas, a partir de um arquivo de texto. A malha utilizada no presente trabalho é mostrada na Fig.3:

Figura 3 - Vista lateral da malha utilizada na solução do problema.

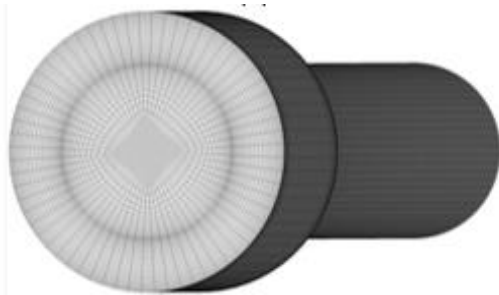


Fonte: Autoria própria.

A malha computacional é não-uniforme nas direções “r” e “x”, onde concentrou-se o maior número de volumes de controle na região de contração, lugar em que ocorre o maior gradiente das velocidades e pressão. Na Fig.3 pode-se observar a região na qual a malha é melhor refinada próximo a entrada do escoamento e também na região de contração. Isso foi feito de modo a representar bem a condição de contorno na entrada, assim como as estruturas características desse problema na região de contração.

Após uma análise da sensibilidade do refinamento da malha nos resultados numéricos, foi utilizado uma malha não-uniforme com 120 volumes na direção axial, o que, após alguns testes de convergência do perfil de pressão, se mostrou aceitável para a referida simulação. Uma vista do refinamento axial da malha é apresentada na Fig.4:

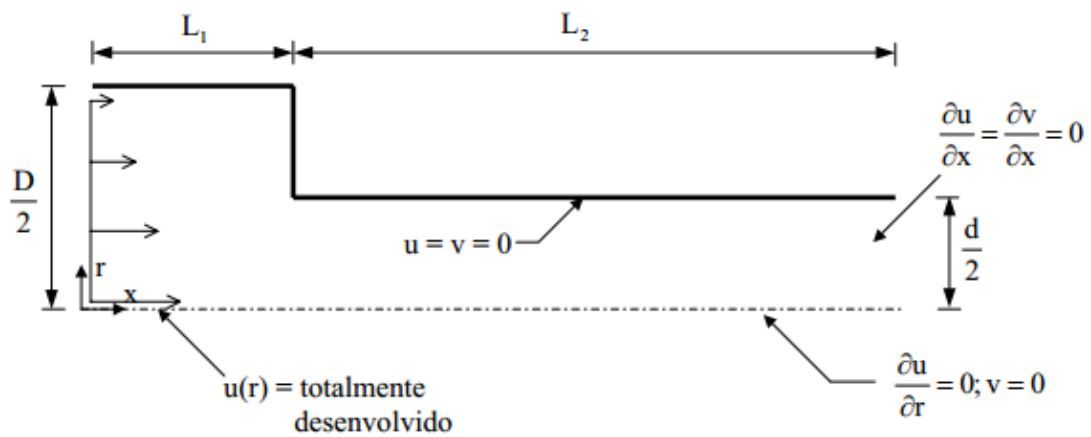
Figura 4 - Vista axial da malha utilizada no problema de contração



Fonte: Autoria própria

As condições de contorno consideradas no trabalho, são mostradas na Fig.5:

Figura 5 - Esquema com a geometria e condições de contorno.



Fonte: Rigoberto E. M. Morales (2015)

As condições de contorno consideradas são:

Velocidades nulas nas paredes ($u = v = 0$);

Escoamento simétrico $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$; $v = 0$;

O perfil de velocidade longitudinal é considerado completamente desenvolvido na entrada da tubulação

$$u = u_{m\acute{a}x} \left(1 - \left(\frac{2r}{D}\right)^2\right) \quad (5)$$

Onde D é o diâmetro maior do tubo e $u_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima no centro do tubo.

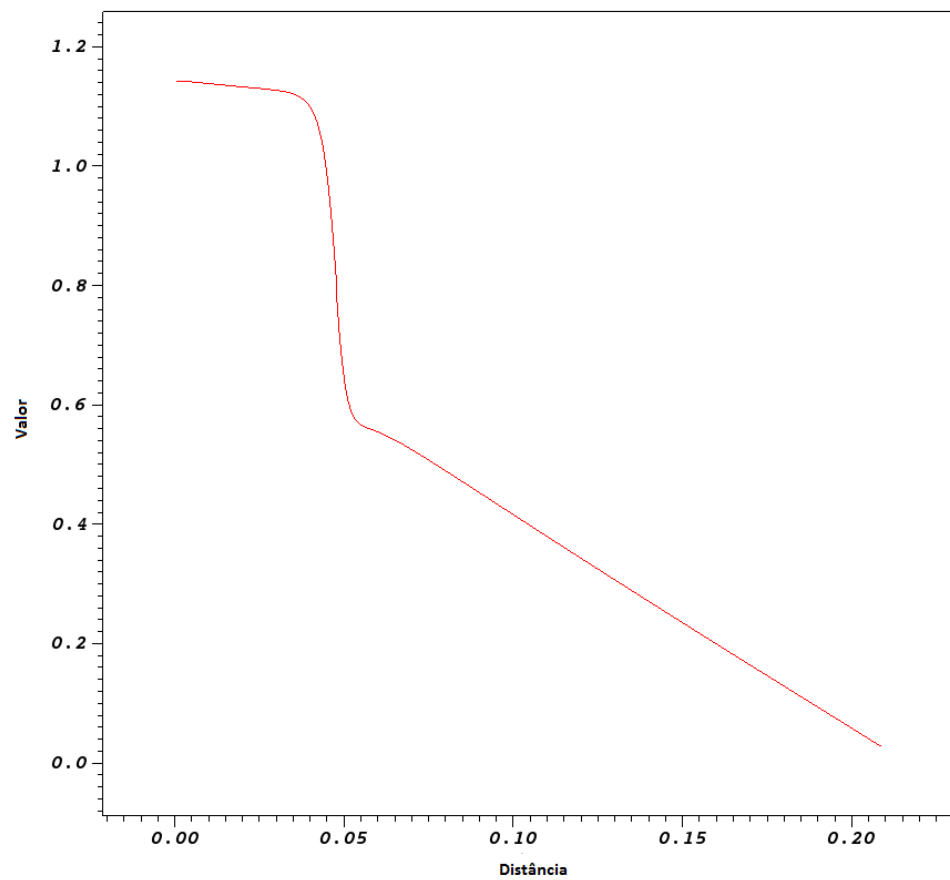
4.3 Queda de Pressão

Na Fig.2(b) percebe-se uma queda brusca de pressão decorrente da mudança abrupta de direção e da magnitude da velocidade do fluido na sua passagem pela contração. Em que se nota a existência de uma distribuição quase quadrática na tubulação de menor diâmetro, devida principalmente às perdas distribuídas, enquanto que as perdas singulares, na região da contração são muito mais pronunciadas. Essa queda de pressão é dependente das características geométricas e do número de Reynolds (FOX, 1998).

Na Fig.2(b), pode-se verificar os efeitos da perda de carga distribuída na pressão, em que essa sofre uma perda energética linear a montante, longe do plano de contração, na região onde o escoamento está completamente desenvolvido. Na localidade a jusante, longe do plano de contração, na região após o comprimento de desenvolvimento (L_e) nota-se um comportamento linear decrescente, com inclinação angular da reta maior que no caso a montante. Isso ocorre porque a parte a jusante possui menor diâmetro, sofrendo maior influência do atrito da tubulação, caracterizando maior perda de carga distribuída (PALACIOS S, 2011).

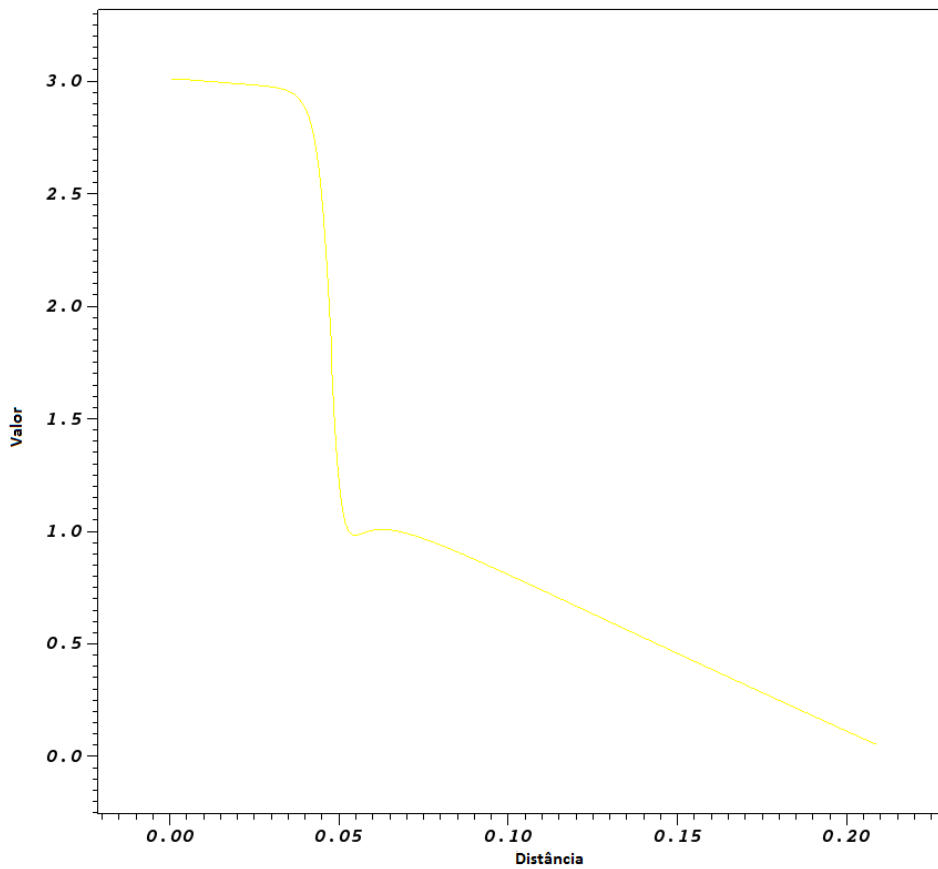
No presente trabalho, para efeitos de análise comportamental foi retirado através do software VisIt as curvas de pressão para Reynolds = [5300 e 10000] como mostrado na Fig.6:

Figura 6 - Curva de pressão para Reynolds igual 5300



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 - Curva de pressão para Reynolds igual 10000



Fonte: Autoria própria.

Analisando as duas imagens percebe-se um comportamento parecido com o obtido no trabalho de Palacios et al. (2011). Em que ocorre uma queda brusca de pressão decorrente da mudança abrupta de direção e da magnitude da velocidade do fluido na sua passagem pela contração. Em que se nota a existência de uma distribuição quase quadrática na tubulação de menor diâmetro, devida principalmente às perdas distribuídas, enquanto que as perdas singulares, na região da contração são muito mais pronunciadas. Essa queda de pressão é dependente das características geométricas e do número de Reynolds (FOX, 1998).

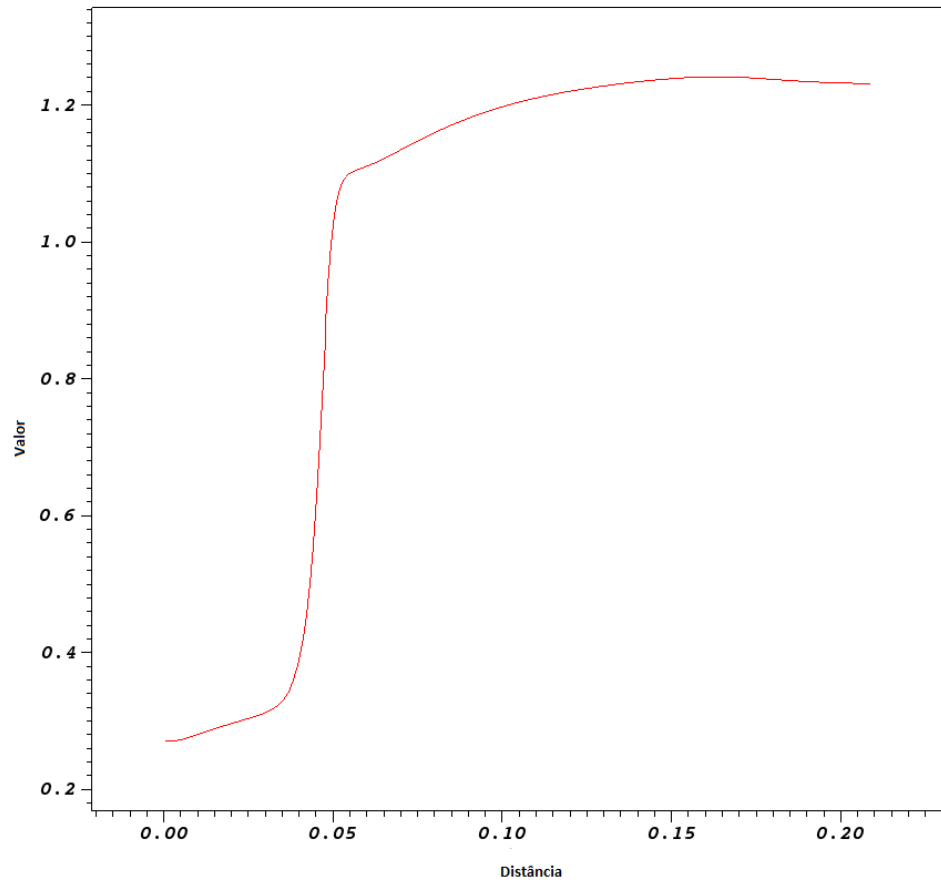
4.4 Campo de Velocidade

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com a ajuda dos softwares OpenFoam e VisIt. Os vetores velocidade e suas grandezas derivadas tais como perfis de velocidade, linhas de corrente, linhas de vetores e grandezas turbulentas, foram obtidos na região a montante do plano de contração. Em alguns casos as componentes do vetor velocidade foram adimensionalizadas em função da velocidade média do escoamento \bar{U} , para facilitar na hora de comparar com resultados da literatura.

Devido ao fato do computador da sala de laboratório de mecânica dos fluidos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Cornélio Procópio possuir pouca capacidade computacional, foi feito um refinamento mais grosseiro e utilizou-se somente $\frac{1}{4}$ da geometria do problema, fato possível por causa da simetria do problema.

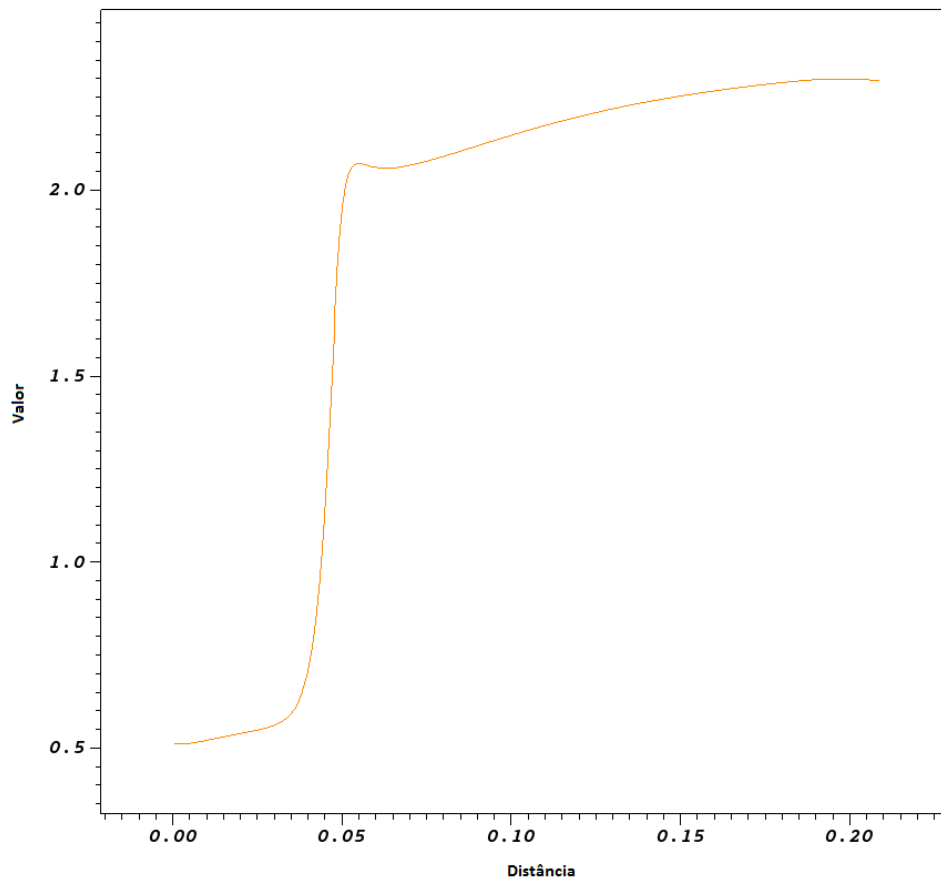
O perfil de velocidade para escoamento laminar apresenta uma característica parabólica acentuada, enquanto que para escoamento turbulento o perfil de velocidade é bastante achatado no centro e cai bruscamente a zero na parede (White, 2002). A magnitude dos campos de velocidade para os dois valores de Reynolds estudados no trabalho é apresentada a seguir:

Figura 8 - Curva da magnitude do campo de velocidade para $Re = 5300$



Fonte: Autoria própria.

Figura 9 - Curva de magnitude do campo de velocidade para $Re = 10000$



Fonte: Autoria própria.

Analisando as Fig.8 e Fig.9, identifica-se um aumento considerável da velocidade na região de contração devido à queda abrupta da pressão. Após a passagem da velocidade pela região de *vena contracta*, a mesma começa a sofrer movimentos de expansão para preencher toda a área da tubulação a jusante, em que se espera atingir a condição de escoamento plenamente desenvolvido.

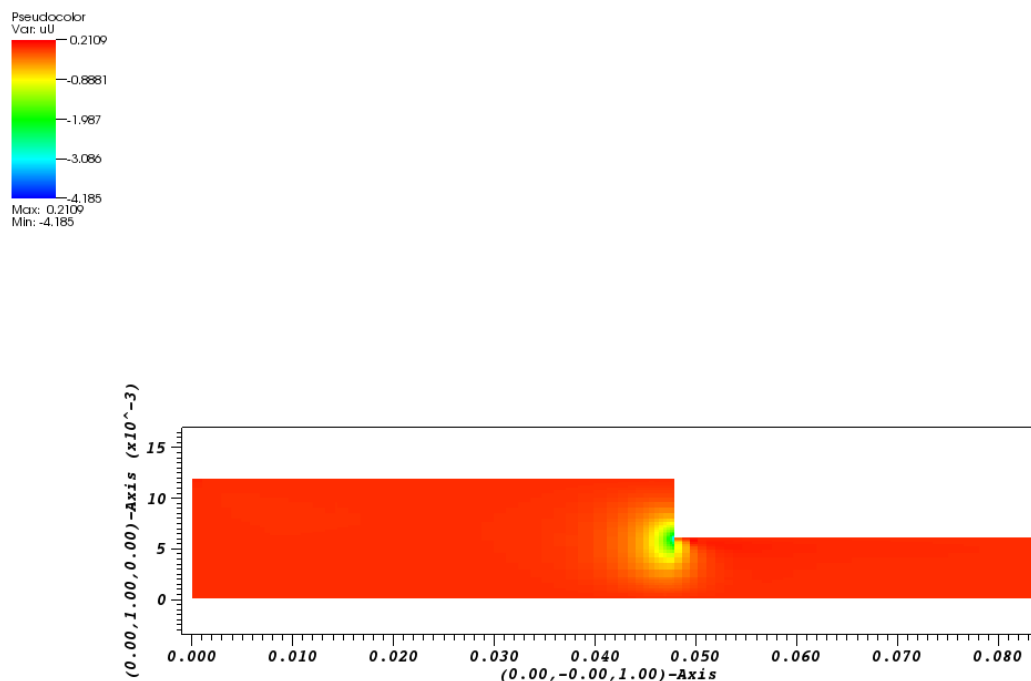
A mudança brusca de direção e magnitude da velocidade produz regiões de separação no escoamento, chamadas de regiões de escoamento secundário com presença de vórtices, como será mostrado mais a frente, as quais geram

perdas de energia que são eventualmente dissipadas pela mistura caótica nas zonas separadas. Os vórtices que aparecem a montante da contração, são dependentes do número de Reynolds, do tipo de fluido e dos parâmetros geométricos da contração (BOGER, 1987).

No presente trabalho, foi analisado o escoamento para dois números de Reynolds. A simulação com $Re = 5300$ apresentou velocidade média de escoamento $\bar{U} = 0,2218$ e $U_{máx} = 0,2715$. Já para $Re = 10000$ apresentou velocidade média de escoamento $\bar{U} = 0,4184$ e $U_{máx} = 0,5123$. Com um comprimento total da tubulação de $265,7[\text{mm}]$, sendo $0,047[\text{mm}]$ a montante da contração e $0,2187[\text{mm}]$ a jusante.

A velocidade radial do escoamento apresenta um comportamento diferente da velocidade axial, como mostrado na Fig.10:

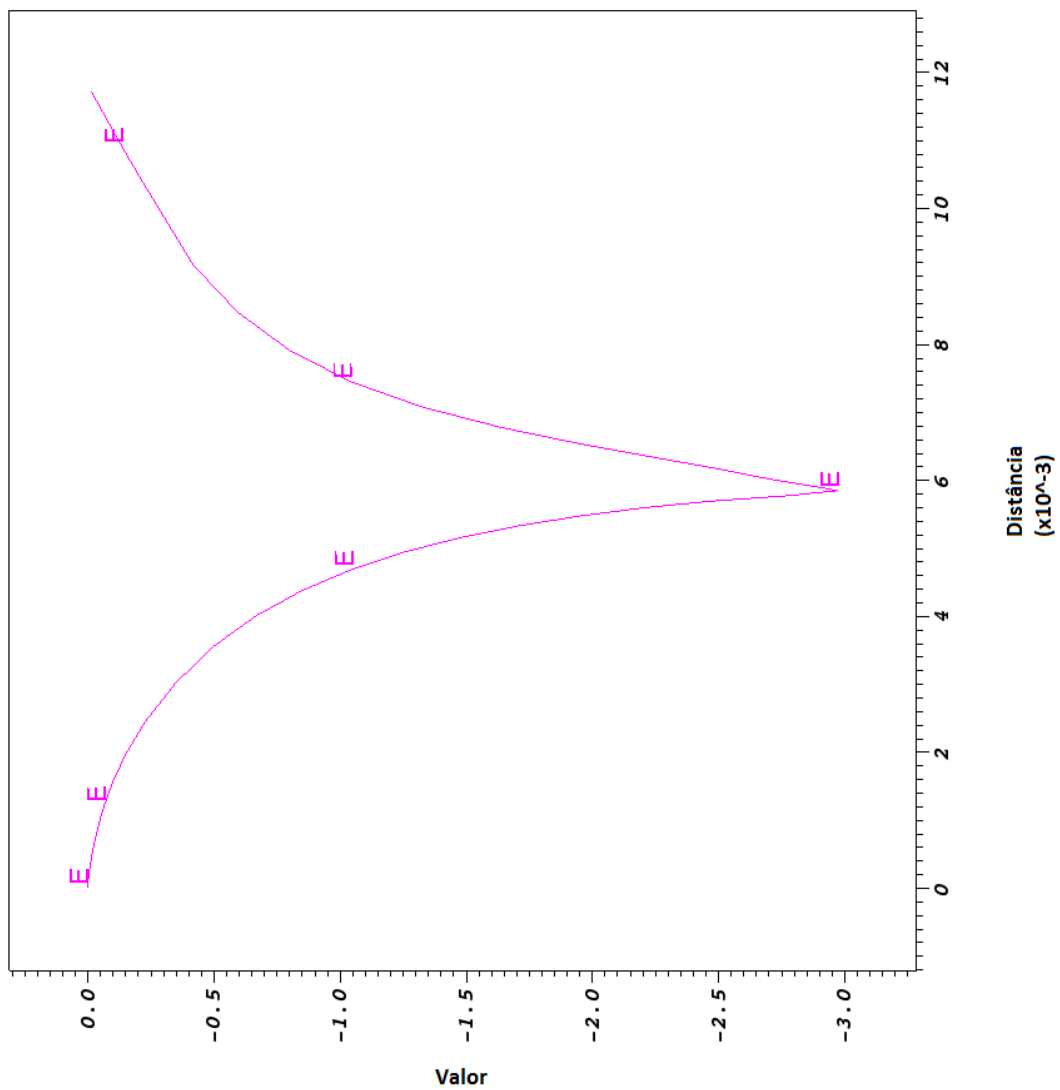
Figura 10 - Representação 2D da velocidade radial para $Re = 10000$



Fonte: Autoria própria.

Para efeitos de análise foi gerado uma curva da velocidade radial, como visto na Fig.11:

Figura 11 - Curva da velocidade radial para $Re = 10000$



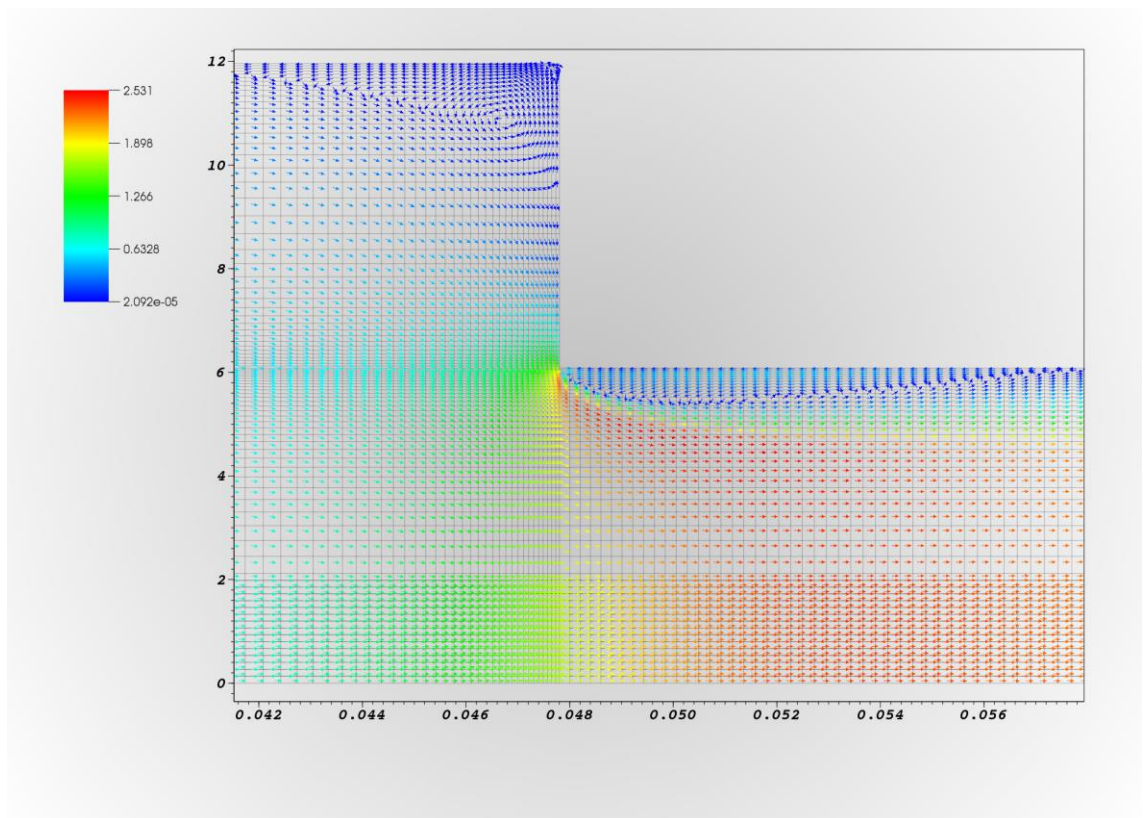
Fonte: Autoria própria.

Olhando a Fig.11 se nota que a velocidade radial possui um valor quase nulo na linha de centro e um valor máximo perto da região de contração. Devido ao sistema de coordenadas utilizado, a componente radial de velocidade possui valores positivos e negativos adjacentes à contração.

4.5 Módulo do vetor velocidade e linhas de corrente

O padrão do escoamento pode ser melhor visualizado com o uso de linhas de corrente e linhas de vetores. O módulo do vetor velocidade $|\vec{V}| = \sqrt{u^2 + v^2}$, o qual é calculado com as componentes axial e radial da velocidade, u e v , respectivamente. Nas Fig.12 e Fig.13, são apresentados os contornos do módulo do vetor velocidade e as linhas de corrente.

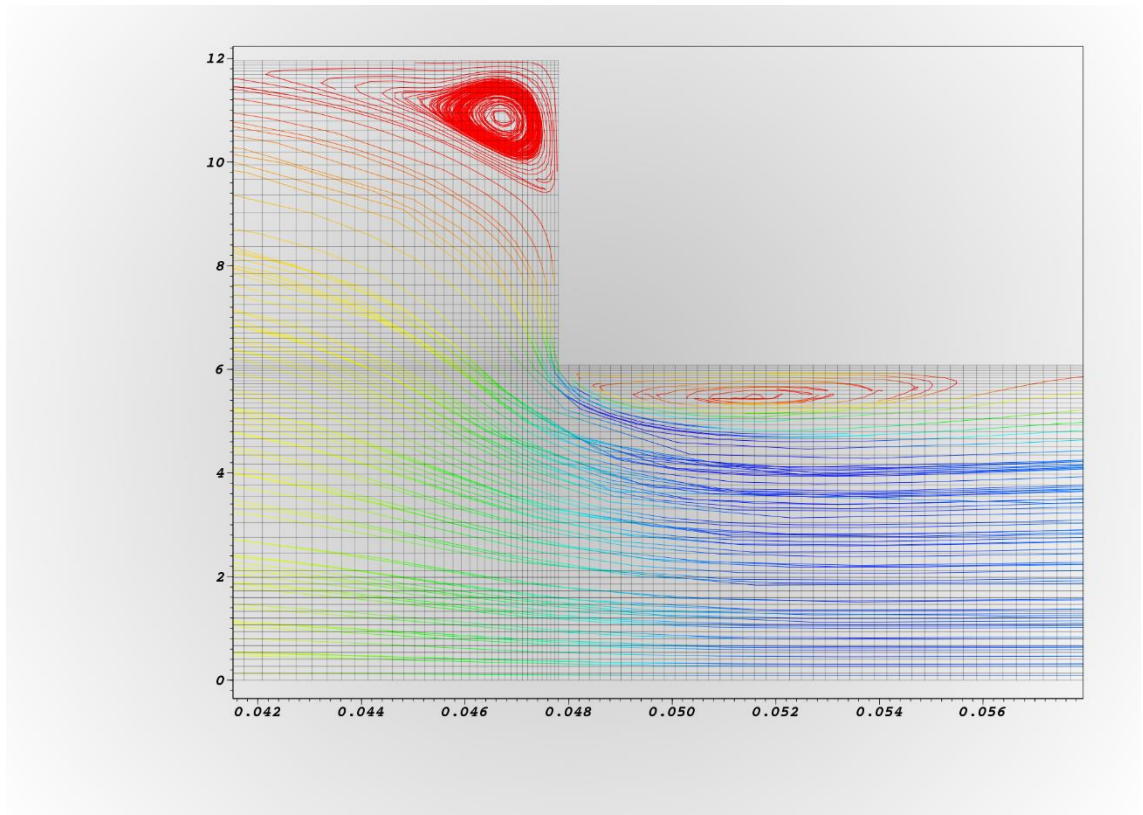
Figura 12 - Linhas de vetores da velocidade de escoamento



Fonte: Autoria própria.

Da Fig.12, pode-se observar um comportamento geral para escoamentos newtonianos em região de contração abrupta, no qual se caracteriza pela convergência das linhas de corrente para a seção de menor diâmetro, pela formação de vórtices (recirculações) e *vena contracta*. A presença de comportamentos aleatórios próximos às paredes longe da contração na parte a montante se deve ao fato de ocorrer presença de flutuações nas velocidades causadas pela turbulência do escoamento.

Figura 13 - Linhas de corrente para $Re = 10000$



Fonte: Autoria própria.

Na Fig.13 fica mais nítido a visualização da formação da recirculação na quina da geometria e da formação da *vena contracta* após a contração, caracterizando a diminuição da área de escoamento do fluido após a contração, aumentando consideravelmente a velocidade do mesmo. Para escoamento turbulento há uma clara dependência da estrutura do vórtice com o valor de Re_D (Palácios et al., 2011). Essa dependência é determinada pela diminuição da área ocupada pelo vórtice em função do incremento de Re_D . Refletindo esse efeito uma tendência de o escoamento principal pressionar o fluido que recircula na região de escoamento secundário ou de formação de vórtices, devido ao aumento significativo da velocidade no escoamento principal.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico do escoamento de fluidos newtonianos em uma tubulação com contração abrupta axissimétrica de razão de contração $\beta = 1,97$ para regime turbulento, com números de Reynolds a montante nos valores de 5300 e 10000.

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizado o software livre OpenFOAM, que se mostrou uma ferramenta bastante útil para a simulação do escoamento de um fluido newtoniano em CFD. Para a criação do domínio computacional foi utilizado um recurso do OpenFOAM chamado blockMesh, o qual permite a produção e refinamento de malhas bloco estruturadas do tipo hexaédricas, a partir de um arquivo de texto.

O método de discretização utilizado foi o de volumes finitos, pois se mostrou o mais eficiente para casos de fluidodinâmica computacional com geometrias complexas. A etapa de pós-processamento foi realizada com o software VisIt, que apresenta uma boa compatibilidade com o OpenFOAM, de modo a apresentar os resultados de simulação de forma bem explicativa e ilustrativa.

Como o escoamento foi caracterizado como incompressível, utilizou-se uma combinação bastante útil para a simulação, com velocidade prescrita na entrada e condição localmente parabólica na saída, sem estabelecer qualquer condição para a pressão, já que a solução é iterativa fazendo o nível de pressão se estabelecer automaticamente. O modelo de turbulência usado no trabalho foi o k- ϵ LB (Lam e Bremhorst, 1981) pois foi o que melhor apresentou as tendências e resultados para as componentes axial e radial da velocidade, segundo Palacios et al. (2011).

Foi observado que as velocidades axiais na linha de centro apresentaram um perfil de forma mais achatada, do que o visto no caso do regime laminar, em que elas apresentam um perfil mais acentuado parabolicamente. As velocidades radiais longe do plano da contração apresentaram um valor próximo de zero, porém na região da “quina” da contração se notou um aumento perceptível em seu valor.

Fazendo uma análise para os dois números de Reynolds utilizados no trabalho e com os resultados do trabalho de Palacios et al. (2011), verificou-se que o aumento do número de Reynolds, exercia um efeito retardante na velocidade adimensional u/\bar{U} .

Da análise das linhas de corrente observou-se que o padrão geral do escoamento avaliado é caracterizado pela convergência das linhas de corrente em direção à contração, processo muito bem mostrado com a ajuda do VisIt. Na Fig.13 ficou claro perceber a presença de recirculações a montante do plano de contração e, também, a presença da *vena contracta* a jusante da contração, estando de acordo com os efeitos provocados pela contração no escoamento newtoniano.

De forma geral, o trabalho desenvolvido apresentou resultados satisfatórios diante do limite do poder computacional disponível no computador do laboratório de Mecânica dos Fluidos, fornecido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Cornélio Procopio.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Verificar a dependência das características do escoamento em relação à diferentes razões de contração, β .
- Recomenda-se fazer um refinamento melhor perto da parede do duto com um poder computacional maior, de modo a obter um resultado mais perto do modelo real, com um menor erro de truncamento.
- Analisar a possibilidade de inserção de porosidades na parede do duto localizada no plano de contração.

REFERÊNCIAS

AJAYI K., Papadopoulos G, **Turbulent flow past a sudden contraction in a pipe.**,ASME Fluids Engineering Summer Meeting, Washington DC, 1998.

BORTOLI, Á.L. **Introdução à dinâmica de Fluidos Computacional**, Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

BOGER, D.V. **Viscoelastic Flows through Contractions: Annual Review of Fluid Mechanics**, Vol. 19, pp. 157-182, 1987.

CARETTO L.S.; CURR R.M.; SPALDING D.B. **Two numerical methods for threedimensional boundary layers. Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng.**, 1, p.39–57, 1972.

FOX, R. W.; McDonald, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 5ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC S.A., 1998.

FERZIGER, J.H.; PERID, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 2 nd Ed. SpringerVerlag, 1999, Berlin/Heildeberg.

KRHAN A., GIORGINI F. **Numerical investigations of laminar flow in a pipe with a sudden contraction of his cross sectional area.** Linkoping University, 2016.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, 2ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC S.A., 2010.

MUNSON B. R., **Fundamentos da mecânica dos fluidos.**, 2ªEd., São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher LTDA, 1997.

PALACIOS, S.F.; Machuca, J.; Franco, T. A.; Morales, R. E. M. **Experimental and Numerical Study of Turbulent Newtonian Flow through an Axisymmetric Sudden Contraction:** Proceedings of the ENCIT by ABCM, ENC10-0572, 2010/2011.

PATANKAR S. V., **Numerical heat transfer and fluid flow.**, Editora: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

MORALES R. E. M., Negrão C.O.R. **Simulação numérica do escoamento laminar com contração brusca.** Curitiba, PR. Programa de pós graduação em Engenharia Mécânica de de Materiais, 2015.

SILVA, L.F.L.R. **Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**, 4ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora McGraw-Hill, 2002.