

ANO
2017



UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE OLIVEIRA BASSO | SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO
TRIDIMENSIONAL DE POLÍMEROS EM CANAIS COM EXPANSÕES ASSIMÉTRICAS

O comportamento de fluido não-Newtoniano é frequentemente encontrado em operações industriais através de injeção de polímeros em processos de moldagem por injeção. Com o crescente aumento na utilização de produtos plásticos, e a necessidade de compreender e quantificar o comportamento dos fluidos não-Newtonianos sob diversas condições físicas têm aumentado consideravelmente o uso de modelagem matemática e simulações numéricas. O objetivo principal desta Dissertação foi o estudo comparativo do escoamento de um polímero fundido através de canais tridimensionais com diferentes seções de expansões assimétricas, utilizando a metodologia numérica do programa comercial ANSYS FLUENT. Três diferentes geometrias com expansões são estudadas: um canal com expansão súbita, um canal com expansão circular e, por fim, um canal com expansão tipo rampa.

Orientador: Paulo Sergio Berving Zdanski, D.Sc.

Joinville, 2017

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL DE POLÍMEROS EM CANAIS COM EXPANSÕES ASSIMÉTRICAS

FELIPE OLIVEIRA BASSO

JOINVILLE, 2017

FELIPE OLIVEIRA BASSO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO TRIDIMENSIONAL DE
POLÍMEROS EM CANAIS COM EXPANSÕES ASSIMÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Paulo Sergio Berving
Zdanski, D.Sc.

Joinville

Março de 2017

B322s

Basso, Felipe Oliveira

Simulação numérica do escoamento tridimensional de polímeros em canais com expansões assimétricas /Felipe Oliveira Basso. - 2017.

121 p. : il. ; 30 cm

Orientador: Paulo Sergio Berving Zdanski

Bibliografia: 91-94 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Joinville, 2017.

1. Polímeros. 2. Fluídos não-newtonianos. 3. Fluídos newtonianos. 4. Método dos volumes finitos.
I. Zdanski, Paulo Sérgio Berving. II. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 620.192 - 23. ed.

**Simulação Numérica do Escoamento Tridimensional de Polímeros em Canais
com Expansões Assimétricas**

por

Felipe Oliveira Basso

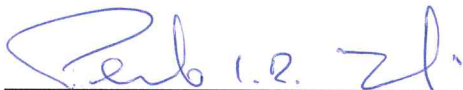
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Área de concentração em “Modelagem e Simulação Numérica”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.


Banca Examinadora:



Prof. Dr. Paulo Sergio Berving Zdanski
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)



Prof. Dr. Miguel Vaz Júnior
CCT/UDESC



Prof. Dr. Marcelo Matos Martins
Católica de SC

Joinville, SC, 7 de março de 2017.

Agradecimentos

A minha família que sempre esteve presente em minha vida, me auxiliando principalmente nos momentos difíceis. Agradeço todo o amor, apoio, interesse e confiança.

Ao professor Paulo S. B. Zdanski pela valiosa e indispensável orientação que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos Professores do Curso, pela formação recebida e pelo suporte constante.

Aos meus colegas de mestrado e de sala pela ajuda, troca de idéias, amizade e companheirismo. Um abraço especial para Ademar, Doglas, Douglas, Leandro e José.

Aos meus amigos, que me aconselharam, me fizeram companhia e aceitaram minhas eventuais ausências.

Ao Programa de Bolsas de Monitoria de Pós-Graduação (PROMOP/UEDESC) pelo suporte financeiro.

*Sempre que te perguntarem se podes fazer um trabalho,
respondas que sim e te ponhas em seguida a aprender como se faz.*

F. Roosevelt

Resumo

O comportamento de fluido não-Newtoniano é frequentemente encontrado em operações industriais através de injeção de polímeros em processos de moldagem por injeção. Com o crescente aumento na utilização de produtos plásticos, e a necessidade de compreender e quantificar o comportamento dos fluidos não-Newtonianos sob diversas condições físicas têm aumentado consideravelmente o uso de modelagem matemática e simulações numéricas. O objetivo principal desta Dissertação foi o estudo comparativo do escoamento de um polímero fundido através de canais tridimensionais com diferentes seções de expansões assimétricas, utilizando a metodologia numérica do programa comercial ANSYS FLUENT. Três diferentes geometrias com expansões são estudadas: um canal com expansão súbita, um canal com expansão circular e, por fim, um canal com expansão tipo rampa. Além das diferentes geometrias, a razão de aspecto – efeito da envergadura – dos canais também é variada e analisada. O modelo de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) com função de viscosidade regida pela lei de Cross foi implementado para descrever o comportamento reológico do polímero fundido. O modelo reológico implementado foi validado através de comparações com resultados da literatura. É mostrada uma comparação para o escoamento em canal com placas paralelas, canais bidimensionais e tridimensionais com expansões abruptas assimétricas. Com o resultado da análise física realizada foram reveladas todas as topologias para estes escoamentos, identificando aspectos importantes sobre o comportamento das linhas de corrente, contornos de velocidade, temperatura e viscosidade para os canais analisados. Por fim, uma análise paramétrica revelou que a razão de aspecto dos canais exerce grande influência na queda de pressão e distribuição do número de Nusselt.

Palavras-chaves: Fluido não-Newtoniano. Fluido Newtoniano Generalizado. Escoamento em expansões tridimensionais. Método dos volumes finitos.

Abstract

Non-Newtonian fluid behavior is often encountered in industrial operations by injection of polymers in injection molding process. With the increasing increase in the use of plastic products and the need to understand and quantify the behavior of non-Newtonian fluids under various physical conditions have considerably increased the use of mathematical modeling and numerical simulations. The main goal of this Dissertation was the comparative study of the flow of a molten polymer through three-dimensional channels with different asymmetric expansion sections, using the numerical methodology of the ANSYS FLUENT commercial program. Three different geometries with expansions are studied: a channel with sudden expansion, a channel with circular expansion and, finally, a channel with expansion ramp type. In addition to the different geometries, the aspect ratio - wingspan effect - of the channels is also varied and analysed. The Generalized Newtonian Fluid (GNF) model with viscosity function governed by Cross's law was implemented in this work to describe the rheological behavior of the molten polymer. The rheological model implemented was validated through comparisons with literature results. A comparison is shown for channel flow with parallel plates, two-dimensional and three-dimensional channels with asymmetric expansions. With the result of the physical analysis, all the topologies for these flows were revealed, identifying important aspects about the behavior of the streamlines, velocity, temperature and viscosity contours for the analysed channels. Finally, a parametric analysis revealed that the aspect ratio of the channels exerts great influence on the pressure drop and Nusselt number distribution.

Keywords: Non-Newtonian fluid. Generalized Newtonian Fluid. Three-dimensional expansions flow. Finite Volume Method.

Lista de Figuras

2.1	Canal com contração súbita axissimétrica.	6
2.2	Canal plano.	7
2.3	Canal plano com um prisma imerso.	8
2.4	Canal com contração, expansão e efeito combinado de contração/expansão estudado por Binding et al. (2006)	8
2.5	Canal com contração abrupta de quina arredondada.	9
2.6	Canal com expansão súbita axissimétrica.	10
2.7	Tamanhos de vórtices para diferentes índices n do modelo da Lei de Potência.	11
2.8	Canal bidimensional com expansão súbita assimétrica.	12
2.9	Canal tridimensional com expansão súbita assimétrica.	12
2.10	Canal bidimensional com seção contração/expansão súbita.	13
2.11	Canal de moldagem e solidificação para um polímero.	14
2.12	Canal plano com cavidade retangular abrupta.	14
2.13	Canal tipo rampa.	15
3.1	Montagem do volume de controle: (a) <i>cell center</i> (b) <i>cell vertex</i>	22
3.2	Valores estimados nas faces do volume de controle.	25
3.3	Fluxograma do algoritmo da solução segregada.	26
4.1	Canal plano de placa paralelas.	30
4.2	Perfis de temperatura para determinados x/h	30
4.3	Canal bidimensional com expansão súbita cartesiana.	31
4.4	Distribuição de Nusselt local.	32

4.5	Canal tridimensional com expansão súbita.	33
4.6	Perfil de temperatura adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido ($y = H/2$ e $x = 40h$).	34
4.7	Linha x_u na direção do escoamento.	34
4.8	Comparação entre os tamanhos de vórtices.	35
4.9	Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-y$ em $z/S = 0$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.	36
4.10	Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-y$ em $z/S = \pm 1.92$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.	36
4.11	Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-z$ em $y/S = 0.5$ (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.	37
4.12	Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-z$ em $y/S = 1.5$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.	37
4.13	Comparação entre as linhas de corrente para o plano $y-z$ em $x/S = 0.14$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b)(b) presente trabalho.	38
5.1	Canal com expansão súbita.	40
5.2	Canal com expansão circular.	40
5.3	Canal com expansão tipo rampa.	40
5.4	Malha do domínio computacional para o canal com expansão súbita.	44
5.5	Malha do domínio computacional para o canal com expansão circular.	44
5.6	Malha do domínio computacional para o canal com expansão tipo rampa.	45
5.7	Distribuição de Nusselt médio para o maior refino de malha.	48
5.8	Perfil de velocidade adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido ($y = H/2$ e $x = 40h$ – ver Figura 5.1).	49
5.9	Perfil de temperatura adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido ($y = H/2$ e $x = 40h$ – ver Figura 5.1).	50
5.10	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em w (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano $y-z$ para o canal com expansão súbita em $x/S = 0.09$	53

5.11	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em w (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano y-z para o canal com expansão circular em $x/S = 0.09$	54
5.12	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em w (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano y-z para o canal com expansão tipo rampa em $x/S = 0.09$	55
5.13	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano x-y para o canal com expansão súbita em $z/S = 0.0$	57
5.14	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano x-y para o canal com expansão circular em $z/S = 0.0$	58
5.15	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano x-y para o canal com expansão tipo rampa em $z/S = 0.0$	59
5.16	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-y para o canal com expansão súbita em $z/S = \pm 1, 92$	61
5.17	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-y para o canal com expansão circular em $z/S = \pm 1, 92$	62
5.18	Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-y para o canal com expansão tipo rampa em $z/S = \pm 1, 92$	63
5.19	Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão súbita em $y/S = 1.00$	65
5.20	Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão circular em $y/S = 1.00$	66
5.21	Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão tipo rampa em $y/S = 1.00$	67

5.22	Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão súbita em $y/S = 0.09$	69
5.23	Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão circular em $y/S = 0.09$	70
5.24	Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão tipo rampa em $y/S = 0.09$	71
5.25	Tamanho de vórtice para geometrias com razão de aspecto igual a dois.	73
5.26	Tamanho de vórtice para geometrias com razão de aspecto igual a quatro.	74
5.27	Tamanho de vórtice para geometrias com razão de aspecto igual a seis.	75
5.28	Contornos de pressão em $x/S = 0.25$ para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a dois.	76
5.29	Contornos de pressão em $x/S = 0.25$ para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a quatro.	76
5.30	Contornos de pressão em $x/S = 0.25$ para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a seis.	76
5.31	Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 2$ e $z/S = 0.0$	79
5.32	Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 4$ e $z/S = 0.0$	80
5.33	Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 6$ e $z/S = 0.0$	80
5.34	Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 2, 4$ e 6 em $z/S = 0.0$ para o canal com expansão súbita.	81
5.35	Distribuição de Nusselt local para as três razões de aspecto na geometria com expansão súbita em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$	82
5.36	Distribuição de Nusselt local para as três razões de aspecto na geometria com expansão circular em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$	83
5.37	Distribuição de Nusselt local para as três razões de aspecto na geometria com expansão tipo rampa em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$	83

5.38	Distribuição do Nusselt local para diferentes posições ao longo do escoamento na parede inferior do canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a quatro.	85
5.39	Distribuição do Nusselt médio ao longo do escoamento para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a quatro.	86

Lista de Tabelas

1.1	Produção mundial anual de plásticos.	1
3.1	Constantes materiais para Polyacetal POM-M90-44.	20
5.1	Números de divisões à montante da expansão	45
5.2	Números de divisões à jusante da expansão	46
5.3	Variação de pressão ao longo do canal.	47
5.4	Erro relativo percentual associado à queda de pressão.	47
5.5	Erro relativo médio e máximo percentual associado ao Nusselt médio.	48
5.6	Erro relativo médio e máximo percentual associado ao perfil de velocidade.	49
5.7	Erro relativo médio e máximo percentual associado ao perfil de temperatura.	50
5.8	Variação da queda de pressão média entre as seções de entrada e saída.	78
5.9	Variação do coeficiente de pressão adimensional entre as seções de entrada e saída.	78
5.10	Comparativo dos fluxos médios de calor que atravessam as paredes laterais do canal com expansão súbita.	87

Lista de Símbolos

D_{ij}	Tensor taxa de deformação	$[s^{-1}]$
D'_{ij}	Tensor taxa de deformação desviador	$[s^{-1}]$
De	Número adimensional de <i>Deborah</i>	$[-]$
\mathbf{n}	Vetor unitário normal	$[-]$
p	Pressão estática	$[Pa]$
k	Condutividade térmica	$[W/m.K]$
u_e	Velocidade de entrada do fluido	$[m/s]$
u_i, u_j	Componentes de velocidade	$[m/s]$
L_u	Comprimento do canal à montante da expansão	$[mm]$
L_d	Comprimento do canal à jusante da expansão	$[mm]$
S	Altura do degrau	$[mm]$
s_{ij}	Tensor tensão desviador	$[N/m^2]$
r	Raio do degrau	$[mm]$
h	Altura do canal à montante da expansão	$[mm]$
H	Altura do canal à jusante da expansão	$[mm]$
W	Largura do canal	$[mm]$
T	Temperatura	$[K]$
T_b	Temperatura média de mistura	$[K]$
T_e	Temperatura de entrada	$[K]$
T_p	Temperatura de parede	$[K]$
S_ϕ	Termo fonte	$[-]$
\dot{m}_f	Fluxo de massa	$[Kg/m]$

N_{faces}	Número de faces do volume de controle	[—]
\overline{Nu}	Nusselt médio	[—]
Nu	Nusselt local	[—]
$\overline{h_c}$	Coefficiente convectivo médio	$[W/m^2.K]$
h_c	Coefficiente convectivo local	$[W/m^2.K]$
\overline{p}	Pressão estática média	$[Pa]$
R^ϕ	Resíduo normalizado	[—]
Re_h	Número de Reynolds em função de h	[—]
C_I	Pressão adimensional	[—]
$\overline{q''_s}$	Fluxo de calor médio	$[W/m^2]$
q''_s	Fluxo de calor	$[W/m^2]$
V	Volume	$[m^3]$
c_p	Calor específico	$[J/kg.K]$
\vec{r}	Vetor posição	$[mm]$
nb	Nós vizinhos ao volume de controle	[—]
a_p	Coefficiente principal do sistema linear a ser determinado	[—]
a_{nb}	Coefficientes linearizados das células vizinhas	[—]
x_i, x_j	Coordenadas do sistema global	[—]
u, v, w	Componentes cartesianos de velocidade	$[m/s]$

Letras Gregas

μ	Viscosidade molecular	$[Pa.s]$
η	Viscosidade Newtoniana	$[Pa.s]$
$\eta(\dot{\gamma})$	Viscosidade não-Newtoniana	$[Pa.s]$
$\dot{\gamma}$	Magnitude da taxa de cisalhamento	$[s^{-1}]$
Γ	Termo difusivo	[—]
∇_ϕ	Gradiente da variável genérica	[—]
δ_{ij}	Delta de kronecker	[—]

ϕ	Variável genérica escalar	$[-]$
ρ	Massa específica	$[kg/m^3]$
Φ	Função dissipação viscosa	$[W/m^3]$

Subscritos

i, j	Notação indicial
as	Área da seção transversal
e	Entrada
s	Saída
p	Parede
$0, 1$	Volumes de controle que compartilham a mesma face
f	Face do volume de controle

Siglas

UDF	Função Definida pelo Usuário (<i>User Defined Function</i>)
AR	Razão de aspecto
ER	Razão de expansão
CR	Razão de contração
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
FVM	Métodos dos Volumes Finitos (<i>Finite Volume Method</i>)
PTT	Phan-Thien-Tanner

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Símbolos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura da Dissertação	3
2 Revisão de Literatura	5
3 Formulação Matemática	17
3.1 Equações de Conservação	17
3.2 Equações Constitutivas	18
3.2.1 Fluido Newtoniano	18
3.2.2 Fluido Newtoniano Generalizado	19
3.3 Metodologia Numérica	20
3.3.1 Método dos Volumes Finitos	21
3.3.2 Discretização das Equações	22
3.3.3 Esquemas de Interpolação	24
3.3.4 Métodos utilizados para solução das equações	26
3.3.5 Solução do Sistema Linear	27
3.3.6 Critério de Convergência	28

4	Validação e Verificação da Solução Numérica	29
4.1	Canal Plano	29
4.2	Canal com Expansão Súbita Bidimensional	31
4.3	Canal com Expansão Súbita Tridimensional	32
5	Resultados e Discussões	39
5.1	Domínio Computacional	39
5.1.1	Condições de contorno	41
5.2	Definição dos Parâmetros Locais e Globais	42
5.2.1	Análise da variação de pressão global e local	42
5.2.2	Número de Nusselt	42
5.3	Análise de Convergência de Malha	43
5.4	Análise da Topologia do Escoamento para Diferentes Tipos de Expansão	51
5.5	Análise dos Efeitos da Razão de Aspecto (AR) nas Zonas de Recirculação	72
5.6	Análise Paramétrica: Estudo dos Efeitos do Tipo de Expansão e da Razão de Aspecto Sobre os Parâmetros Globais	77
5.6.1	Análise da variação da queda de pressão ao longo do canal	77
5.6.2	Análise da variação do número de Nusselt	81
6	Conclusão e Perspectivas Futuras	89
	Bibliografia	91
	Apêndice	95

Introdução

Gradativamente nos últimos anos, devido a razões econômicas e tecnológicas, os plásticos passaram a ocupar um lugar de destaque como um dos materiais mais utilizados por todos os segmentos industriais. Como exemplos, podem-se citar a maioria das embalagens para produtos alimentares, de limpeza, peças para a indústria automobilística, construção civil, de eletrodomésticos e eletroeletrônicos. A evolução da produção anual de plásticos desde 1950 está indicada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Produção mundial anual de plásticos.

Ano	Milhões de toneladas
1950	1,7
1976	47,0
1989	99,0
2004	225,0
2009	250
2011	279
2014	311

Fonte: **Plastic Europe**. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final_plastics_the_facts_2014_2015_260215.pdf> Acesso em: 10 out. 2016.

Dentro deste contexto, a fabricação de peças através da moldagem por injeção tem sido amplamente utilizada na produção de produtos poliméricos devido à alta produtividade e versatilidade. Em 2004, o processo de fabricação por injeção representava 33 % de todas as peças plásticas processadas (KIM; TURNG, 2004).

Polímeros fundidos apresentam a característica típica dos fluidos não-Newtonianos. Este comportamento não-Newtoniano do fluido é geralmente caracterizado por relações constitutivas que relacionam a viscosidade aparente do polímero com a taxa de deformação. O modelo matemático completo para o processo de moldagem por injeção envolve as

equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, combinadas com uma equação constitutiva para fluidos não-Newtonianos.

Com o crescimento da capacidade computacional, tanto em termos de velocidade de processamento quanto em memória disponível, a simulação numérica também vem ganhando espaço na área de processamento de produtos poliméricos, tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico. Este tipo de análise tem como objetivo antecipar possíveis problemas para uma fase inicial no desenvolvimento de um produto, ajudando a reduzir escalas de tempo na criação e custos de projetos ou melhorando o entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o escoamento de fluidos não-Newtonianos.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo sobre a topologia e aspectos físicos relevantes do escoamento de uma classe de polímero fundido – polímero comercial Poliacetal POM-M90-44 – através de canais com expansões assimétricas de diferentes geometrias utilizando o programa comercial ANSYS FLUENT.

Ademais, como objetivos específicos:

- (I) Implementar o modelo reológico de *Cross* com o auxílio das chamadas UDF (*User Defined Functions*), a saber: são linhas de comando ou funções, definidas de acordo com a necessidade do usuário que podem ser incorporadas no programa através de uma interface de programação com linguagem C++ existente dentro do ANSYS FLUENT;
- (II) Utilizar a metodologia numérica do programa ANSYS FLUENT para realizar a validação e verificação numérica do modelo reológico implementado com os resultados disponíveis na literatura;
- (III) Analisar os aspectos físicos relevantes, tais como: topologia, distribuição de Nusselt e queda de pressão durante o escoamento de polímeros fundidos em canais contendo diferentes expansões tridimensionais. Três geometrias são estudadas nesse trabalho, a saber: um canal com expansão súbita, um canal com expansão circular e, por último, um canal com expansão tipo rampa;
- (IV) Estudar a influência da variação da razão de aspecto, envergadura da geometria, sobre o escoamento de polímeros fundidos em canais contendo expansões súbitas tridimensionais.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação está estruturada em seis seções: Introdução (Capítulo 1), Revisão de Literatura (Capítulo 2), Formulação Matemática (Capítulo 3), Validação e Verificação da Solução Numérica (Capítulo 4), Resultados e Discussões (Capítulo 5) e, por fim, Conclusão e Perspectivas Futuras (Capítulo 6).

O capítulo 2 é dedicado à revisão de literatura. É realizado um levantamento dos trabalhos previamente desenvolvidos que abordam o mesmo tema com o objetivo de identificar os métodos utilizados e aspectos físicos relevantes estudados.

O Capítulo 3 apresenta a formulação matemática para o escoamento de fluidos não-Newtonianos, o modelo reológico e parâmetros utilizados para descrever o comportamento do polímero fundido adotado neste trabalho. Por fim, é exposta a metodologia numérica utilizada pelo programa comercial ANSYS FLUENT.

No Capítulo 4 é apresentado a validação e a verificação da solução numérica do modelo reológico implementado no programa computacional. O modelo proposto é comparado com três trabalhos da literatura. Primeiramente, um canal plano com placas paralelas, em um segundo momento, um canal bidimensional com expansão súbita assimétrica e, por fim, um canal tridimensional com expansão súbita assimétrica.

O Capítulo 5 é dedicado à análise dos resultados numéricos obtidos nesta Dissertação. É discutido a topologia e aspectos físicos relevantes do escoamento de polímeros fundidos em canais contendo expansões tridimensionais.

O Capítulo 6 enfatiza as principais conclusões obtidas nesta Dissertação e projeta perspectivas futuras para o trabalho.

Capítulo 2

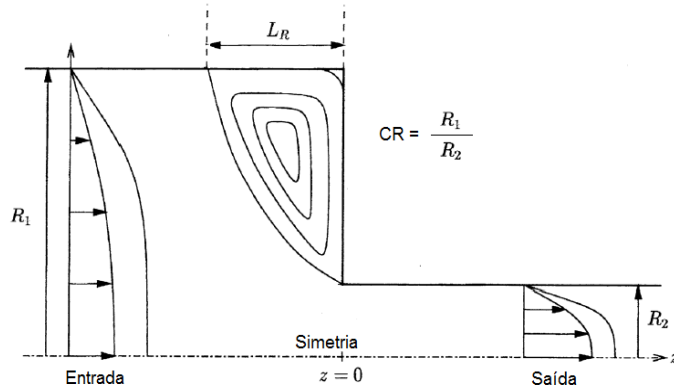
Revisão de Literatura

O intuito principal deste capítulo é apresentar a revisão de literatura no que concerne o escoamento de fluidos não-Newtonianos no interior de canais com mudanças abruptas em sua seção de escoamento. A análise dos estudos previamente desenvolvidos busca estabelecer um panorama da pesquisa da simulação numérica com a finalidade de identificar os métodos utilizados e aspectos físicos relevantes estudados.

No meio acadêmico, canais planos, canais com contrações e expansões tanto axisimétricas quanto assimétricas tem sido amplamente utilizados para avaliar a acurácia de modelos numéricos e estudar características de fluxo como: perfis de velocidade e temperatura, queda de pressão ao longo do canal, distribuição de viscosidade, comprimento de vórtices, regiões de recirculação e bifurcação.

Wachs et al. (2002) estudaram numericamente o escoamento de três modelos de fluidos – Newtoniano, não-Newtoniano puramente viscoso e não-Newtoniano viscoelástico – através de geometrias com diferentes razões de contrações (CR), de 2:1 até 16:1, de acordo com a Figura 2.1. Neste trabalho foram realizadas simulações empregando a técnica de volumes finitos, o termo convectivo e o termo difusivo são aproximados por um esquema *upwind* de primeira ordem e diferenças centrais de segunda ordem, respectivamente. Euler implícito de primeira ordem foi adotado na discretização temporal. O artigo teve como objetivo mensurar a influência dos efeitos térmicos no escoamento de fluidos incompressíveis. Como resultados, obtiveram um complexo comportamento dos fluidos sob condições não-isotérmicas. Comparando os fluidos não elásticos, o tamanho das regiões de recirculação é menor para o modelo não-Newtoniano puramente viscoso do que para o caso Newtoniano. As maiores zonas de recirculação de fluido foram observadas no modelo não-Newtoniano viscoelástico. Ademais, foi observada uma dependência da temperatura das condições de contorno e da razão de contração geométrica do canal no comprimento das zonas de recirculação de fluido.

Figura 2.1: Canal com contração súbita axissimétrica.



Fonte: Adaptado de Wachs et al. (2002).

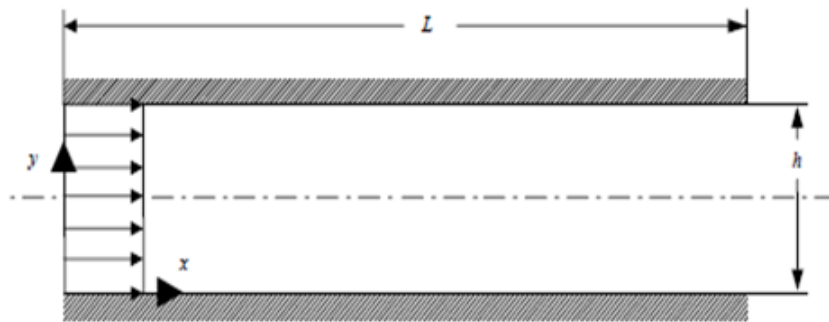
Com geometria semelhante à Figura 2.1, Oliveira et al. (2007) investigaram o efeito combinado da razão de contração ($CR = 2, 4, \dots, 100$) e da variação do número de *Deborah*¹ no escoamento de um fluido não-Newtoniano através de canais com contração súbita. Os modelos reológicos viscoelásticos *Oldroyd-B* e *PTT* foram utilizados para modelar o fluxo do escoamento. Os resultados obtidos, tais como: queda de pressão, comprimento de vórtice, perfis de velocidade e taxa de deformação foram comparados com um modelo de fluido Newtoniano. Neste artigo, as simulações são realizadas empregando a técnica de volumes finitos. A discretização do termo convectivo é realizada por um esquema de alta resolução e o termo difusivo é discretizado por diferenças centrais.

Fávero (2009) realizou um estudo numérico com vários modelos de fluido não-Newtoniano viscoelásticos em um escoamento com contração abrupta 4:1 ($4R_2 : 1R_2$), semelhante à Figura 2.1. O procedimento numérico foi realizado no programa gratuito e de código aberto *OpenFOAM*, com metodologia numérica baseada no método dos volumes finitos. Os modelos reológicos *Oldroyd - B*, *UCM*, *Maxwell*, *Giesekus*, *FENE-P*, *FENE-CR*, *PTT* e *DCPP* foram implementados e estudados. O trabalho teve como objetivo criar um módulo contendo modelos constitutivos para fluidos poliméricos em um programa de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de código aberto.

¹O número adimensional de *Deborah* (*De*) caracteriza a fluidez de um material sob condições específicas de fluxo. É definido como a taxa entre o tempo característico do fluido e o tempo característico do sistema. O tempo característico do fluido é tomado como a maior constante de tempo que descreve os movimentos moleculares (relaxações das tensões). O tempo característico do sistema geralmente é tomado como o tempo da observação experimental, ou o tempo de duração de um experimento. Quando *De* tende a zero, tem-se o comportamento de um fluido Newtoniano, sem efeito de memória; quando *De* tende ao infinito, tem-se o comportamento de um sólido elástico ideal. (BIRD et al., 1987).

Koh et al. (2004) e Zdanski et al. (2008a) estudaram o escoamento de polímero fundido em canais planos, conforme Figura 2.2. Ambos os autores usaram o esquema numérico baseado na formulação de volumes finitos, porém, para tratar o acoplamento pressão-velocidade, o primeiro trabalho empregou o algoritmo SIMPLER, enquanto o segundo estudo optou por utilizar uma equação de *Poisson* mais elaborada (com dissipação artificial). Koh et al. (2004) utilizaram três modelos reológicos para modelar o escoamento do fluido. Um importante aspecto desse estudo foi considerar o desenvolvimento da camada limite térmica e hidrodinâmica e modificar os modelos de viscosidade. O objetivo foi examinar o efeito da temperatura e da velocidade de entrada em parâmetros de escoamento, como o gradiente de velocidade, perfil de temperatura, viscosidade e taxa de cisalhamento. Zdanski et al. (2008a) compararam os resultados de seu modelo numérico proposto com o de Koh et al. (2004) e com soluções analíticas exatas obtendo resultados satisfatórios.

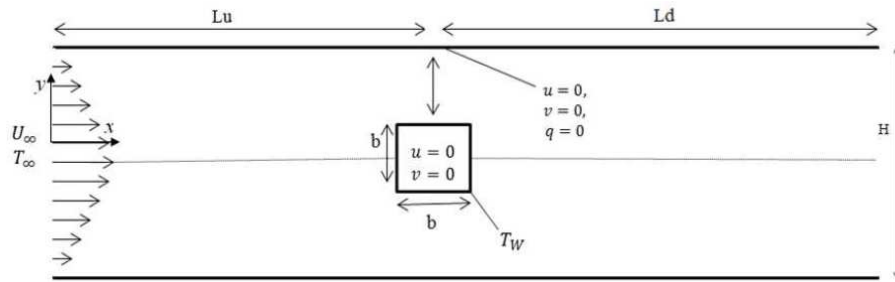
Figura 2.2: Canal plano.



Fonte: Adaptado de Zdanski et al. (2008a).

Siqueira (2013) realizou um estudo numérico de um escoamento de um fluido não-Newtoniano em torno de prisma de seção quadrada imerso em um canal com placas paralelas de acordo com a Figura 2.3. O modelo reológico da Lei de Potência é adotado neste trabalho e implementado no programa livre e de código aberto MFIX, baseado no método dos volumes finitos. Foram analisados e variados os parâmetros: número de Prandtl, índice n do modelo da Lei de Potência e razão de bloqueio. Como resultado, verificou-se que o número de Nusselt tem influência direta e é fortemente influenciado pela razão de bloqueio e inversamente, porém com pouca intensidade, pelo índice n do modelo da Lei de Potência. O número de Prandtl também influencia diretamente no número de Nusselt e demonstrou que, quanto maior o seu valor, mais acentuada fica a variação do número de Nusselt em função da razão de bloqueio.

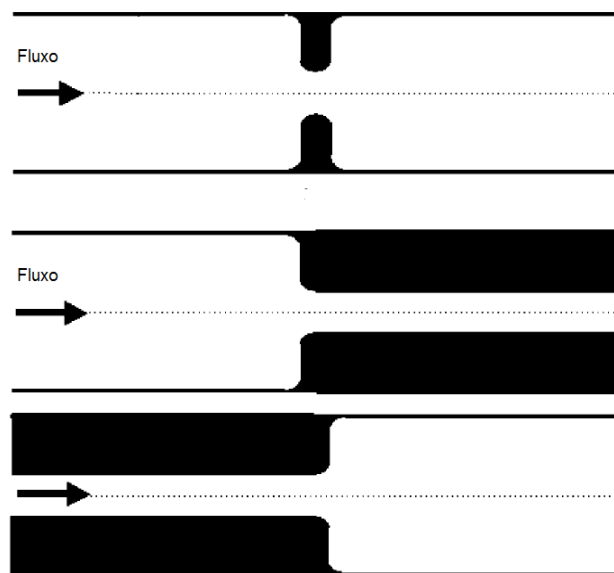
Figura 2.3: Canal plano com um prisma imerso.



Fonte: Adaptado de Siqueira (2013).

Binding et al. (2006) analisaram o escoamento de um fluido não-Newtoniano através de um canal com contração 4:1, expansão 1:4 e o efeito combinado de um canal com contração/expansão 4:1:4 conforme mostra a Figura 2.4. O estudo numérico foi realizado utilizando o programa comercial POLYFLOW que é baseado no método de elementos finitos e o modelo reológico *Oldroyd-B* foi adotado para modelar o escoamento. O trabalho teve como objetivo analisar o campo de pressão ao longo das três geometrias e parâmetros do escoamento, como comprimento de vórtice e perfis de velocidade, para diferentes números de *Deborah* e índice β do modelo constitutivo *Oldroyd-B*.

Figura 2.4: Canal com contração, expansão e efeito combinado de contração/expansão estudado por Binding et al. (2006) .

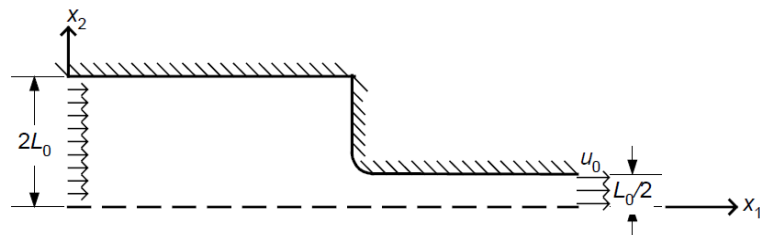


Fonte: Adaptado de Binding et al. (2006).

Zinani (2006), Martins (2006) e Machado (2007) utilizaram uma abordagem por elementos finitos para estudar o escoamento de fluidos não-Newtonianos através de canais com contração e expansão súbitas e canais com placas paralelas. Nos três trabalhos os modelos implementados são validados para um problema de cavidade forçada.

Zinani (2006) simulou o escoamento de um fluido pseudoplástico, modelo de Fluido Newtoniano Generalizado com função viscosidade dado pela função de *Carreau*, através de canais com contração súbita axissimétrica 4:1, semelhante à Figura 2.1 para duas geometrias distintas, um canal com geometria planar e outro canal com geometria de duto circular. No mesmo trabalho, Zinani (2006) fez um estudo comparativo entre modelos de um fluido Newtoniano, *Carreau* e um modelo de fluido quasi-Newtoniano através do escoamento em canais entre duas placas paralelas, semelhante à Figura 2.2. Por fim, a autora estudou o escoamento de fluido quasi-Newtoniano através de uma contração abrupta com quina arredondada de acordo com a Figura 2.5.

Figura 2.5: Canal com contração abrupta de quina arredondada.



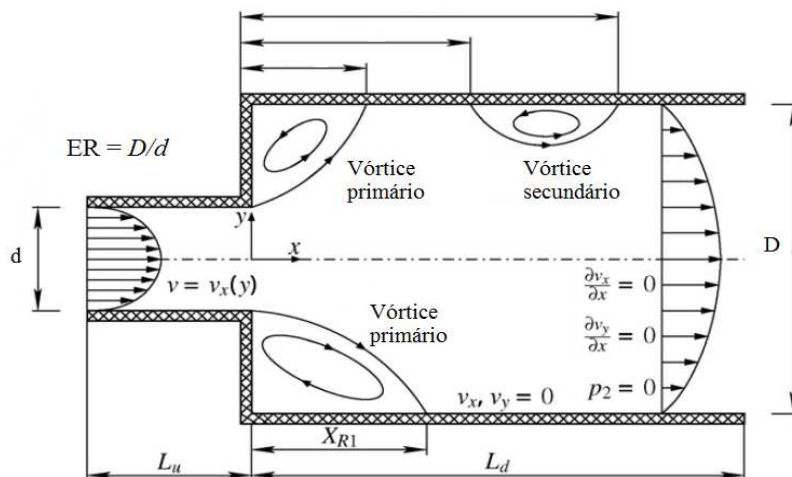
Fonte: Adaptado de Zinani (2006).

Martins (2006) simulou o escoamento de um fluido não-Newtoniano pseudoplástico através de canais com contração súbita axissimétrica 4:1 (semelhante à Figura 2.1). A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) com função viscosidade de *Carreau - Yasuda* é adotada. Um estudo comparativo com diferentes valores do índice de *Carreau - Yasuda* é realizado para perfis de velocidade, queda de pressão, distribuição de viscosidade e linhas de corrente. Os resultados apresentados mostram-se fisicamente realistas e concordantes com a literatura específica.

Machado (2007) simulou o escoamento de um fluido não-Newtoniano, adotando o modelo de Fluido Newtoniano Generalizado com função viscosidade de *Herschel-Bulkley* através de canais com expansões abruptas axissimétrica de razão de aspecto 1:2 e 1:4, semelhante à Figura 2.6. Análises globais e locais são realizadas para perfis de velocidade e queda de pressão com o objetivo de estudar a influência do número de *Herschel - Bulkley* em uma escala entre 0 e 100 e o comportamento do índice n do modelo da Lei de Potência entre 0.2 e 1.0. Os resultados apresentados mostram-se fisicamente realistas e concordantes com a literatura específica.

Poole et al. (2009) investigaram o efeito combinado da razão de expansão (ER) e do número de *Deborah* no escoamento de um fluido não-Newtoniano através de um canal com expansão súbita, semelhante à Figura 2.6. A razão de expansão foi analisada entre $1.25 \leq ER \leq 32$, e o número de *Deborah* entre 0 até 1.2. O modelo reológico viscoelástico de Maxwell é utilizado para modelar o fluxo. Neste artigo, as simulações são realizadas empregando a técnica de volumes finitos e o algoritmo SIMPLEC é utilizado para tratar o acoplamento pressão-velocidade. A discretização dos termos convectivos é realizada por um esquema de alta resolução e os termos difusivos são discretizados por diferenças centrais. Como resultado principal, os autores observaram que, para um canal com razão de expansão menor que dois, o comprimento de vórtice cresce conforme aumenta o número de *Deborah*, já para casos onde a razão de expansão é maior que dois ocorre o inverso, com o aumento do número de *Deborah*, o comprimento de vórtice diminui. Análises da variação da queda de pressão para o efeito combinado da razão de expansão e do número de *Deborah* também são discutidas.

Figura 2.6: Canal com expansão súbita axissimétrica.



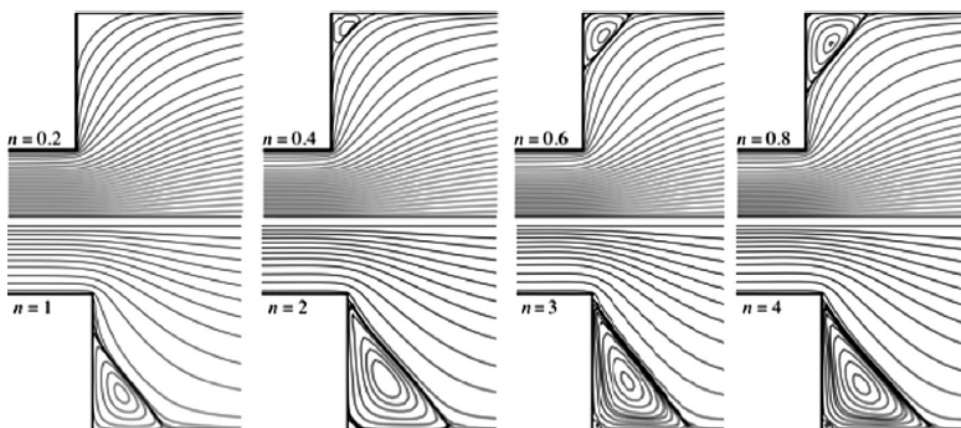
Fonte: Adaptado de Ternik (2009).

Ternik (2009) estudou numericamente o escoamento de um fluido pela Lei de Potência através de um canal de expansão súbita 1:3 de acordo com Figura 2.6. O fluido é assumido como sendo puramente viscoso. Neste artigo, as simulações são realizadas empregando o método de volumes finitos e o algoritmo SIMPLEC é utilizado para tratar o acoplamento pressão-velocidade. O escoamento é analisado numericamente com o número de Reynolds generalizado variando entre $10 \leq Re_{gen} \leq 150$. Os efeitos da variação do índice n do modelo da Lei de Potência ($n=0.6$ e 0.8) no comprimento dos vórtices primários e secundários são comparados com o modelo de fluido Newtoniano ($n=1.0$). Valores críticos de Reynolds também são analisados para os três casos. Como resultado, apresenta-se que, quanto menor o valor do índice n do modelo da Lei de Potência, maior é o valor

crítico de Reynolds. Para o comprimento de vórtice causado pela expansão abrupta do canal, quanto maior o valor de n maior é o seu comprimento e, que o vórtice secundário só aparece quando $Re_{gen} < 100$ e somente para $n=1.0$ (Ver Figura 2.6). Ademais, a variação de pressão ao longo do canal também é estudada.

Com geometria semelhante à Figura 2.6, Dhinakaran et al. (2013) simularam o escoamento de fluidos com o modelo da Lei de Potência através de uma expansão súbita 1:3. O índice n do modelo constitutivo proposto é variado entre $0.2 \leq n \leq 4.0$, possibilitando assim, a análise de fluidos pseudoplásticos (*shear-thinning*), Newtonianos e dilatantes (*shear-thickening*). Neste artigo, são realizadas simulações empregando a técnica de volumes finitos, o termo convectivo é aproximado por um esquema de alta resolução e o termo difusivo é aproximado por diferenças centrais de segunda ordem. Euler implícito de primeira ordem é adotado na discretização temporal e o algoritmo SIMPLEC é utilizado para tratar o acoplamento pressão-velocidade. Este artigo teve como objetivo avaliar influência de diferentes números de Reynolds generalizados na característica de formação de vórtice durante o escoamento do fluido. Como resultado observaram uma forte dependência do índice n do modelo da Lei de Potência no comportamento do escoamento, ou seja, para um determinado número de Reynolds e alterando apenas o índice n ocorre mudanças significativas nas linhas de corrente do fluido à jusante da expansão, como é mostrado na Figura 2.7, a seguir.

Figura 2.7: Tamanhos de vórtices para diferentes índices n do modelo da Lei de Potência.

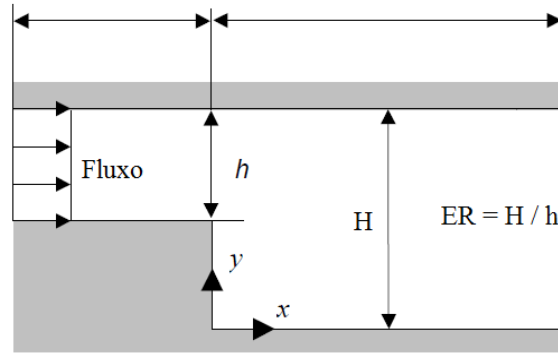


Fonte: Adaptado de Dhinakaran et al. (2013).

Zdanski e Vaz Jr. (2009a) analisaram a influência da variação da razão de expansão (ER), $2.0 \leq ER \leq 4.0$ e de diversas temperaturas de entrada nos parâmetros de escoamento de polímero fundido em um canal bidimensional com expansão súbita assimétrica de acordo com a Figura 2.8. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (GNF) é empregada e o modelo reológico de *Cross* é adotado para descrever o comportamento do

escoamento. As equações de governo são discretizadas utilizando o método de diferenças finitas. Como resultados, foram analisados perfis de velocidade e temperatura, queda de pressão e distribuição de viscosidade.

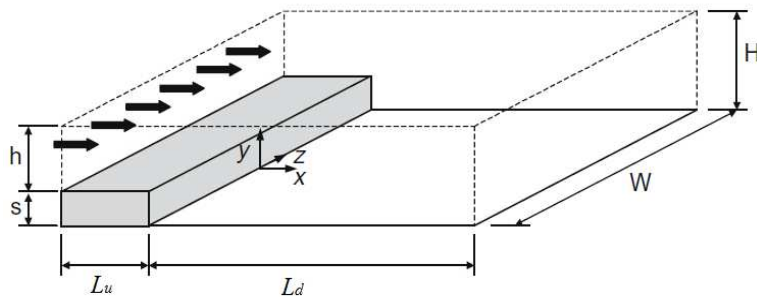
Figura 2.8: Canal bidimensional com expansão súbita assimétrica.



Fonte: Adaptado de Zdanski e Vaz Jr. (2009a).

Zdanski e Vaz Jr. (2009b) estudaram as características gerais do escoamento de polímeros fundidos em canais de expansões súbitas tridimensionais de acordo com a Figura 2.9. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) é empregada e o modelo reológico de *Cross* é adotado para descrever o comportamento do escoamento. O estudo da topologia do escoamento é baseado na análise bidimensional da distribuição de linhas de corrente em diversos planos x , y e z . Como resultados, foram observados a influência da dissipação viscosa no aumento da temperatura e da variação da viscosidade, como também um complexo comportamento do escoamento próximo à região de expansão. Ademais, perfis de temperatura, zonas de recirculação e contornos de viscosidade são discutidos.

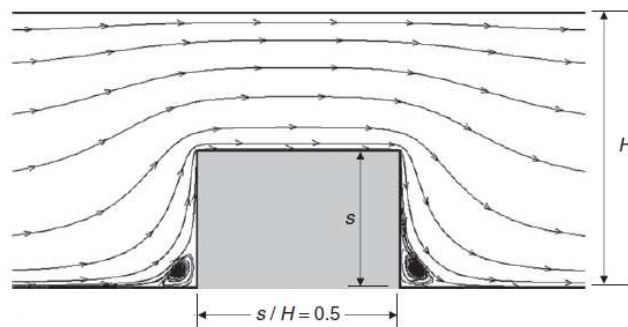
Figura 2.9: Canal tridimensional com expansão súbita assimétrica.



Fonte: Adaptado de Zdanski e Vaz Jr. (2009b).

Em outro artigo Zdanski et al. (2011) investigaram a topologia do escoamento de um polímero fundido em um canal plano bidimensional com seção súbita de contração/expansão de acordo com a Figura 2.10. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) é empregada e modelo reológico de *Cross* é adotado para descrever o comportamento do escoamento. As equações de governo são discretizadas utilizando o método de diferenças finitas. O trabalho é focado na avaliação dos números locais e globais Nusselt com base no estudo paramétrico dos efeitos da razão de aspecto da seção de contração/expansão e da velocidade de entrada do fluido.

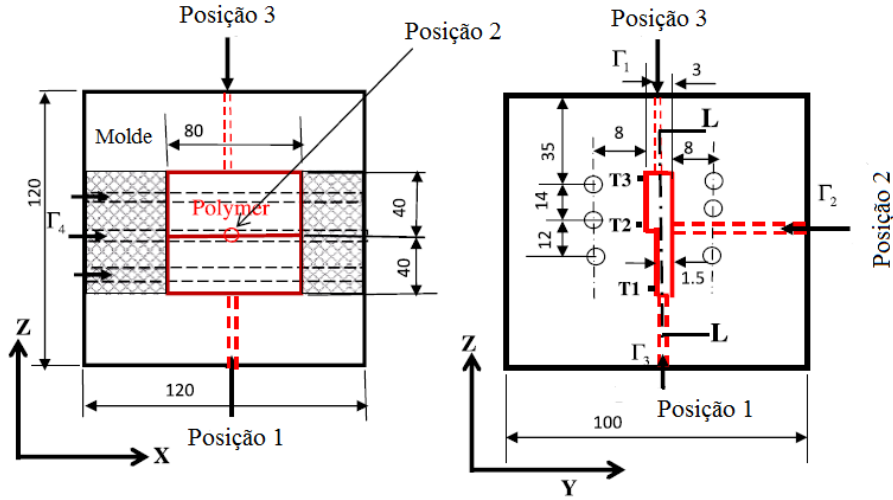
Figura 2.10: Canal bidimensional com seção contração/expansão súbita.



Fonte: Adaptado de Zdanski et al. (2011).

Hassan et al. (2009) apresentaram um estudo 3D para o efeito da localização do canal de solidificação e distribuição da temperatura durante o arrefecimento de material polimérico pelo processo de moldagem por injeção de acordo com a Figura 2.11. Três posições diferentes para a localização do canal de arrefecimento são analisadas e o artigo também mostra que a posição do canal tem uma grande influência na distribuição de temperatura do produto moldado por injeção. Em outro trabalho, Hassan et al. (2010) discutiram o efeito da posição de canais de arrefecimento e a sua forma - circular, retangular e quadrada - sobre o processo de transferência de calor durante o resfriamento do polímero dentro do molde de injeção. O trabalho indica ainda que o tempo necessário para o polímero solidificar completamente diminui quando se utiliza canais retangulares. Em ambos os trabalhos os autores adotam como modelo constitutivo a lei de *Cross* para descrever o comportamento reológico do polímero.

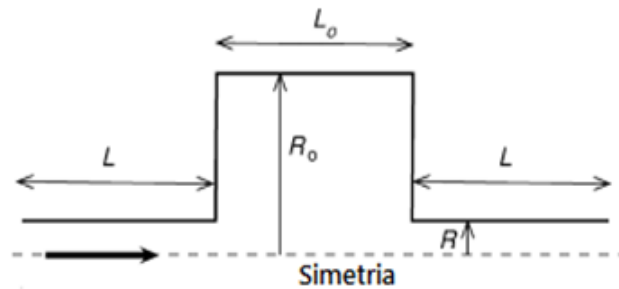
Figura 2.11: Canal de moldagem e solidificação para um polímero.



Fonte: Adaptado de Hassan et al. (2009).

Nejad e Javaherdeh (2014) simularam o escoamento de um fluido não-Newtoniano através de canais de placas paralelas com uma súbita cavidade retangular de acordo com a Figura 2.12. O fluido é assumido como sendo bidimensional, laminar, incompressível e o modelo da Lei de Potência é adotado. Neste artigo, as simulações são realizadas empregando a técnica de volumes finitos e o algoritmo SIMPLE é utilizado para tratar o acoplamento pressão-velocidade. Os efeitos da variação do número de Reynolds ($50 \leq Re \leq 350$), índice n do modelo da Lei de Potência ($0.5 \leq n \leq 2$) e da razão de aspecto ($AR = 0,25$ e $0,5$) no processo de transferência de calor são discutidos. Padrões de escoamento, como regiões de recirculação e deflexão, causadas pela variação abrupta do canal na direção do escoamento também são estudadas. Além disso, a distribuição da temperatura influenciada por estas perturbações são analisadas.

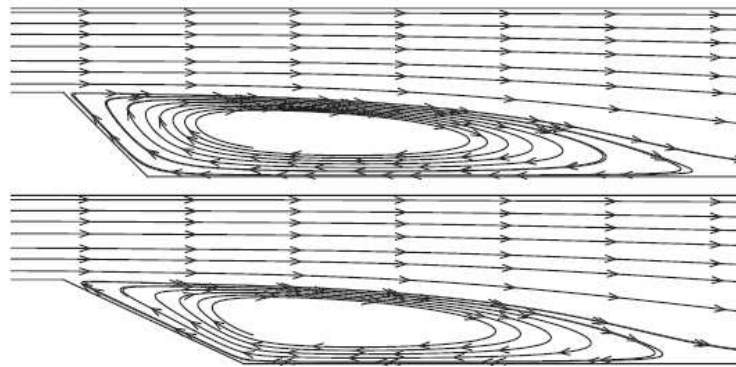
Figura 2.12: Canal plano com cavidade retangular abrupta.



Fonte: Adaptado de Nejad e Javaherdeh (2014).

O estudo de seções inclinadas é escasso na literatura, mas foi encontrado o trabalho de Louda et al. (2013) para escoamento de ar. Foi estudada a solução numérica de um escoamento turbulento num canal bidimensional e tridimensional com expansão inclinada através de um método implícito baseado em volumes finitos e elementos finitos, comparando as duas abordagens. Devido ao maior número de Reynolds e menor viscosidade, em comparação com escoamento de polímero, observa-se a formação de vórtices maiores.

Figura 2.13: Canal tipo rampa.



Fonte: Adaptado de Louda et al. (2013).

Como conclusão desta seção destaca-se que a análise de escoamentos de fluidos não-Newtonianos em canais com seções de expansão/contração é amplamente discutido na literatura. Constata-se ainda que a maior parte dos trabalhos apresentam análises bidimensionais. Além disso, estudos envolvendo uma análise tridimensional focando os efeitos da razão de aspecto (envergadura do canal) ainda são pouco discutidos, o que justifica o estudo realizado nesta dissertação.

Capítulo 3

Formulação Matemática

Neste capítulo são apresentadas as equações de governo para o escoamento de fluidos. Estas equações são obtidas através dos princípios da conservação da massa, quantidade de movimento e energia, e são aplicadas no escoamento de polímeros fundidos.

A abordagem diferencial das equações de governo é adotada, pois permite obter o conhecimento detalhado ponto a ponto do campo de escoamento. Com esta metodologia é possível conhecer a distribuição dos campos de pressão, velocidade e temperatura em um volume de controle infinitesimal.

Em um segundo momento, são apresentados o modelo reológico e os parâmetros utilizados para descrever a função material do fluido polimérico.

Por fim, este capítulo apresenta a metodologia numérica empregada neste trabalho. É descrito o Método de Volumes Finitos (*Finite Volume Method - FVM*), sendo utilizado como ferramenta de discretização e análise numérica o programa comercial ANSYS FLUENT.

3.1 Equações de Conservação

Considerando um escoamento tridimensional e incompressível, as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia podem ser escritas, respectivamente, da seguinte maneira.

- Equação de conservação da massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

onde, ρ é a massa específica do fluido, t representa o tempo, x_i são as coordenadas do sistema global e u_i são as componentes de velocidade.

- Equação de conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

onde, p é a pressão estática e s_{ij} é o tensor tensão desviador,

- Equação de conservação de energia

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \Phi, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.3)$$

onde, c_p é o calor específico do fluido a pressão constante, T é a temperatura k é a condutividade térmica molecular do fluido e Φ representa a função da dissipação viscosa.

3.2 Equações Constitutivas

Uma equação que relaciona tensor tensão desviador e tensor taxa de deformação é chamada de equação constitutiva.

Para fluidos poliméricos, há uma grande quantidade de equações constitutivas que buscam descrever o comportamento reológico. Estas equações são classificadas de acordo com sua natureza matemática e a capacidade de predição de funções materiais.

3.2.1 Fluido Newtoniano

A equação constitutiva para fluidos Newtonianos pode escrita da seguinte maneira:

$$s_{ij} = 2\mu D'_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

sendo μ a viscosidade molecular do fluido e D'_{ij} o tensor taxa de deformação desviador,

$$D'_{ij} = D_{ij} - \frac{1}{3} D_{kk} \delta_{ij}, \quad i, j, k = 1, 2, 3. \quad (3.5)$$

Para fluidos Newtonianos incompressíveis, o segundo termo da Equação 3.5 deve ser nulo e o tensor taxa de deformação desviador é representado apenas pelo tensor taxa de deformação

$$D'_{ij} = D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (3.6)$$

3.2.2 Fluido Newtoniano Generalizado

Equações para Fluidos Newtonianos Generalizados (FNG) são derivadas da equação constitutiva para fluidos Newtonianos através da substituição da viscosidade Newtoniana por uma função viscosidade que varia com o tensor taxa de deformação, nesta situação os efeitos elásticos não são relacionados. A equação é dada por:

$$s_{ij} = 2\eta(\dot{\gamma})D'_{ij} \quad (3.7)$$

onde $\eta(\dot{\gamma})$ é a viscosidade aparente, sendo uma função de invariantes escalares do tensor taxa de deformação.

Para escoamentos incompressíveis e cisalhantes a função viscosidade aparente dependerá somente do segundo invariante (BIRD et al., 1987) (KENNEDY; ZHENG, 2013), que é descrito como:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (3.8)$$

onde $\dot{\gamma}$ é definido como a magnitude da taxa de cisalhamento.

Neste trabalho, adotou-se o modelo reológico de *Cross* modificado, onde a viscosidade aparente do polímero não é somente função da taxa de deformação equivalente, mas também da temperatura. O código implementado está no Apêndice A deste trabalho.

O modelo de viscosidade de *Cross* exhibe excelente conformidade com o comportamento observado por certos polímeros de interesse industrial, apresentando o comportamento Newtoniano a baixas taxas de cisalhamento e a assíntota do modelo da Lei de Potência a altas taxas de cisalhamento (ESTACIO, 2008).

O modelo de Cross é definido como:

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + [\lambda(T)\dot{\gamma}]^{1-n(T)}} \quad (3.9)$$

onde

$$\eta_0(T) = a_1 \exp\left(\frac{a_2}{T}\right) \quad (3.10)$$

$$\lambda(T) = b_1 \exp\left(\frac{b_2}{T}\right) \quad (3.11)$$

e

$$\eta(T) = c_1 \exp\left(-\frac{c_2}{T}\right) \quad (3.12)$$

As simulações realizadas neste trabalho consideram um polímero da ‘família’ POM (Polyacetal), que segundo Pedro Bom et al. (2000) apresentam as seguintes constantes materiais:

Tabela 3.1: Constantes materiais para Polyacetal POM-M90-44.

$\eta_0(T)$	$\lambda(T)$	$\eta(T)$
$a_1 = 0.022603$	$b_1 = 1.6425 \cdot 10^{-6}$	$c_1 = 1.3574$
$a_2 = 5003.01$	$b_2 = 3901.0$	$c_2 = 653.73$

Fonte: Pedro Bom et al.(2000).

Além disso, os valores para as propriedades termofísicas, massa específica, condutividade térmica e calor específico são $\rho = 1143.9 \text{ kg/m}^3$, $k = 0.31 \text{ W/mK}$ e $c_p = 2420.0 \text{ J/kg}$, respectivamente.

3.3 Metodologia Numérica

O objetivo de um método numérico é substituir as equações diferenciais de transporte por um conjunto de equações algébricas, o qual fornecerá o valor das quantidades de interesse em pontos discretos dentro do domínio computacional.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007) uma análise de CFD pode ser dividida em três etapas:

- Pré-processamento: Nesta etapa é gerada a geometria de trabalho, posteriormente é realizada a discretização espacial, processo de geração de malha, especificação dos fenômenos físicos e condições de contorno.
- *Solver*: Onde ocorre a solução das equações de governo por meio de métodos numéricos.
- Pós-processamento: Etapa onde é realizada a análise dos resultados obtidos.

3.3.1 Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos é uma das técnicas de discretização mais versáteis utilizada na solução de escoamento de fluidos, devido a sua natureza conservativa.

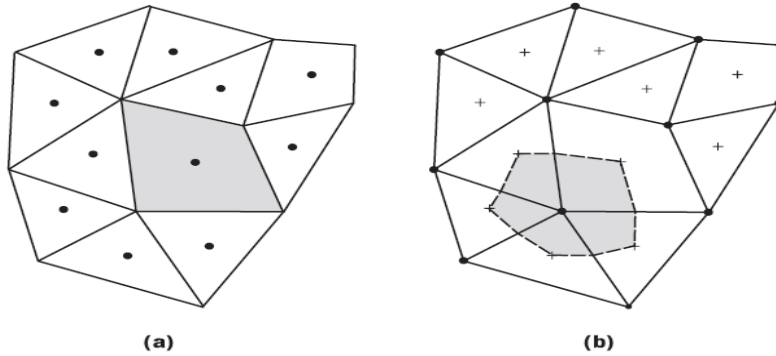
Segundo Hirsch (2007) o processo de discretização pode ser dividido em duas etapas: a discretização espacial e a discretização das equações.

Baseado na formulação analítica de volume de controle, o primeiro passo do método dos volumes finitos é criar elementos a partir do desenvolvimento de uma malha sobre um domínio computacional definido. É intuitivo que a acurácia de uma aproximação numérica é diretamente dependente do tamanho da malha gerada, ou seja, quanto maior o número de elementos gerados em uma malha, mais próxima a discretização espacial tende do meio contínuo e o erro associado à simulação numérica tende a zero.

A montagem de um volume de controle pode ser efetuada de duas maneiras: *cell vertex* ou *cell center*. A formulação *cell center* é aquela onde o elemento é o próprio volume de controle com o seu centro posicionado no centróide da célula, enquanto que na formulação *cell vertex*, o centro dos volumes de controle são posicionados sobre os nós, os vértices dos elementos, conforme mostra a Figura 3.1. O programa comercial ANSYS FLUENT efetua a montagem dos volumes de controle de maneira *cell center*.

Outro importante aspecto encontrado no método de volumes finitos é a utilização do arranjo deslocado ou co-localizado das variáveis. O arranjo co-localizado armazena as variáveis de interesse no centro dos volumes de controle enquanto o deslocado, as variáveis estão localizadas em posições diferentes. Atualmente a grande maioria dos programas de CFD utilizam o arranjo co-localizado das variáveis devido ao menor custo computacional e maior facilidade para trabalharem problemas que envolvem geometrias complexas. (FERZIGER et al., 1999).

Figura 3.1: Montagem do volume de controle: (a) *cell center* (b) *cell vertex*.



Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

Após o término da discretização espacial, o próximo passo é integrar a forma diferencial das equações de governo sobre cada volume de controle. A equação resultante é chamada de equação de discretização e, desta forma, deve expressar o princípio da conservação para a variável procurada dentro de cada volume de controle.

A característica marcante do método dos volumes finitos é que a solução resultante satisfaz a conservação de quantidades como massa, quantidade do movimento, energia, espécies, turbulência e outros escalares. Esta característica é totalmente satisfeita para qualquer volume de controle, assim como é válida para todo o domínio computacional.

Obras como Patankar (1980), Versteeg e Malalasekera (2007), Ferziger et al. (1999), Moukalled et al. (2016), entre outros, fazem uma abordagem mais completa sobre o método dos volumes finitos e são referências sobre o assunto.

3.3.2 Discretização das Equações

O processo de discretização consiste na integração das equações diferenciais em sua forma conservativa sobre os volumes de controle. Com base no teorema de *Gauss*, algumas integrais de volume podem ser representadas como integrais de superfície, no caso, a superfície de controle.

Assim, para a equação da conservação da massa, quantidade de movimento e equação da energia apresentadas na seção anterior, tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta(T, \dot{\gamma}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma}^2 \quad (3.15)$$

Integrando as equações sobre um volume de controle, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho u_i) dA = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_i dV + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho u_j u_i) dA = - \int_A \mathbf{n} \cdot P dA + \int_A \mathbf{n} \cdot \left[\eta(T, \dot{\gamma}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] dA \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho c_p T dV + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho c_p u_j T) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot \left[k \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] dA + \int_V S_\phi dV \quad (3.18)$$

onde V representa o volume de integração, A é a área da superfície de integração do volume de controle, dA é a magnitude do elemento de área da superfície de controle e \mathbf{n} é o vetor normal unitário apontado para fora. S_ϕ representa o termo fonte associado à dissipação viscosa do fluido, este termo refere-se ao efeito de aquecimento viscoso, ou seja, conversão da energia mecânica em calor devido ao atrito com as paredes. Estas integrais representam o somatório dos fluxos que atravessam cada uma das superfícies do volume de controle $\mathbf{n} \cdot dA$.

Os termos volumétricos S_ϕ (acúmulos e fontes) são aproximados de forma discreta pelos valores específicos em cada volume de controle, enquanto os fluxos são aproximados nas faces de cada volume de controle. Desta forma, segue as expressões que representam o somatório de todas estas contribuições.

$$V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot \dot{m}_f = 0 \quad (3.19)$$

$$V \left(\frac{\rho u_i - \rho^0 u_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot (\dot{m}_f u_i)_f = - \sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot (P \Delta A_j)_f + \sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot \left[n(T, \dot{\gamma}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta A_j \right]_f \quad (3.20)$$

$$V \left(\frac{\rho c_p T - \rho^0 c_p^0 T^0}{\Delta t} \right) + \sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot (\rho c_p u_j T \Delta A_j)_f = \sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot \left[k \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \Delta A_j \right]_f + S_\phi V \quad (3.21)$$

sendo que N_{faces} é número de faces do volume de controle, $\dot{m}_f = (\rho u_j \Delta A_j)_f$ representa o fluxo de massa através do elemento de área discreto na face ΔA_j orientado na direção do vetor unitário normal à face \mathbf{n}_j , o sobrescrito 0 representa o tempo anterior. Neste trabalho, por se tratar de um escoamento em regime estacionário, a discretização do termo temporal foi realizada utilizando uma formulação pseudo-transiente, o esquema de Euler implícito foi adotado.

3.3.3 Esquemas de Interpolação

As equações discretizadas anteriormente (Equações 3.19 ,3.20 e 3.21) podem ser escritas na forma geral da equação de transporte para uma variável ϕ genérica:

$$\underbrace{V \left(\frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right)}_{\text{termo temporal}} + \underbrace{\sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot (\dot{m}_f \phi)_f}_{\text{termo convectivo}} = \underbrace{\sum_f^{N_{faces}} \mathbf{n}_j \cdot \left[\Gamma_\phi \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \Delta A_j \right]_f}_{\text{termo difusivo}} + \underbrace{S_\phi V}_{\text{termo fonte}} \quad (3.22)$$

sendo ϕ a variável genérica de interesse, Γ é o coeficiente difusivo associado a ϕ , S_ϕ representa o termo fonte de ϕ por unidade de volume.

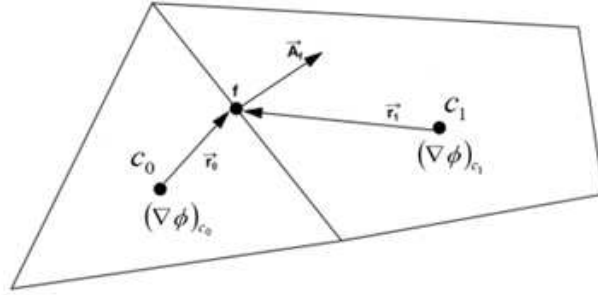
Os valores discretos da variável genérica ϕ são obtidos e armazenados nos centros dos volumes de controle, porém, os valores de ϕ nas faces (ϕ_f) são necessários para avaliar os termos convectivos e difusivos. As funções de interpolação têm como objetivo determinar o valor de uma propriedade genérica na interface do volume de controle.

No presente trabalho, o termo convectivo (ver Equação 3.22) foi interpolado utilizando o esquema *upwind* de segunda ordem que utiliza uma aproximação de reconstrução linear (BARTH; JESPERSEN, 1989). O valor de ϕ_f é estimado usando a seguinte expressão:

$$\phi_f = \phi_{up} + (\nabla\phi \cdot \vec{r}) \quad (3.23)$$

onde ϕ_{up} é o valor de ϕ da célula à montante (*upwind*), $\nabla\phi$ é o gradiente de ϕ e \vec{r} é o vetor posição entre o centro da célula a montante e a face do volume de controle, conforme mostra a Figura 3.2 a seguir.

Figura 3.2: Valores estimados nas faces do volume de controle.



Fonte: Adaptado de ANSYS FLUENT (2015).

Para avaliar o termo difusivo (ver Equação 3.22) é utilizado diferenças centrais com acurácia de segunda ordem (FLUENT Inc., 2015). Conforme mostra a Equação 3.24 a seguir:

$$\Gamma_{\phi f} = \frac{1}{2}(\phi_{c0} + \phi_{c1}) + \frac{1}{2}(\nabla\phi_0 \cdot \vec{r}_0 + \nabla\phi_1 \cdot \vec{r}_1) \quad (3.24)$$

sendo que os subscritos 0 e 1 são referentes aos volumes de controle que compartilham a face f (ver Figura 3.2), $\nabla\phi$ representam os gradientes de cada um dos volumes de controle e \vec{r} são os vetores posições entre os centros das células e a face do volume de controle.

O gradiente de ϕ , $\nabla\phi$, localizado no centro de cada volume de controle (ver Figura 3.2) é estabelecido através do teorema de *Green-Gauss*, descrito na seguinte forma discretizada:

$$(\nabla\phi)_{c0,c1} = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\phi}_f \mathbf{n}_j \cdot \Delta A_j \quad (3.25)$$

onde V é o volume da célula.

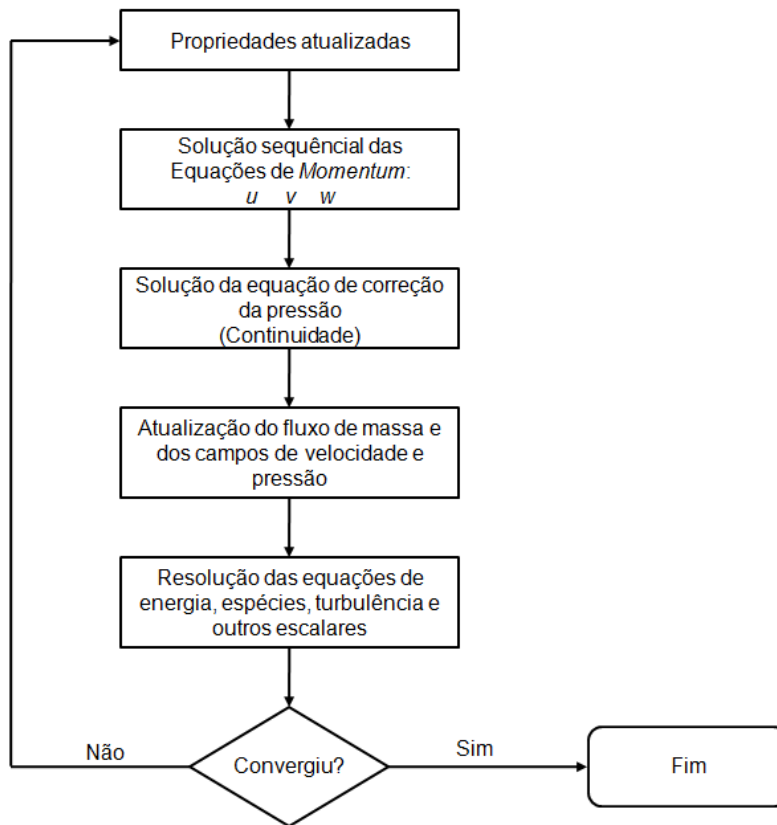
O valor médio de $\bar{\phi}_f$ é definido como a média aritmética dos valores dos centros dos volumes de controle vizinhos à face,

$$\bar{\phi}_f = \frac{1}{2}(\phi_{c0} + \phi_{c1}). \quad (3.26)$$

3.3.4 Métodos utilizados para solução das equações

O algoritmo para a solução do escoamento proposto emprega a metodologia segregada, onde as equações de governo são resolvidas individualmente e sequencialmente para a solução de cada uma de suas variáveis (u , v , w , P , energia) (FLUENT Inc., 2015). O fluxograma do algoritmo da solução segregada é mostrado na Figura 3.3, a seguir.

Figura 3.3: Fluxograma do algoritmo da solução segregada.



Fonte: Adaptado de (FLUENT®, 2015).

A vantagem do método de solução segregada é que o conjunto de equações para cada variável resulta em sistemas lineares significativamente menores do que aquele que é obtido pelo método acoplado. No método de solução segregado a matriz resultante apresenta baixo índice de esparsidade, diferentemente do método acoplado que gera uma matriz resultante com altíssimo índice de esparsidade. Desta forma, além de se exigir menos dos métodos de solução de sistemas lineares, a memória computacional requerida também é reduzida (MALISKA, 2004).

A solução segregada das equações de governo, para escoamentos incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Portanto, deve-se dispor de uma equação evolutiva para o campo de pressão que, quando inserido na equação de conservação da quantidade de movimento, gere um campo de velocidade que satisfaça a equação da conservação da massa. (MALISKA, 2004).

A falta de uma equação dedicada para a pressão é a principal dificuldade encontrada na resolução das equações de Navier-Stokes aplicadas a escoamentos incompressíveis, diferentemente do que ocorre com escoamentos compressíveis. Na solução de problemas compressíveis as variáveis do sistema de equação são: massa específica, pressão, temperatura e os campos de velocidade. Desta forma, há uma correlação da massa específica com a pressão, representada pela equação de estado. Portanto ao se utilizar da solução segregada para escoamentos compressíveis tem-se claramente uma equação para evoluir cada variável, ou seja, a massa específica pode ser calculada a partir da equação da conservação da massa, a pressão da equação de estado, as velocidades das equações de conservação de movimento e a temperatura a partir da equação de energia.

Em escoamentos incompressíveis a massa específica não tem uma forte dependência com a pressão, o que torna o sistema numericamente instável quando se utiliza a equação de estado para avaliar a pressão. Sendo assim, Chorin desenvolveu dois métodos para tratar o problema do acoplamento em escoamentos incompressíveis. Um método denominado compressibilidade artificial (CHORIN, 1967) e outro método que cria uma equação de Poisson para calcular o campo de pressão através de um procedimento iterativo (CHORIN, 1968).

Neste trabalho para resolver o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLE (PATANKAR; SPALDING, 1972), baseado no método de (CHORIN, 1968).

Como o programa ANSYS FLUENT utiliza um arranjo de malha co-localizada e, tal arranjo produz soluções não-físicas no campo de pressão (efeito *checker-board*, ou também conhecido desacoplamento par-ímpar), é necessário usar um método de interpolação para corrigir as oscilações criadas. Para resolver este problema foi utilizado o esquema proposto por Rhie-Chow (RHIE; CHOW, 1983).

3.3.5 Solução do Sistema Linear

Após a discretização das equações de governo, o conjunto de equações é reduzido a um sistema linear do tipo

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.27)$$

onde nb indica os nós vizinhos ao volume de controle, b é o termo fonte, a_p é o coeficiente principal e a_{nb} são os coeficientes linearizados das células vizinhas ao volume de controle para solução de ϕ_p .

O ANSYS FLUENT utiliza o método iterativo de *Gauss-Seidel* para resolver o sistema linear com auxílio do método *multigrid* algébrico (AMG) proposto por (HUTCHINSON; RAITBY, 1986).

Os métodos *mutigrid* proporcionam maior velocidade de convergência através de uma sequência de correções em uma série de níveis de refinamento da malha. O uso desta técnica reduz o número de iterações e o tempo de processamento exigido para obter uma solução convergida. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.3.6 Critério de Convergência

Como critério de convergência, para todos os casos estudados neste trabalho, as soluções dos sistemas lineares são consideradas convergidas quando o resíduo normalizado R^ϕ torna-se menor que $R^\phi < 10^{-6}$. A Equação 3.27 pode ser escrita através da seguinte relação:

$$R^\phi = \frac{\sum_{celulas} [\sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b - a_p\phi_p]}{\sum_{celula} a_p\phi_p} \quad (3.28)$$

Capítulo 4

Validação e Verificação da Solução Numérica

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das simulações numéricas para efeito de comparação com soluções de outros autores. Esta comparação visa, a validação e verificação da função para cálculo de viscosidade (Lei de *Cross*) implementada dentro do programa comercial ANSYS FLUENT aplicado na solução de escoamentos de polímeros fundidos.

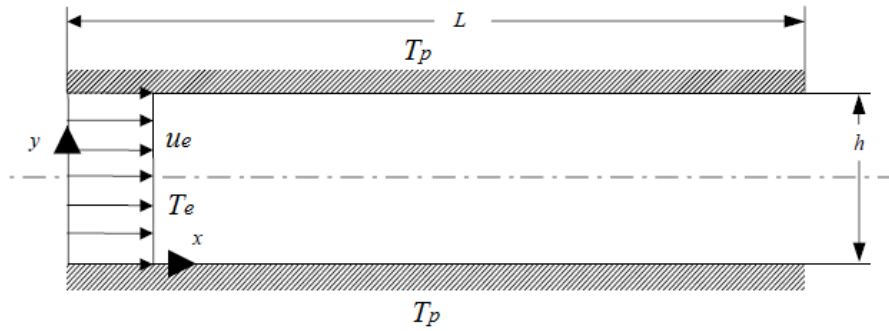
De forma resumida, a verificação é a avaliação da acurácia da solução para um modelo computacional por meio da comparação com soluções numéricas já conhecidas. Enquanto que a validação é a avaliação da acurácia de uma simulação computacional através da comparação com dados experimentais (OBERKAMPF; TRUCANO, 2002).

4.1 Canal Plano

O primeiro teste para a verificação compara o presente método numérico com a solução numérica proposta Zdanski et al. (2008a) em um canal plano. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) é adotada e o modelo de *Cross* é utilizado para descrever o comportamento reológico do polímero fundido. Neste teste são comparados os perfis de temperatura para diversos pontos na direção x ao longo do escoamento.

O domínio computacional para este teste é ilustrado na Figura 4.1, com $L = 50h$ e $h = 4 \text{ mm}$. A velocidade de entrada do fluido $u_e = 3 \text{ cm/s}$, a temperatura de entrada T_e e das paredes T_p são iguais, $T_e = T_p = 423 \text{ K}$.

Figura 4.1: Canal plano de placa paralelas.

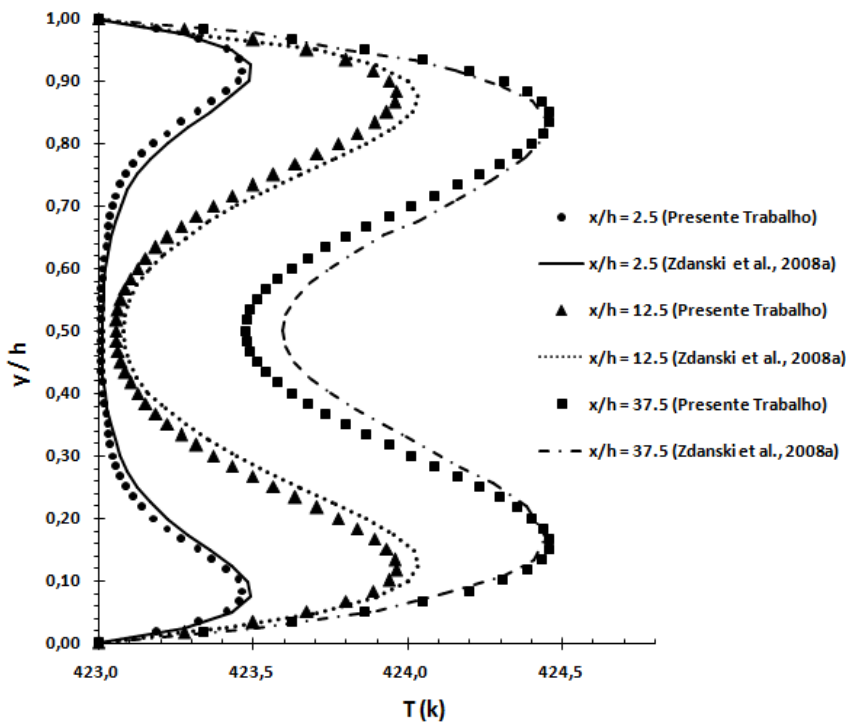


Fonte: Adaptado de Zdanski et al. (2008a).

Os dados referentes às propriedades termofísicas do material, bem como, massa específica, calor específico e condutividade térmica estão especificados na seção 3.2.2 deste trabalho.

Para realizar a simulação do escoamento foi utilizada uma de malha estruturada com 110 x 32 volumes de controle (coordenadas x e y). A Figura 4.2 mostra o perfil de temperatura na seção selecionada x/h ao longo do comprimento do canal. A diferença máxima entre os trabalhos ocorre para $x/h = 37.5$ e $y/h = 0.5$, a diferença de temperatura neste ponto é de 0.13 K , ou seja, diferença menor que 1% entre as soluções.

Figura 4.2: Perfis de temperatura para determinados x/h .



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

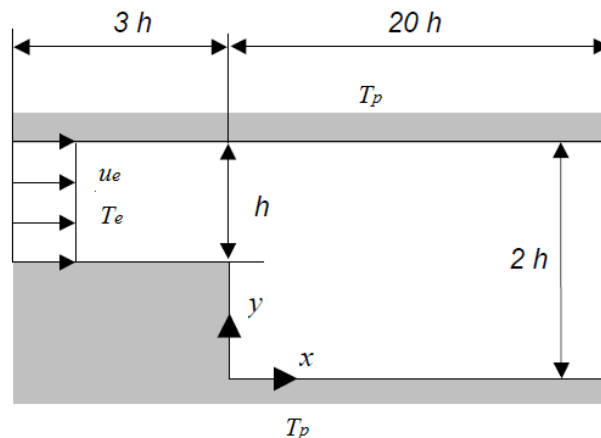
O resultado entre as soluções numéricas é bastante satisfatório, creditado apenas a diferença entre os esquemas utilizados em cada simulação. As duas soluções trabalham com a metodologia de volumes finitos, porém a solução proposta por Zdanski et al. (2008a) utiliza um esquema de segunda ordem para tratar o acoplamento pressão – velocidade e dissipação artificial para controlar as oscilações numéricas, enquanto o presente trabalho utiliza o algoritmo SIMPLE para tratar o acoplamento pressão – velocidade e o método de Rhie-Chow para controlar as oscilações numéricas devido ao arranjo colocalizado.

4.2 Canal com Expansão Súbita Bidimensional

O segundo teste para a verificação compara o presente método numérico com a solução numérica proposta Zdanski et al. (2008b) em um canal com expansão súbita bidimensional com razão de aspecto ($ER = H/h$) igual a dois. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) é adotada e o modelo de *Cross* é utilizado para descrever o comportamento reológico do polímero fundido. Neste teste é comparado a distribuição do número de Nusselt local para a parede inferior do canal na direção x ao longo do escoamento para duas velocidades de entrada.

O domínio computacional para este teste é ilustrado na Figura 4.3, com $h = 4 \text{ mm}$. Duas velocidades de entrada foram utilizadas $u_e = 6 \text{ cm/s}$ e $u_e = 18 \text{ cm/s}$, a temperatura de entrada do fluido e as temperaturas nas paredes correspondem $T_e = 473 \text{ K}$ e $T_p = 453 \text{ K}$, respectivamente.

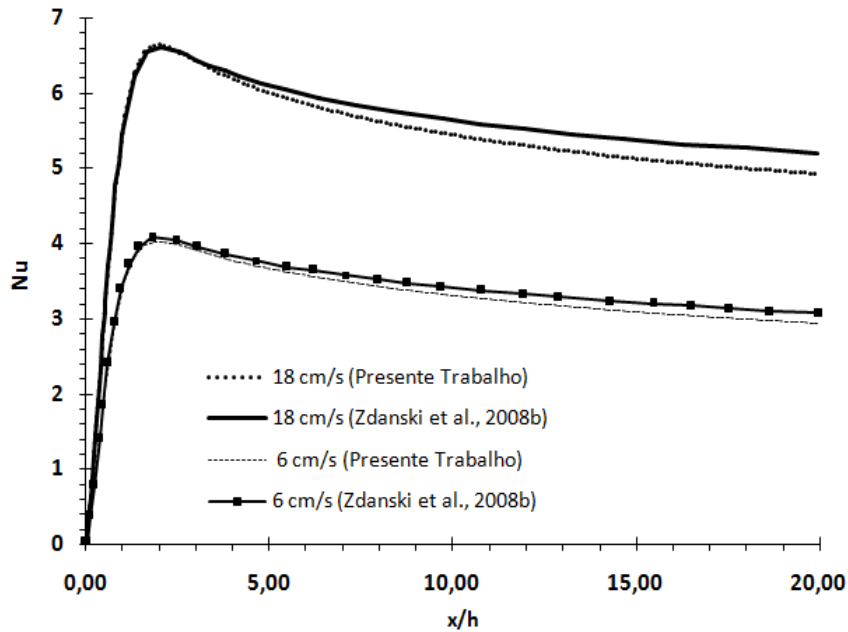
Figura 4.3: Canal bidimensional com expansão súbita cartesiana.



Fonte: Adaptado de Zdanski et al. (2008b).

Para realizar a simulação do escoamento foi utilizada uma malha estruturada não uniforme, com um maior refino de malha próximo as paredes e junto ao degrau. Um total de 41x81 nós a montante e 151x161 nós a jusante da expansão foram utilizados para discretizar o canal. A Figura 4.4 mostra a distribuição de Nusselt local para a parede inferior, ou seja, $y = 0$, ao longo do comprimento do canal.

Figura 4.4: Distribuição de Nusselt local.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Em relação aos resultados obtidos, onde a malha é mais refinada quase não há diferença entre os valores, as maiores diferenças entre os trabalhos ocorrem nas saídas dos canais. Para a velocidade de entrada de $u_e = 6 \text{ cm/s}$ a diferença é 3,5 % e para velocidade de entrada de $u_e = 18 \text{ cm/s}$ a diferença é de 6,6 %.

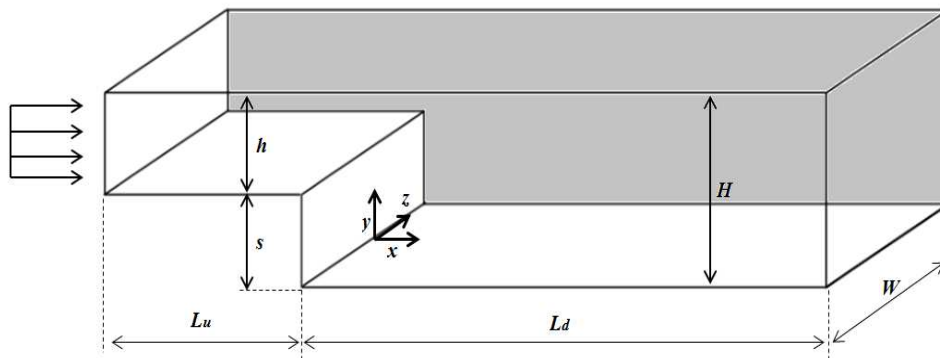
4.3 Canal com Expansão Súbita Tridimensional

O último teste para a verificação compara o presente método numérico com a solução numérica proposta Zdanski e Vaz Jr. (2009b) em um canal com expansão súbita-tridimensional com razão de expansão ($ER = H/h$) igual a dois e razão de aspecto ($AR = W/h$) igual a quatro. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) é adotada e o modelo de *Cross* é utilizado para descrever o comportamento reológico do polímero fundido. Neste teste são comparados os perfis de temperatura adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido, tamanho de vórtice na região à jusante da expansão e linhas de corrente para diversos planos em x , y e z .

O domínio computacional para esta comparação é ilustrado na Figura 4.5, com $h = 2 \text{ mm}$, $H = 4 \text{ mm}$ e $H = h + S$. O comprimento do canal para a região a montante da expansão é considerado $L_u = 3 h$ e para região a jusante $L_d = 40 h$. A razão de aspecto ($AR = W/h$) é assumida igual a quatro. As temperaturas de entrada e paredes são iguais, $T_e = T_p = 453 \text{ K}$ e a velocidade de entrada do fluido $u_e = 6 \text{ cm/s}$.

A malha adotada neste problema é não uniforme somente na direção x com um refino de malha maior próximo a região de expansão. Um total de $21 \times 31 \times 101$ nós a montante e $101 \times 61 \times 101$ nós a jusante da expansão foram utilizados para construção da malha. O domínio computacional final é composto por 688.012 elementos.

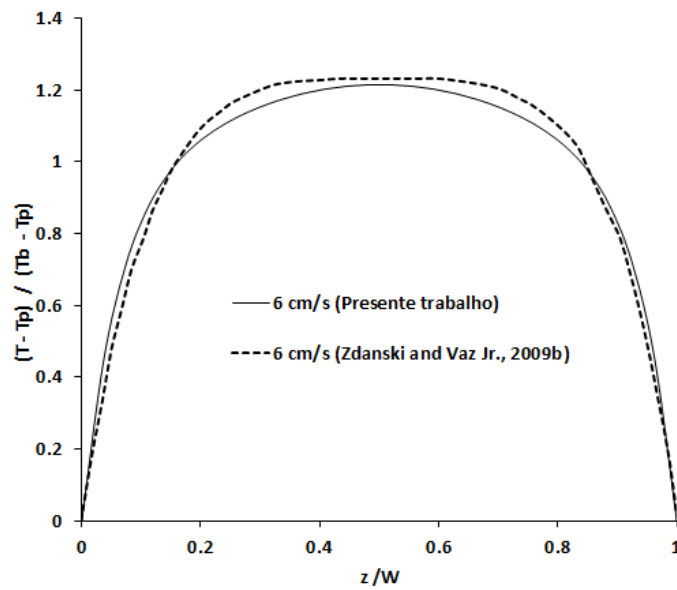
Figura 4.5: Canal tridimensional com expansão súbita.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Para este teste de verificação, foi comparado o perfil de temperatura para uma região com escoamento plenamente desenvolvido, o tamanho do vórtice formado a jusante da expansão e linhas de corrente em diversos planos em x , y e z . A Figura 4.6 mostra o perfil de temperatura para região com o escoamento completamente desenvolvido na seção selecionada z/W .

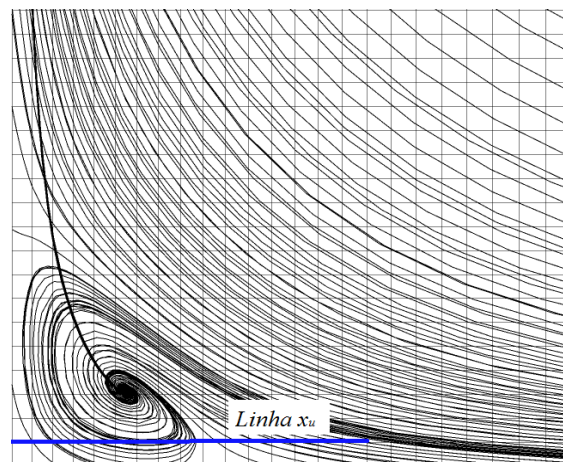
Figura 4.6: Perfil de temperatura adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido ($y = H/2$ e $x = 40h$).



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

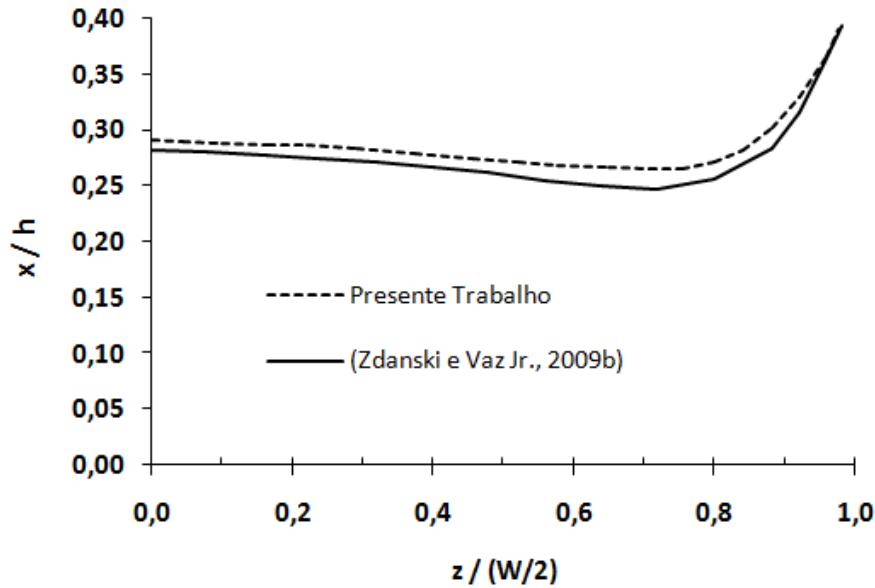
O próximo estudo comparativo entre as soluções é realizado pela linha x_u . A linha x_u refere-se ao campo de velocidade apenas na direção da componente u mensurada em $y/S = 0.05$, ou seja, próxima a parede inferior do canal e na região do segundo nó do domínio computacional, como demonstrado a seguir na Figura 4.7. A linha x_u tem como objetivo medir o tamanho do vórtice formado pelo escoamento após a região de expansão do canal, através da verificação de mudança de sinal do campo de velocidade (SALDANA et al., 2005). A Figura 4.8 mostra o perfil da linha x_u na direção do escoamento para o plano $x-z$.

Figura 4.7: Linha x_u na direção do escoamento.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 4.8: Comparação entre os tamanhos de vórtices.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

No que se refere ao tamanho do vórtice, a diferença máxima entre as soluções é de aproximadamente 5 % e ocorre próxima a região de $z/(W/2) = \pm 0.7$ (ver Figura 4.8). Nota-se pelo centro do canal ($z/(W/2) = 0.0$) que o comprimento de vórtice decresce suavemente até a região de $z/(W/2) = \pm 0.7$, seguido por um aumento acentuado nas proximidades das paredes laterais devido ao atrito ($z/(W/2) = \pm 1.0$).

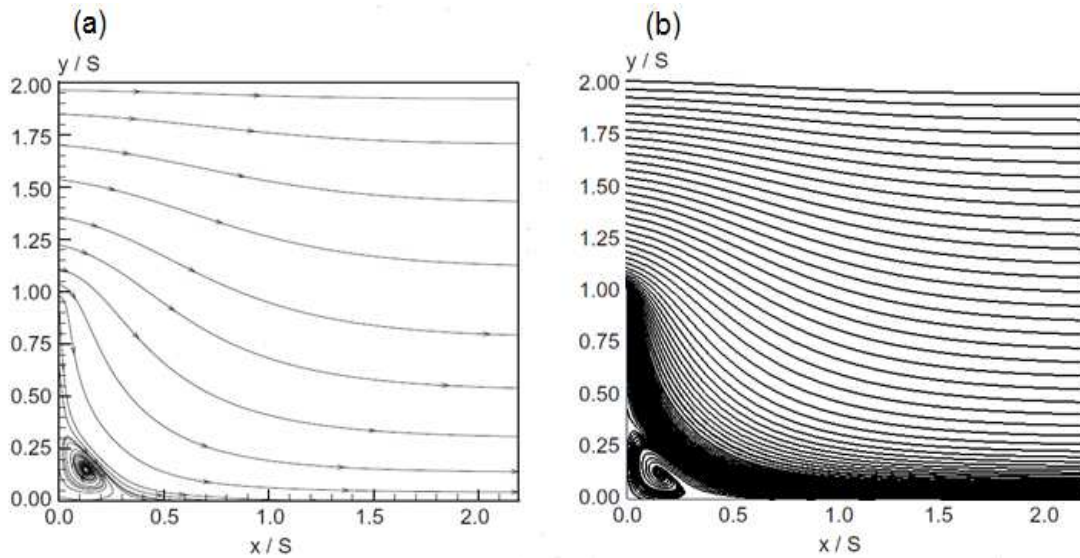
Por fim, foi realizado um estudo comparativo na topologia do escoamento por meio de linhas de corrente para diversos planos bidimensionais nas direções x , y e z .

Primeiramente, foi realizada a comparação entre as linhas de corrente no plano $x-y$ para duas posições em z/S . A primeira imagem, Figura 4.9, compara as linhas de corrente no meio do canal ($z/S = 0$) e a segunda ilustração, Figura 4.10, faz a análise das linhas de corrente próxima a região de parede ($z/S = \pm 1,92$).

É possível perceber pela Figura 4.9 a semelhança dos vórtices entre os dois trabalhos, com dimensões máximas próximas as regiões de $y/S = 0.33$ e $x/S = 0.29$. A topologia do escoamento para este região é qualitativamente similar apresentado por escoamentos em canais com expansões súbitas bidimensionais.

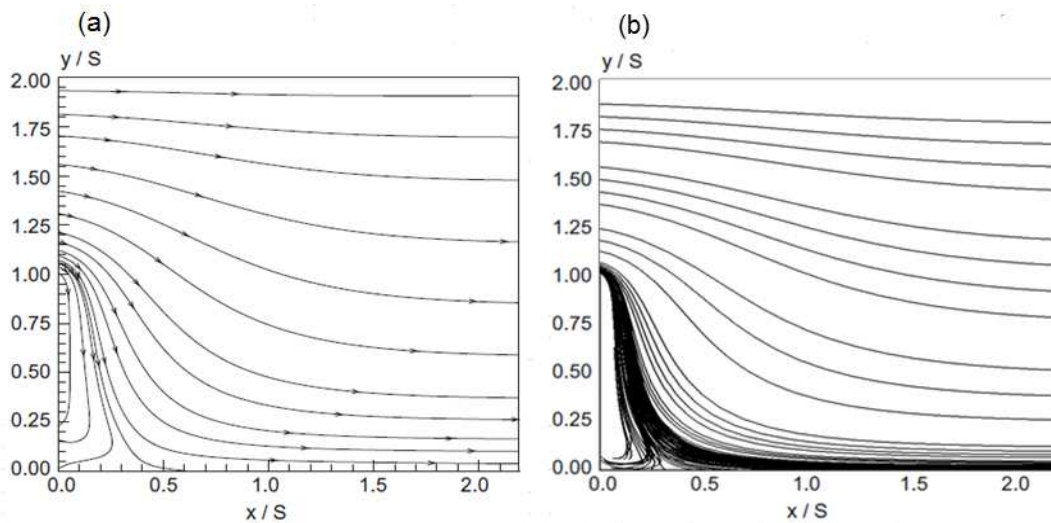
Para uma região mais próxima das paredes laterais, $z/S = \pm 1.92$, o efeito tridimensional é mais relevante devido ao atrito e a elevada viscosidade do fluido (Ver Figura 4.10). Nota-se que o padrão do escoamento muda drasticamente. Para esta posição ($z/S = \pm 1.92$) ainda não existe uma região de recirculação de fluido bem definida.

Figura 4.9: Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-y$ em $z/S = 0$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 4.10: Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-y$ em $z/S = \pm 1.92$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.



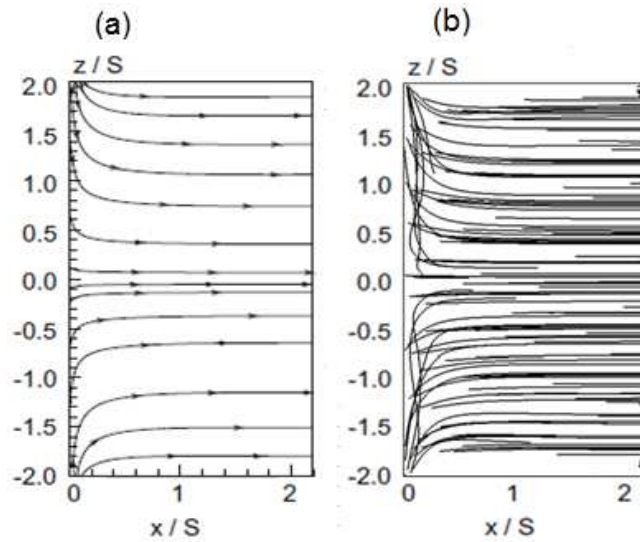
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Na sequência, foi realizado o estudo comparativo entre as linhas de corrente no plano $x-z$ para duas posições em y/S . A primeira imagem, Figura 4.11, compara as linhas de corrente na metade da altura do canal, ou seja, $y/S = 0.5$. A segunda ilustração, Figura 4.12, faz a análise das linhas de corrente próxima a parede superior do canal $y/S = 1.5$.

Verifica-se pela Figura 4.11 que as linhas de corrente na metade da altura do canal ($y/S = 0.5$) são conduzidas a partir das regiões de paredes laterais ($z/S = \pm 2.0$) para o centro do canal ($z/S = 0.0$), além de apresentar um padrão simétrico. A partir da

região $x/S = 1.0$ a trajetória das linhas de corrente torna-se paralela às paredes laterais. Ademais, nesta posição ($y/S = 0.5$) já não é possível verificar a existência de vórtices.

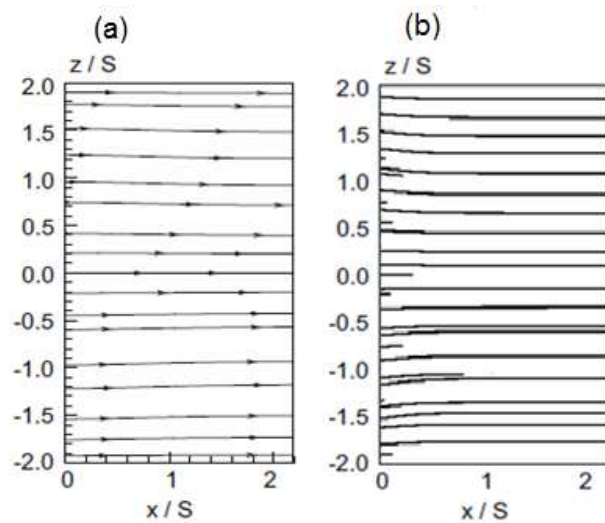
Figura 4.11: Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-z$ em $y/S = 0.5$ (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Para uma região próxima a parede superior do canal ($y/S = 1.5$) as linhas de corrente para o plano $x-z$ são paralelas às paredes laterais e seguem o escoamento, conforme mostra a Figura 4.12. Nesta região a influência da expansão abrupta é pequena, há apenas uma leve declínio das linhas de corrente para o plano $x-y$, como é possível observar na Figura 4.10, mostrada anteriormente.

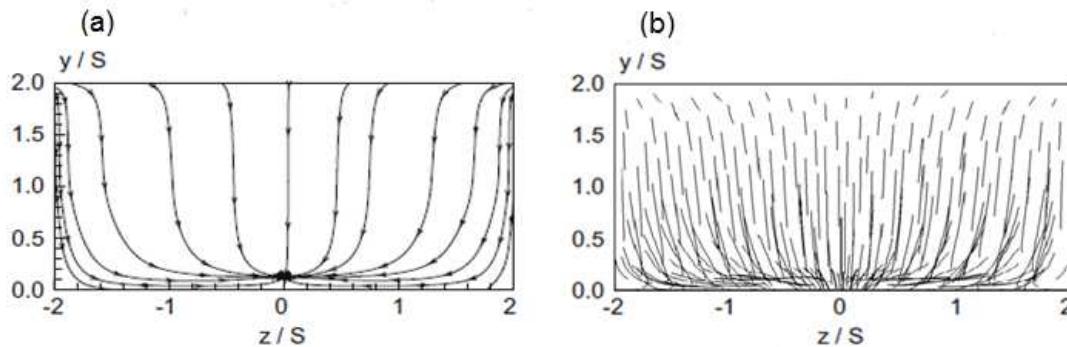
Figura 4.12: Comparação entre as linhas de corrente para o plano $x-z$ em $y/S = 1.5$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b) (b) presente trabalho.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Finalmente, no plano $y-z$ foi realizada a comparação entre as linhas de corrente para uma posição em x/S . A Figura 4.13, compara as linhas de corrente próxima à região de expansão, $x/S = 0.14$. Essa região compreende o meio da zona de recirculação, como é mostrado na Figura 4.9. Percebe-se novamente por outro plano que o fluido após a expansão abrupta se movimenta a partir das regiões de paredes laterais ($z/S = \pm 2.0$) para o centro do canal ($z/S = 0.0$).

Figura 4.13: Comparação entre as linhas de corrente para o plano $y-z$ em $x/S = 0.14$. (a) (ZDANSKI; VAZ JR., 2009b)(b) presente trabalho.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Como conclusão desta seção, nota-se através dos resultados obtidos que o modelo reológico de *Cross* implementado com o auxílio da UDF no programa comercial ANSYS FLUENT produz resultados satisfatórios.

Em um primeiro momento, foi realizada a verificação para o escoamento de um polímero fundido em um canal plano com placas paralelas. O objetivo principal foi avaliar a metodologia numérica utilizada nesta dissertação com um trabalho que utilizasse o mesmo método numérico (Método dos Volumes Finitos) e a mesma função material para descrever o comportamento do fluido. Como resposta, o teste apresentou um ótimo resultado, obtendo uma diferença menor que 1% entre as soluções.

Posteriormente, o presente trabalho foi comparado com estudos que utilizaram a metodologia numérica de diferenças finitas para resolução do escoamento em canais com expansões súbitas assimétricas. Os resultados foram satisfatórios, creditados as diferenças entre os métodos numéricos. O método de diferenças finitas avalia as propriedades genéricas nos nós do domínio computacional, enquanto que o método de volumes finitos estima as mesmas propriedades nas interfaces dos volumes de controle. Uma vez que as propriedades são não lineares, as diferenças na localização contribui para as diferenças observadas.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

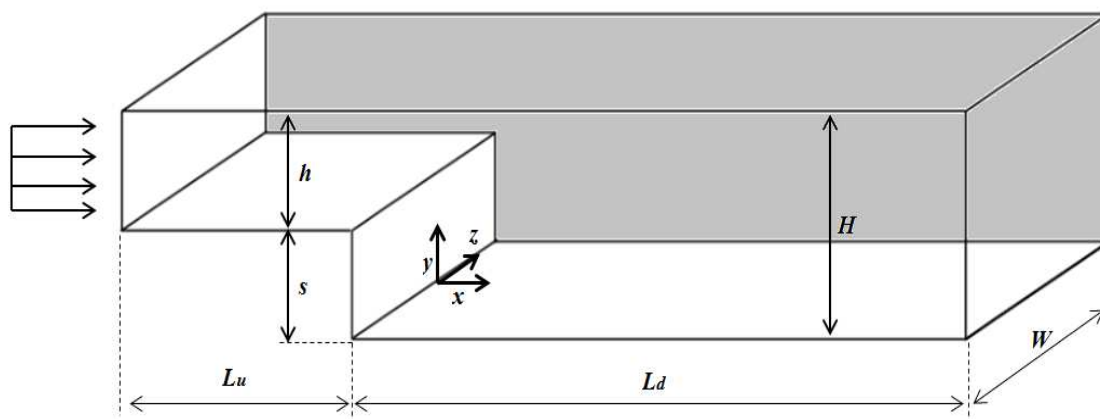
Nesta seção são discutidos os resultados numéricos para o escoamento de um polímero fundido através de canais tridimensionais assimétricos com diferentes tipos de expansões abruptas. A formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) é adotada e a lei de *Cross* é utilizada para descrever o comportamento reológico do polímero fundido. Todos os resultados computacionais foram obtidos utilizando o programa comercial ANSYS FLUENT.

Primeiramente são apresentados o domínio computacional, condições de contornos para os casos analisados e parâmetros globais e locais que serão estudados. Em um segundo momento é realizado um estudo de convergência de malha para garantir que a solução numérica seja independente da malha utilizada. Posteriormente é analisado e discutido a topologia do escoamento através de linhas de corrente, comprimento de vórtices, contornos de velocidade, temperatura, taxa de deformação equivalente e viscosidade. Por fim, uma análise paramétrica para queda de pressão e distribuição de Nusselt é discutida.

5.1 Domínio Computacional

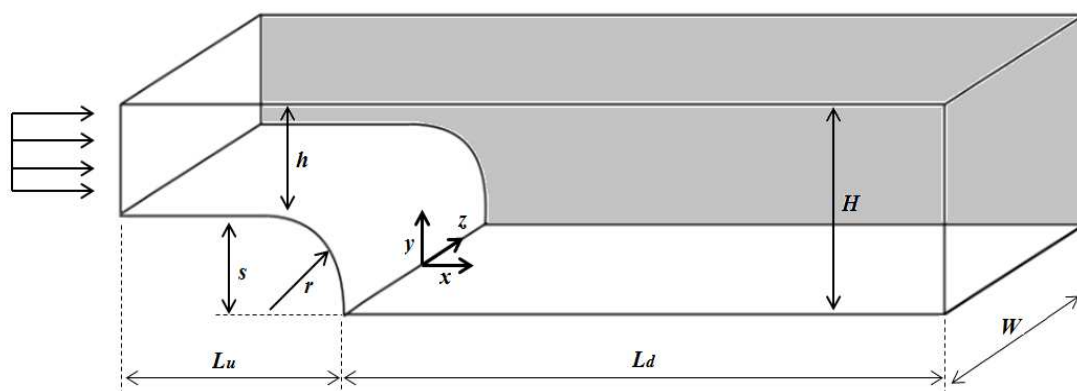
No presente trabalho são estudados três diferentes geometrias de canais com expansões tridimensionais. Um canal com expansão súbita, um canal com expansão circular e outro canal com expansão tipo rampa. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 a seguir, ilustram os canais estudados.

Figura 5.1: Canal com expansão súbita.



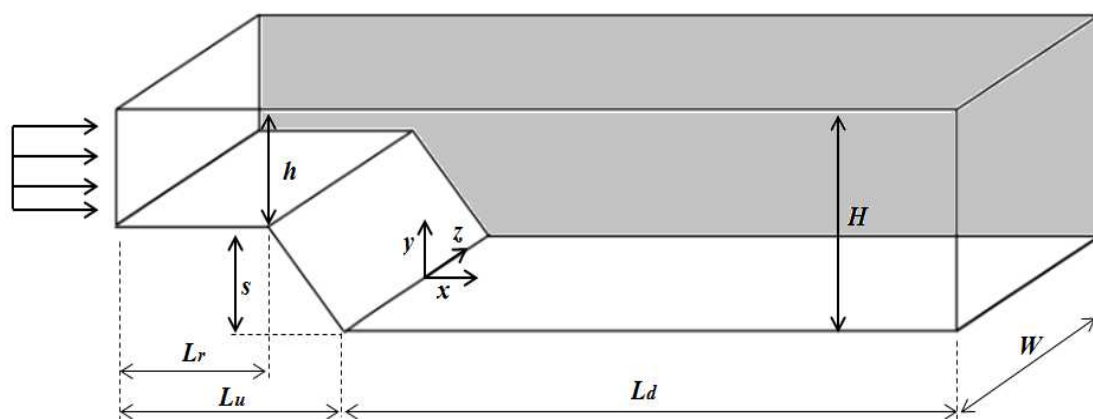
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.2: Canal com expansão circular.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.3: Canal com expansão tipo rampa.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

De modo geral, o domínio computacional para os três canais é representado por $h = 2mm$ e $H = 4mm$, ou seja, razão de expansão ($ER = H/h$) igual a dois, tendo $H=h+S$. Os comprimentos dos canais para região a montante da expansão são $L_u = 3h$ e para região a jusante $L_d = 40h$. A razão de aspecto ($AR = W/h$) é variada para três valores distintos: 2, 4 e 6.

Para o canal de expansão circular (ver Figura 5.2), o comprimento do raio, r , é considerado tendo a mesma dimensão da altura do degrau, $r = S$. Já para o canal tipo rampa (ver Figura 5.3), $L_r = 2h$ e a rampa possui um ângulo de inclinação de 45° .

5.1.1 Condições de contorno

Uma questão fundamental é a definição das condições de contorno. Há três condições de contornos relevantes para este trabalho: condições de contorno de entrada, de parede e de saída.

As condições de contorno para os três canais são similares. No plano de entrada, é considerada uma distribuição uniforme de velocidade igual à velocidade de injeção, $u_e = 6 \text{ cm/s}$, e a temperatura do fluido igual $T_e = 478 \text{ K}$. Além disso, assume-se uma variação linear da pressão a partir dos pontos internos à seção de entrada. Como a solução é iterativa, o nível de pressão se estabelece automaticamente. É importante destacar que o número de Reynolds baseado nas condições de entrada Re_h é da ordem de 10^{-4} o que caracteriza um escoamento no regime laminar.

$$Re_h = \frac{\rho u_e h}{\eta(\dot{\gamma})} \approx 10^{-4} \quad (5.1)$$

Nas paredes, atribui-se um valor de temperatura prescrita, $T_p = 453 \text{ K}$, e velocidades nulas para componentes u , v e w (condição de não-deslizamento); a pressão nas paredes também é obtida através de uma extrapolação de derivada nula, vale a seguinte relação:

$$\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\text{parede}} = 0 \quad (5.2)$$

sendo \mathbf{n} o vetor normal à parede.

Por fim, no plano de saída, admite-se condição de contorno localmente parabólica. Uma forma de traduzir matematicamente a condição parabólica é impor a derivada nula para todas as variáveis na saída, ou seja, as propriedades neste plano são iguais às propriedades dos pontos internos à seção de saída.

5.2 Definição dos Parâmetros Locais e Globais

Nesta seção são apresentadas as definições dos parâmetros que são analisados no presente trabalho, além da topologia do escoamento, a saber: (i) variação de pressão e (ii) distribuição do número de Nusselt.

5.2.1 Análise da variação de pressão global e local

A queda de pressão estática global nos canais é representada pela seguinte equação:

$$\Delta\bar{p} = \bar{p}_e - \bar{p}_s \quad (5.3)$$

onde os subscritos e e s representam a entrada e saída, respectivamente. A pressão estática média \bar{p} em um plano transversal é definida como:

$$\bar{p} = \frac{\int p d_{as}}{\int d_{as}}. \quad (5.4)$$

Ademais, a queda de pressão adimensional é obtida pela seguinte expressão (ZDANSKI; VAZ JR., 2009a):

$$C_I \equiv \frac{\Delta\bar{p}}{(1/2)\rho(u_e)^2}. \quad (5.5)$$

Finalmente, a pressão estática média em uma linha no eixo y , \bar{p}_y , ao longo do canal na direção do escoamento é obtida pela seguinte equação:

$$\bar{p}_y = \frac{\int p d_y}{\int d_y}. \quad (5.6)$$

5.2.2 Número de Nusselt

O número de Nusselt é uma grandeza adimensional muito utilizada para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Fisicamente, o número de Nusselt representa a razão entre a transferência de calor de um fluido por convecção e condução em um sólido de comprimento característico S .

O Nusselt local é apresentado na Equação 5.7 :

$$Nu = \frac{h_c S}{k} \quad (5.7)$$

onde S é a altura do degrau, k o coeficiente de condutividade térmica e h_c é o coeficiente convectivo, sendo definido como:

$$h_c = \frac{q_s''}{T_p - T_e}. \quad (5.8)$$

Na Equação 5.8 , q_s'' , é definido como o fluxo de calor calculado na parede inferior do canal, T_e e T_p representam as temperaturas de entrada do fluido e paredes, respectivamente.

Por outro lado, o Nusselt médio em uma dada seção normal à direção do escoamento é calculado pela seguinte equação:

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h_c} S}{k} \quad (5.9)$$

onde $\overline{h_c}$ é coeficiente convectivo médio, sendo definido como:

$$\overline{h_c} = \frac{\overline{q_s''}}{T_p - T_e} \quad (5.10)$$

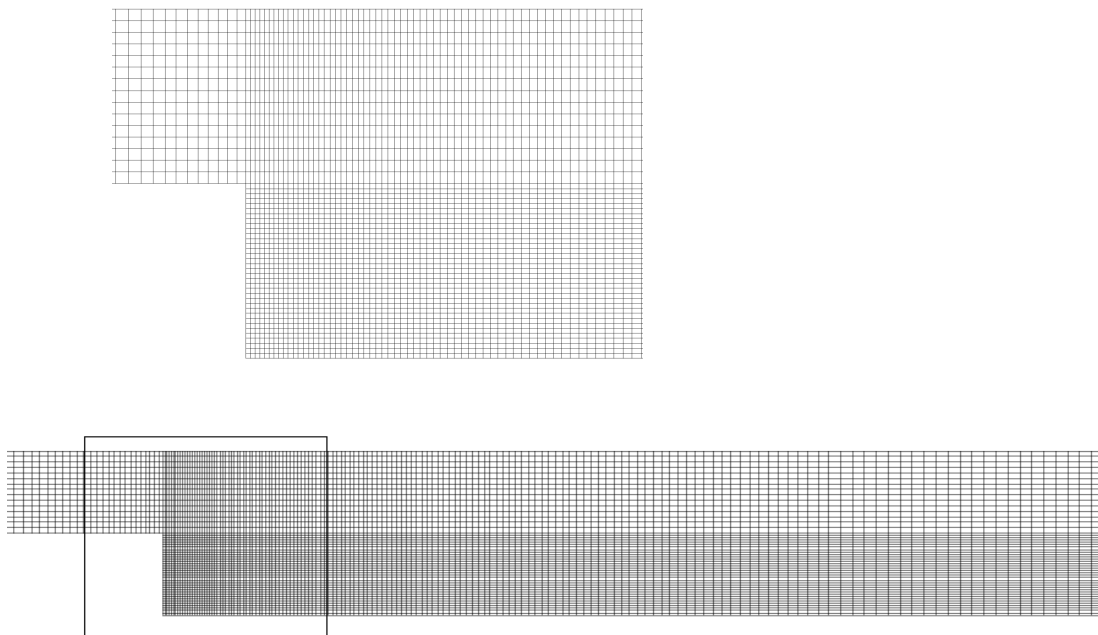
onde $\overline{q_s''}$ é o valor médio do fluxo de calor que atravessa as quatro paredes do canal.

5.3 Análise de Convergência de Malha

As análises para convergência de malha foram realizados com quatro diferentes malhas: 1,5 milhões de elementos; 1,23 milhões de elementos; 830 mil elementos e, por último um domínio computacional com 650 mil elementos.

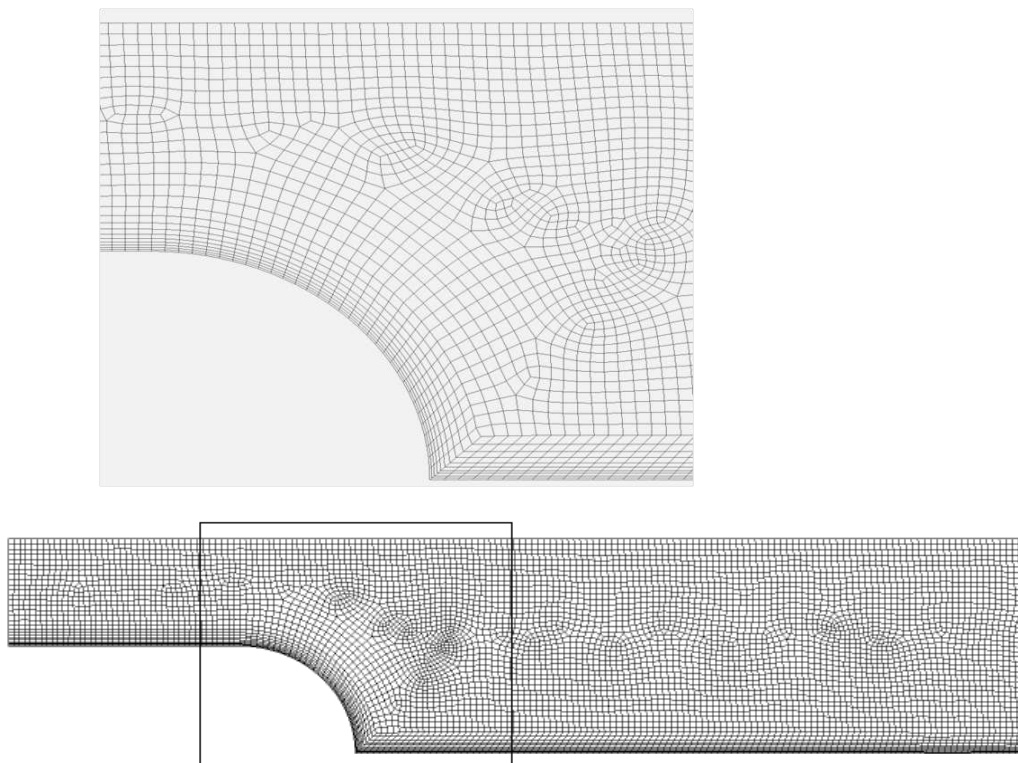
O refino de malha foi realizado próximo à região de expansão e na direção x do escoamento com um fator de alongamento máximo de 4 % como é possível verificar na ilustração das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. No eixo y , a malha possui dois tamanhos distintos, um refino maior é feito na parte inferior do canal e, no eixo z a malha possui tamanho uniforme. As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram o número de divisões utilizadas para gerar a malha nas coordenadas x , y e z à montante e à jusante da expansão, respectivamente.

Figura 5.4: Malha do domínio computacional para o canal com expansão súbita.



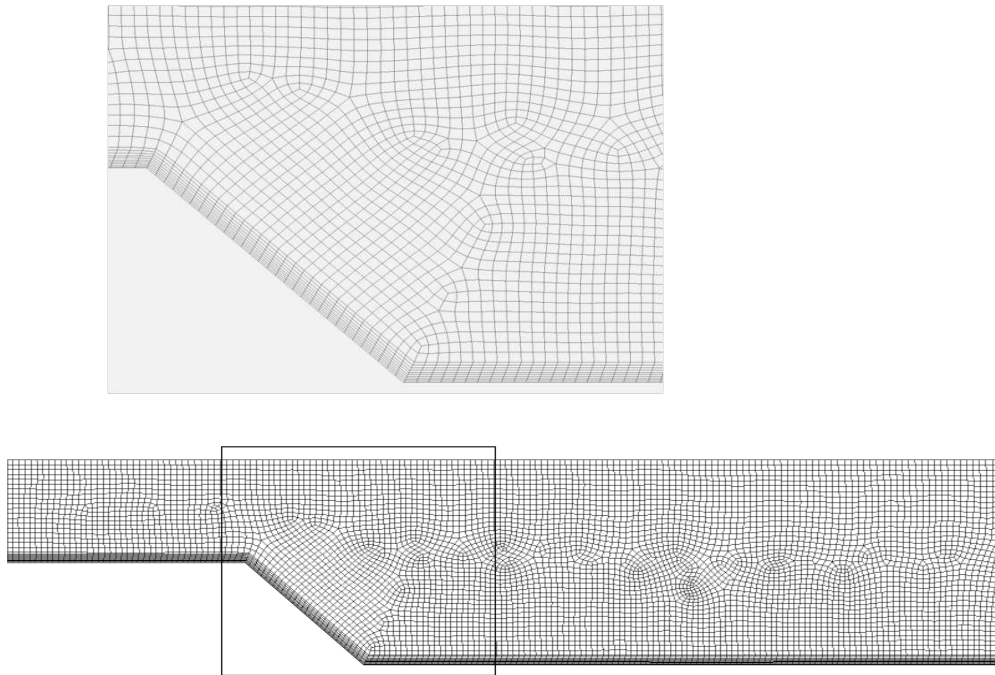
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.5: Malha do domínio computacional para o canal com expansão circular.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.6: Malha do domínio computacional para o canal com expansão tipo rampa.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Tabela 5.1: Números de divisões à montante da expansão

Domínio Computacional	x	y	z
<i>650 mil elementos</i>	30	15	48
<i>830 mil elementos</i>	30	15	52
<i>1,23 Mi de elementos</i>	30	15	65
<i>1,5 Mi de elementos</i>	38	15	65

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Tabela 5.2: Números de divisões à jusante da expansão

Domínio Computacional	x	y	z
<i>650 mil elementos</i>	304	28	48
<i>830 mil elementos</i>	332	32	52
<i>1,23 Mi de elementos</i>	371	35	65
<i>1,5 Mi de elementos</i>	410	40	65

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Para este teste foi simulado apenas o canal com expansão súbita e razão de aspecto (AR= W/h) igual a seis (ver Figura 5.1). Foram avaliados a queda de pressão estática ao longo do canal, o Nusselt médio e perfis de velocidade e temperatura para uma região com escoamento plenamente desenvolvido.

Os três erros analisados para critérios de independência de malha neste trabalho são apresentados a seguir.

O erro relativo, em percentual é apresentado, na Equação 5.11 a seguir.

$$Erro\% = \left| \frac{x^{ref} - x^i}{x^{ref}} \right| * 100 \quad (5.11)$$

onde o sobrescrito "ref" designa a malha de referência, ou seja, a malha com 1,5 milhões de elementos, o sobrescrito "i" refere-se as malhas que estão sendo comparadas. Este parâmetro será utilizado apenas para calcular o erro da variação da queda de pressão estática.

O erro relativo médio, em percentual, é apresentado a seguir na Equação 5.12 .

$$\overline{Erro}\% = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{x_j^{ref} - x_j^i}{x_j^{ref}} \right| * 100 \quad (5.12)$$

onde o subscrito "j" corresponde aos pontos do domínio que estão sendo analisados compreendidos entre 1 e N.

De forma similar, o erro relativo máximo, em percentual, é apresentado na Equação 5.13 . Este critério retorna o valor da máxima diferença que ocorre dentre todos os pontos analisados.

$$Erro_{max} \% = \max_{j=1}^N \left| \frac{x_j^{ref} - x_j^i}{x_j^{ref}} \right| * 100 \quad (5.13)$$

O primeiro parâmetro para o teste de convergência de malha é a queda de pressão ao longo do canal de acordo com a Equação 5.3 . As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram a variação da queda de pressão para os quatro domínios computacionais e o erro relativo associado ao valor de referência, respectivamente.

Tabela 5.3: Variação de pressão ao longo do canal.

	1,5 Mi	1,23 Mi	830 mil	650 mil
$\Delta\bar{p}[Mpa]$	2,441	2,433	2,430	2,428

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

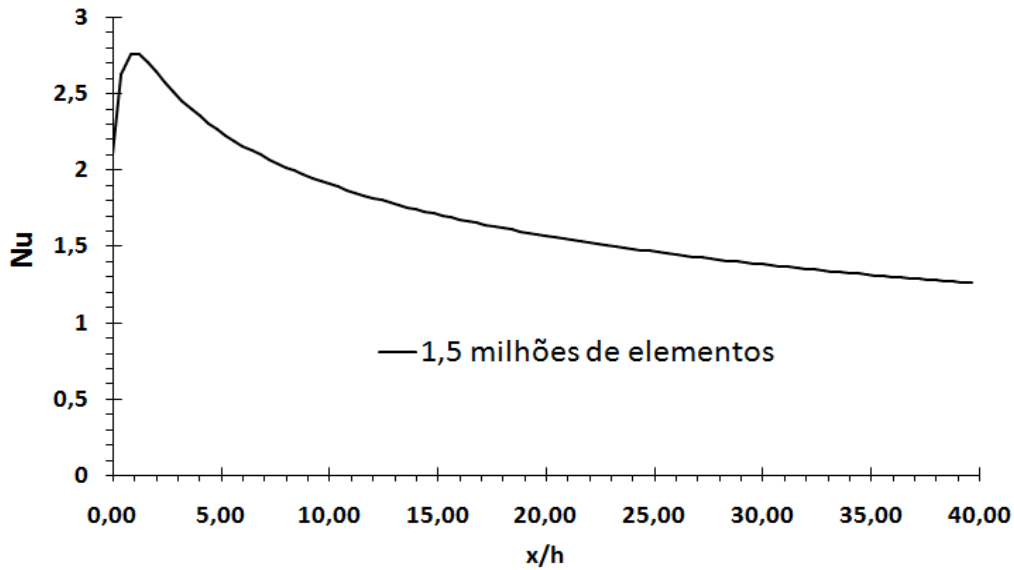
Tabela 5.4: Erro relativo percentual associado à queda de pressão.

	1,5 Mi	1,23 Mi	830 mil	650 mil
Erro %	Valor de Ref.	0,327	0,45	0,532

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

O segundo parâmetro para o teste de convergência de malha é a distribuição de Nusselt médio na seção transversal (ver Equação 5.9), mostrada na Figura 5.7, a seguir. Tomou-se como valor de referência a malha mais refinada.

Figura 5.7: Distribuição de Nusselt médio para o maior refino de malha.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

A Tabela 5.5 mostra o erro relativo médio e o erro máximo comparando os demais domínios computacionais com o valor de referência.

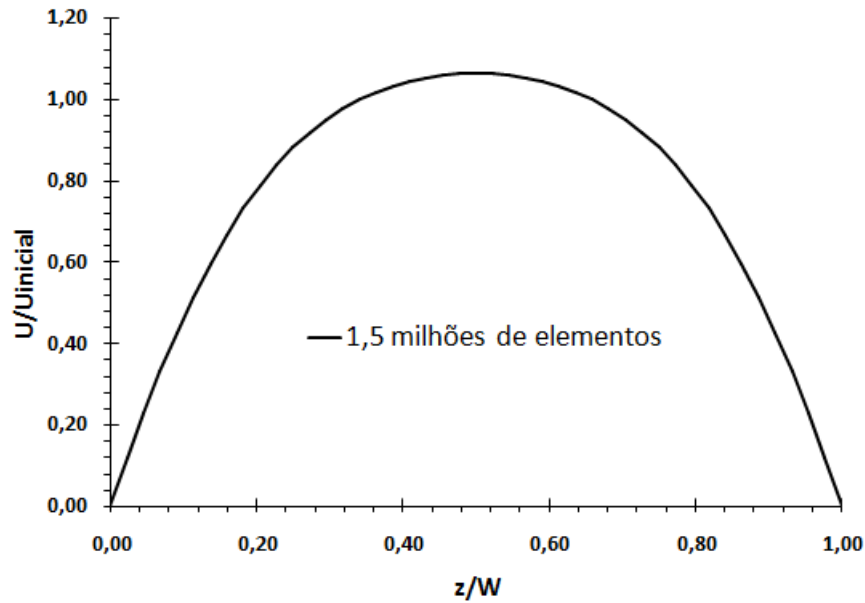
Tabela 5.5: Erro relativo médio e máximo percentual associado ao Nusselt médio.

	1,5 Mi	1,23 Mi	830 mil	650 mil
$\overline{Erro}\%$	<i>Valor de Ref.</i>	0,327	0,45	0,532
$Erro_{max}\%$	<i>Valor de Ref.</i>	1,46	3,31	6,2

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

O terceiro parâmetro para a análise de convergência de malha é o perfil de velocidade para uma região com escoamento plenamente desenvolvido. A Figura 5.8 mostra o perfil de velocidades para o domínio computacional com 1,5 milhões de elementos e a Tabela 5.6 mostra o erro relativo médio e máximo associado ao valor de referência.

Figura 5.8: Perfil de velocidade adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido ($y = H/2$ e $x = 40h$ – ver Figura 5.1).



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

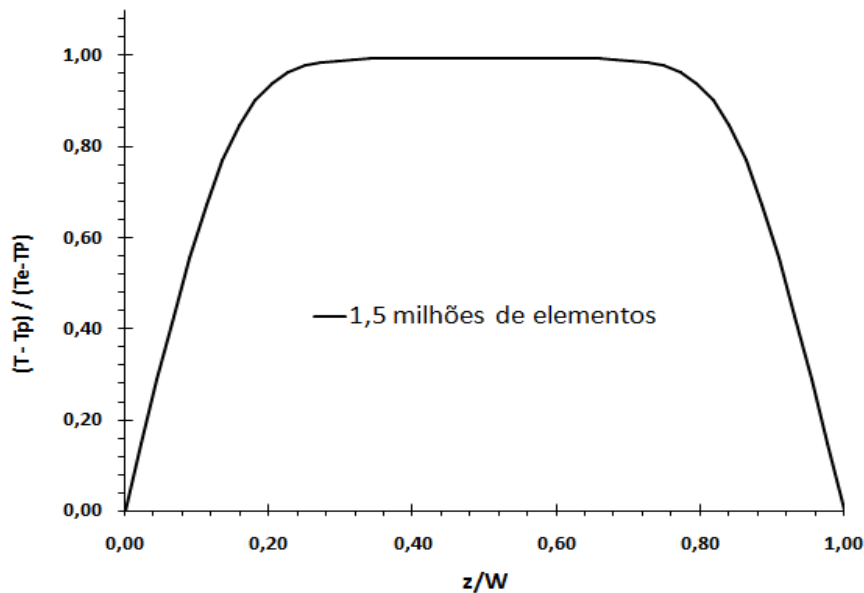
Tabela 5.6: Erro relativo médio e máximo percentual associado ao perfil de velocidade.

	1,5 Mi	1,23 Mi	830 mil	650 mil
$\overline{Erro}\%$	<i>Valor de Ref.</i>	0,168	0,293	0,39
$Erro_{max}\%$	<i>Valor de Ref.</i>	0,27	0,9	1,5

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

O último parâmetro para a análise de convergência de malha é o perfil de temperatura para uma região com escoamento plenamente desenvolvido. Tomou-se como referência a malha mais refinada. A Figura 5.9 mostra o perfil de temperatura para o domínio computacional com 1,5 milhões de elementos e a Tabela 5.7 mostra o erro relativo médio e máximo associado ao valor de referência.

Figura 5.9: Perfil de temperatura adimensional para uma região com escoamento plenamente desenvolvido ($y = H/2$ e $x = 40h$ – ver Figura 5.1).



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Tabela 5.7: Erro relativo médio e máximo percentual associado ao perfil de temperatura.

	1,5 Mi	1,23 Mi	830 mil	650 mil
$\overline{Erro}\%$	Valor de Ref.	0,040	0,115	0,157
$Erro_{max}\%$	Valor de Ref.	0,16	0,456	0,62

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Como conclusão para a análise de convergência de malha, apenas o domínio computacional com 650 mil elementos não apresentou resultados satisfatórios para regiões onde o escoamento é plenamente desenvolvido na geometria com razão de expansão igual a seis. Os domínios computacionais com 1,2 milhões de elementos e 830 mil elementos apresentaram bons resultados para regiões onde o escoamento é plenamente desenvolvido, com erros médios e máximos menores que 1%. Porém, para a região próxima a expansão súbita, onde os gradientes são maiores, os erros máximos se acentuam como é mostrado na Tabela 5.5. Por tal motivo optou-se por selecionar a malha com 1,23 milhões de elementos por apresentar diferença máxima de 1,46 % comparado com o valor de referência na distribuição de Nusselt para região do primeiro nó a jusante da expansão. Além disso, utilizando uma malha com 1,23 milhões de elementos para razões de aspecto menores ($AR = 2$ e 4), os erros máximos e médios tendem a diminuir devido a redução do domínio computacional para estas geometrias.

5.4 Análise da Topologia do Escoamento para Diferentes Tipos de Expansão

Nesta seção são analisadas e comparadas às topologias dos escoamentos para as três geometrias através das linhas de corrente, contornos de velocidade, temperatura, taxa de deformação equivalente e viscosidade para diversas posições nos planos em x , y e z . O objetivo principal desta seção é elucidar aspectos físicos relevantes sobre este tipo de escoamento. É importante destacar também que nesta dissertação o foco da análise são as seções do escoamento a jusante da expansão onde ocorrem os principais fenômenos nestas geometrias.

A primeira comparação da topologia para o escoamento é realizado no plano y - z para uma posição próxima a região de expansão, $x/S = 0.09$ (ver Figuras 5.1, 5.2 e 5.3). As comparações entre as linhas de corrente, contornos de velocidade na direção z , temperatura, taxa de deformação equivalente e viscosidade para esta região do escoamento foram realizadas para as três razões de aspectos simuladas ($AR = 2, 4$ e 6), porém, devido à similaridade dos resultados, serão mostradas apenas as ilustrações para uma razão de aspecto igual a quatro.

É interessante notar através das linhas de corrente as mudanças da trajetória do escoamento em função da variação do tipo de geometria (ver Figuras 5.10 (a), 5.11 (a) e 5.12(a)). Percebe-se que o maior vórtice ocorre para a geometria com expansão súbita, para o canal com geometria circular há uma pequena região de recirculação de fluido e para o canal tipo rampa o vórtice já não existe.

Diferente do trabalho de Louda et al. (2013), não é possível observar regiões de recirculação de fluido na região de expansão para o canal tipo rampa, o escoamento acompanha a inclinação das paredes do canal, sem recircular ou deslocar. Notavelmente, trata-se aqui de um escoamento de polímero fundido com elevada viscosidade e baixíssimo Reynolds, da ordem de 10^{-4} , diferente dos trabalhos disponíveis na literatura, que estudam escoamentos com Reynolds da ordem de 10^3 .

Para os contornos de velocidade no plano y - z (ver Figuras 5.10 (b), 5.11 (b) e 5.12 (b)) é possível notar a variação de velocidade na componente w dos escoamentos na região de expansão. Observa-se também que os contornos de velocidade em z são simétricos, o fluido se movimenta das regiões de paredes laterais ($z/S = \pm 2$) para a região central do canal ($z/S = 0$). Para os dois primeiros canais estudados, expansão súbita e expansão circular, conclui-se então que o escoamento desce pelas paredes laterais e vai para o centro do canal em um formato espiral.

No canal com geometria tipo rampa (ver Figura 5.12 (b)) a componente de velocidade na direção z se comporta de maneira semelhante aos demais casos estudados neste trabalho, mas devido à região de expansão ser mais suavizada não há um descolamento do fluido e o escoamento acompanha a inclinação das paredes, como já mencionado anteriormente.

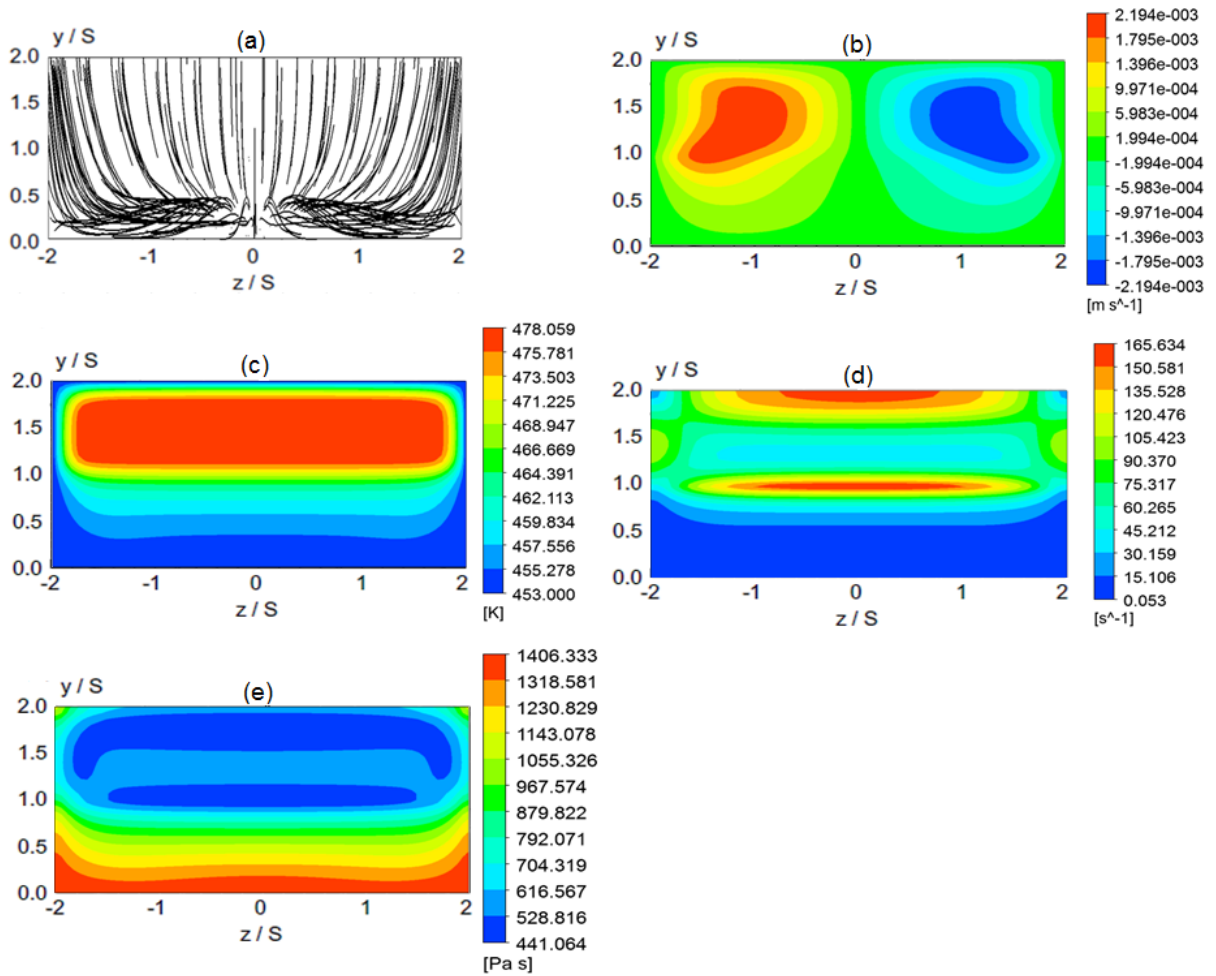
Para os contornos de temperaturas no plano y - z (ver Figuras 5.10 (c), 5.11 (c) e 5.12 (c)) nota-se a diferença das distribuições de temperaturas para as três geometrias nas regiões à jusante das expansões, para a posição $x/S = 0.09$. Enquanto que os contornos de temperatura para os canais com expansão súbita e circular (ver Figuras 5.10 (c), 5.11 (c)) estão ainda sob influência da região de recirculação de fluido, o canal com expansão tipo rampa (ver Figuras 5.12 (c)) apresenta um contorno de temperatura mais desenvolvido para a mesma posição. Em uma segunda análise, é possível notar a influência da temperatura das paredes no escoamento, a partir das posições $z/S > 1.25$, $z/S < -1.25$, $y/S < 0.5$ e $y/S > 1.75$ as temperaturas vão decrescendo em direção as paredes laterais, inferiores e superiores. Este efeito é mais visível para o canal com geometria tipo rampa (ver Figuras 5.12 (c)), porque nesta posição a distribuição de temperatura para o plano é praticamente simétrica devido à menor influência da expansão no escoamento (não ocorre formação de vórtice neste caso).

Para os contornos de taxa de deformação equivalente no plano y - z (ver Figuras 5.10 (d), 5.11 (d) e 5.12 (d)) nota-se a diferença das distribuições de taxa de deformação para as três geometrias nas regiões à jusante das expansões, para a posição $x/S = 0.09$. Enquanto que os maiores valores de taxa de deformação equivalente para o canal com expansão súbita estão localizados em duas regiões distintas (ver Figuras 5.10 (c)), uma região na altura do degrau ($y/S = 1.0$) e a outra localizada na parede superior ($y/S = 2.0$), os canais com expansão circular (Figura 5.11 (c)) e tipo rampa (Figura 5.12 (c)), apresentam os maiores valores de taxa de deformação equivalente apenas nas proximidades da parede superior. Percebe-se que os menores valores de taxa de deformação equivalente para as três geometrias estão localizadas próxima à parede inferior do canal ($y/S = 0.0$).

Para os contornos de viscosidade no plano y - z (ver Figuras 5.10 (e), 5.11 (e) e 5.12 (e)) é interessante perceber a dependência com a taxa de deformação equivalente e temperatura, esses dois parâmetros regem o modelo de viscosidade para a Lei de *Cross* modificado, conforme explicado anteriormente na seção 3.2.2. Onde se tem os maiores valores de taxa de deformação equivalente, têm-se os menores valores para a viscosidade e vice-versa. De forma similar ocorre para a temperatura, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. O decréscimo da viscosidade com o aumento da taxa de deformação é característica dos materiais pseudoplásticos (BRETAS; D'AVILA, 2005). Os maiores valores para viscosidade são encontrados nas paredes inferiores dos canais. Percebe-se também a influência das paredes laterais nos contornos de viscosidade para

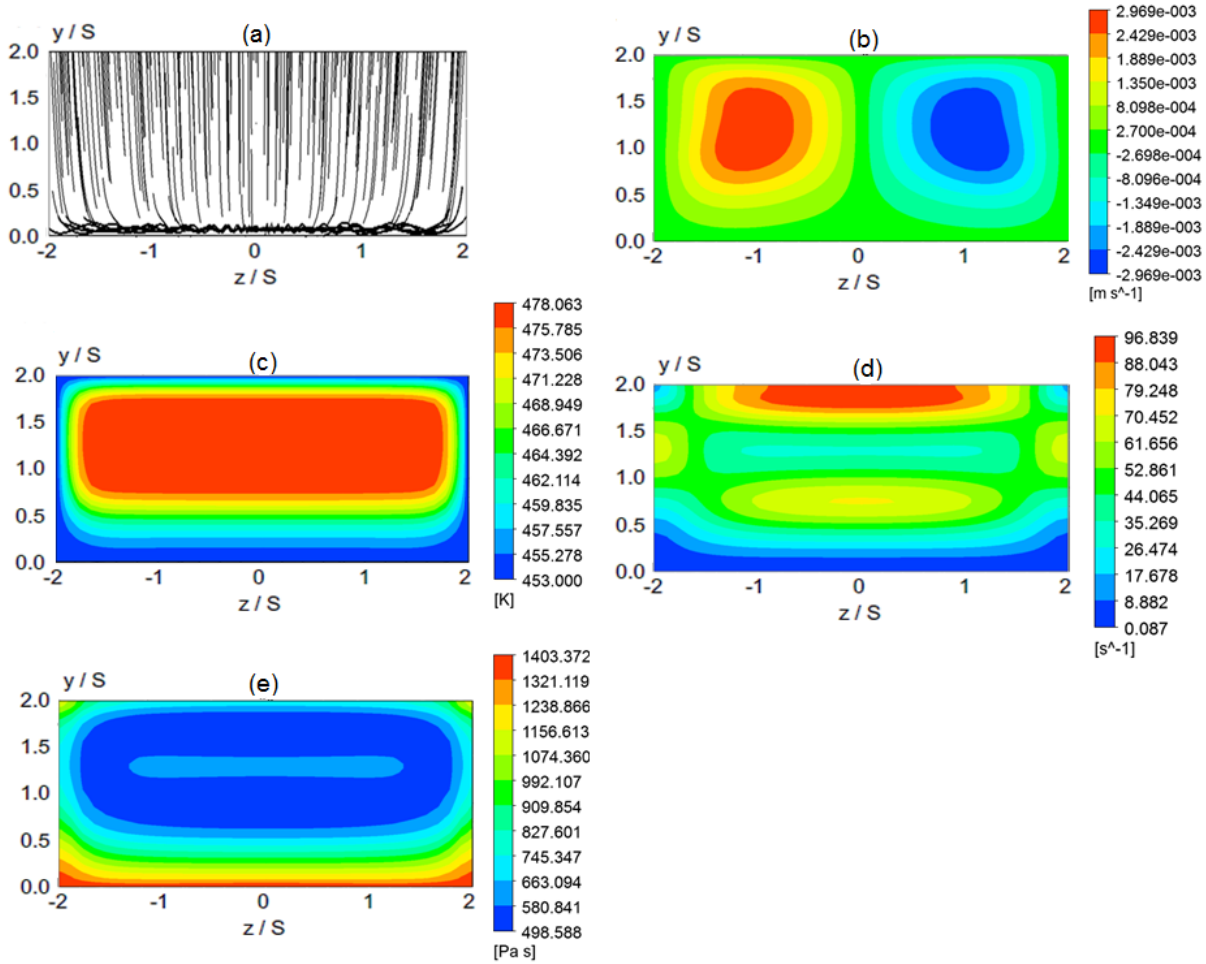
esta região ($x/S = 0,09$). A partir das posições $z/S > 1.5$ e $z/S < -1.5$ a viscosidade começa a aumentar devido a menor temperatura das paredes laterais, este efeito está mais visível nas Figuras 5.11 (e) e 5.12 (e) em razão da menor influência das expansões nas geometrias.

Figura 5.10: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em w (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano y - z para o canal com expansão súbita em $x/S = 0.09$.



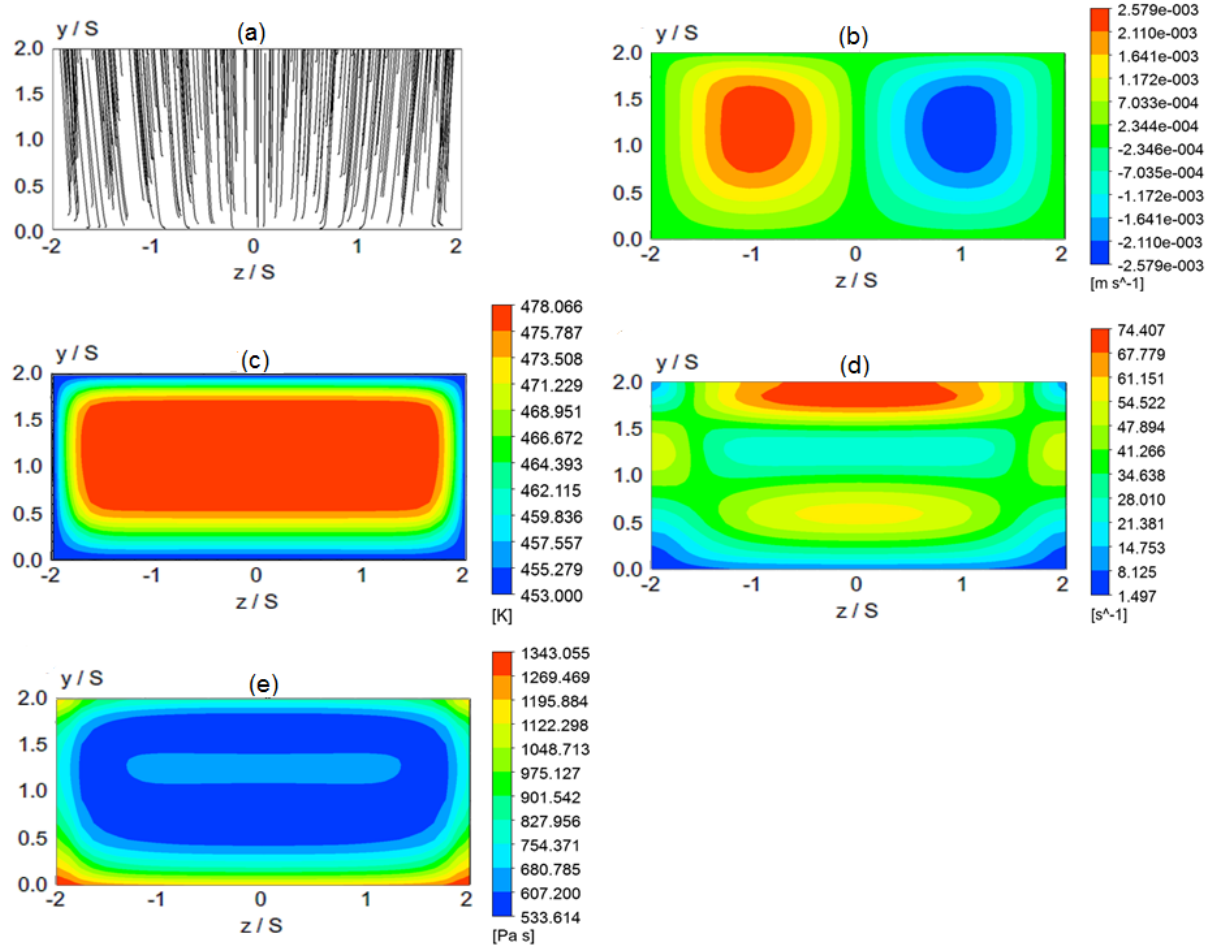
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.11: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em w (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano y - z para o canal com expansão circular em $x/S = 0.09$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.12: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em w (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano y - z para o canal com expansão tipo rampa em $x/S = 0.09$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

A segunda análise da topologia para o escoamento é realizado no plano x - y , no centro do canal ($z/S = 0.0$) à jusante da expansão e para as três geometrias. Nas figuras a seguir (Figuras 5.13, 5.14 e 5.15) são ilustradas as linhas de corrente (a), contornos de velocidade em x (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) para os canais com expansão súbita, circular e rampa, respectivamente.

Nas Figuras 5.13 (a) 5.14 (a) 5.15 (a) são apresentadas as linhas de corrente para as três geometrias. A topologia do escoamento para o canal com expansão súbita nesta região (ver Figura 5.13 (a)) é qualitativamente similar ao apresentado por escoamentos em canais com expansões súbitas bidimensionais. O vórtice tem como dimensões máximas as regiões próximas de $y/S = 0.277$ e $x/S = 0.23$. Para o vórtice do escoamento do canal com expansão circular (ver Figura 5.14 (b)) têm-se como dimensões máximas as regiões de $y/S = 0.085$ e $x/S = 0.08$. Nota-se que o tamanho do vórtice para o canal com expansão circular diminui drasticamente quando comparado com o tamanho do vórtice para o canal

com expansão abrupta. Já para o canal com geometria tipo rampa não há recirculação ou descolamento de fluido após a expansão e como mencionado anteriormente, o fluido segue fielmente a inclinação da geometria.

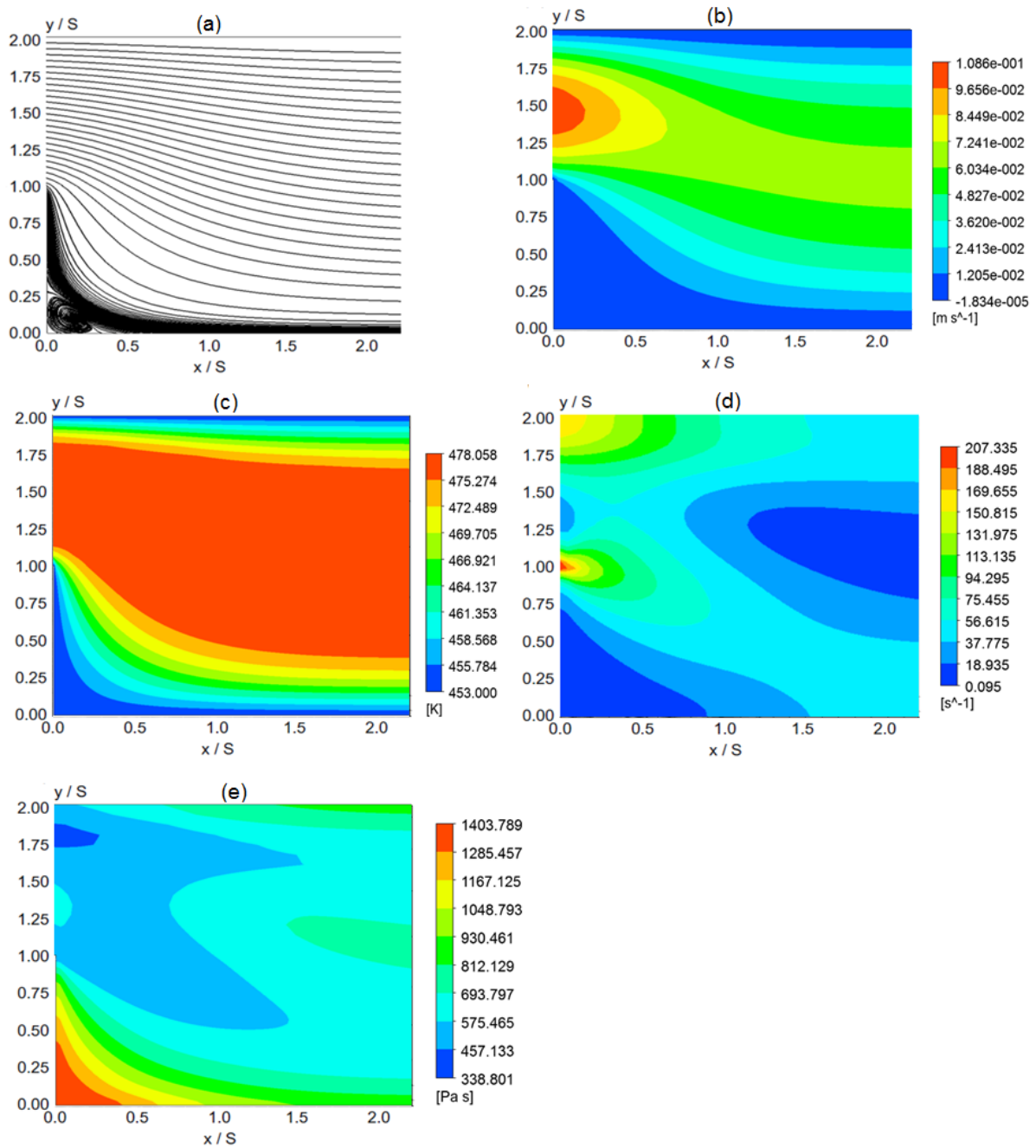
Pelas Figuras 5.13 (b), 5.14 (b) e 5.15 (b) é possível notar a variação de velocidade na componente u dos escoamentos na região de expansão. Tomando como valor de referência a velocidade máxima para o escoamento com expansão súbita cartesiana, há uma diminuição de 23,6% e 35,0% das velocidades máximas para os canais com expansão circular e rampa, respectivamente. Também é possível notar através das Figuras 5.13 (b), 5.14 (b) que há uma região com velocidades negativas próximo da expansão, indicando a existência de uma região de recirculação de fluido.

Pelas Figuras 5.13 (c), 5.14 (c) e 5.15 (c) apresentam-se os contornos de temperatura para o plano x-y, na região central do canal ($z/W = 0.0$), à jusante da expansão e para as três geometrias. É possível perceber a influência da expansão abrupta e das paredes no comportamento de temperatura do fluido. As três geometrias apresentam contornos de temperaturas semelhantes, para uma região entre $y/S > 0.5$ e $y/S < 1.75$ as temperaturas possuem valores máximos, para regiões acima de $y/S > 1.75$ e abaixo $y/S < 0.5$ as temperaturas das paredes já começam a influenciar na temperatura do escoamento. Percebe-se também pelas Figuras 5.13 (c), 5.14 (c) e 5.15 (c) que a maior diferença entre os contornos de temperaturas ocorrem na região próxima ao degrau devido ao efeito da região de expansão.

Para os contornos da taxa de deformação equivalente (ver Figuras 5.13 (d), 5.14 (d) e 5.15 (d)) é interessante perceber a influência da região de expansão ($y/S = 1.0$). Neste plano, para o canal com expansão súbita, os maiores valores de taxa de deformação são encontrados na região do degrau, devido ao maior efeito da expansão. Para os canais com expansões circular e tipo rampa os maiores valores de taxa de deformação estão localizados nas proximidades da parede superior ($y/S = 2.0$). Comparando as três geometrias, os menores valores de taxa de deformação são encontrados no canal com expansão tipo rampa, devido ao menor efeito da região de expansão.

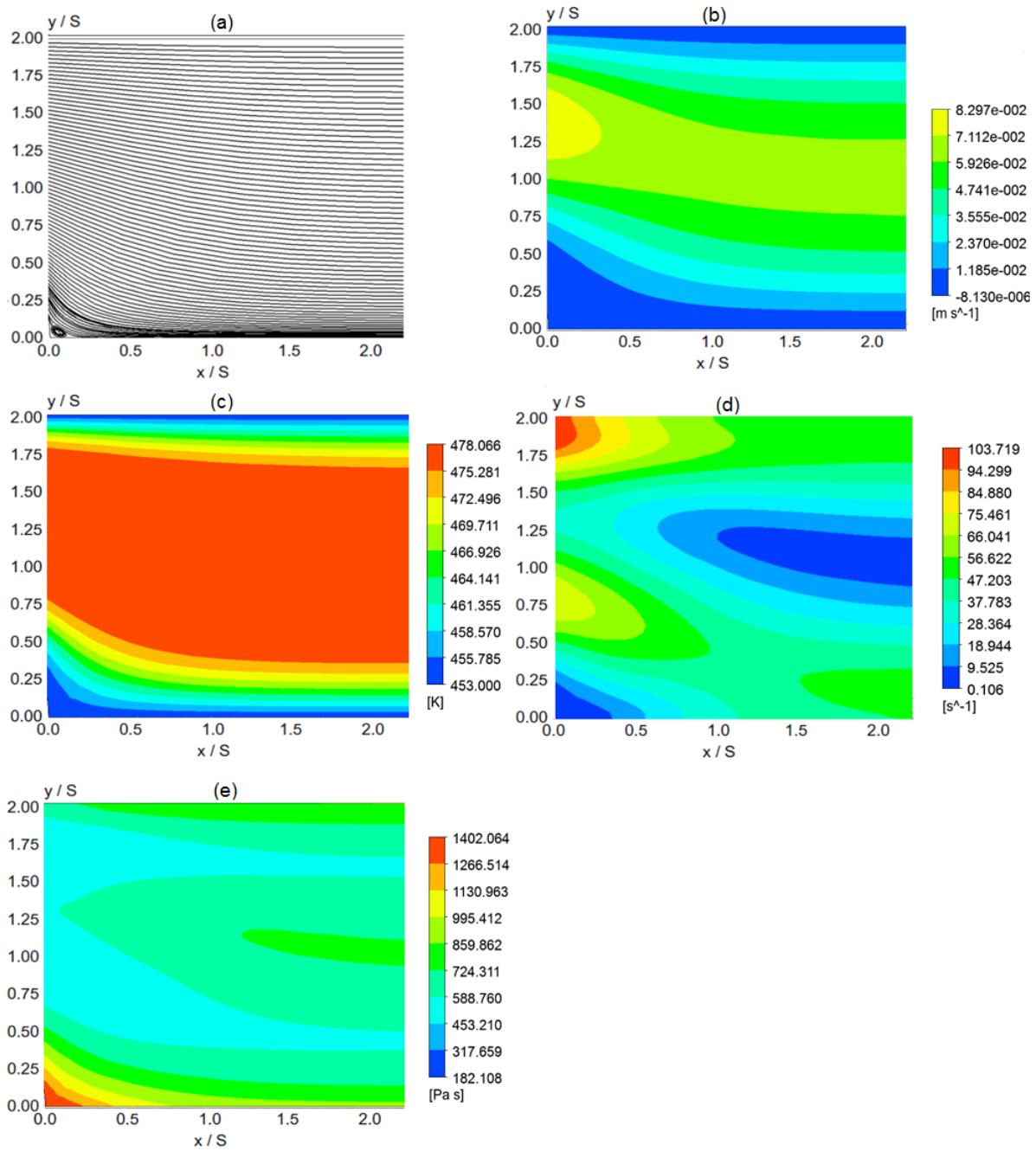
Para os contornos de viscosidade (ver Figuras 5.13 (e), 5.14 (e) e 5.15 (e)) é interessante perceber novamente a dependência com a taxa de deformação equivalente e temperatura. Os maiores valores para a viscosidade são encontrados próximos a parede inferior do canal, na região junto ao degrau ($x/S = y/S = 0.0$), justamente onde têm-se os menores valores para a taxa de deformação equivalente e temperatura. Para uma região central, entre $y/S > 0.5$ e $y/S < 1.75$, os valores de viscosidades para as três geometrias são similares. Nota-se também que as maiores diferenças entre os contornos de viscosidade para as três geometrias ocorrem próximos aos degraus devido ao efeito da região de expansão ($0.0 < x/S < 0.5$).

Figura 5.13: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano x-y para o canal com expansão súbita em $z/S = 0.0$.



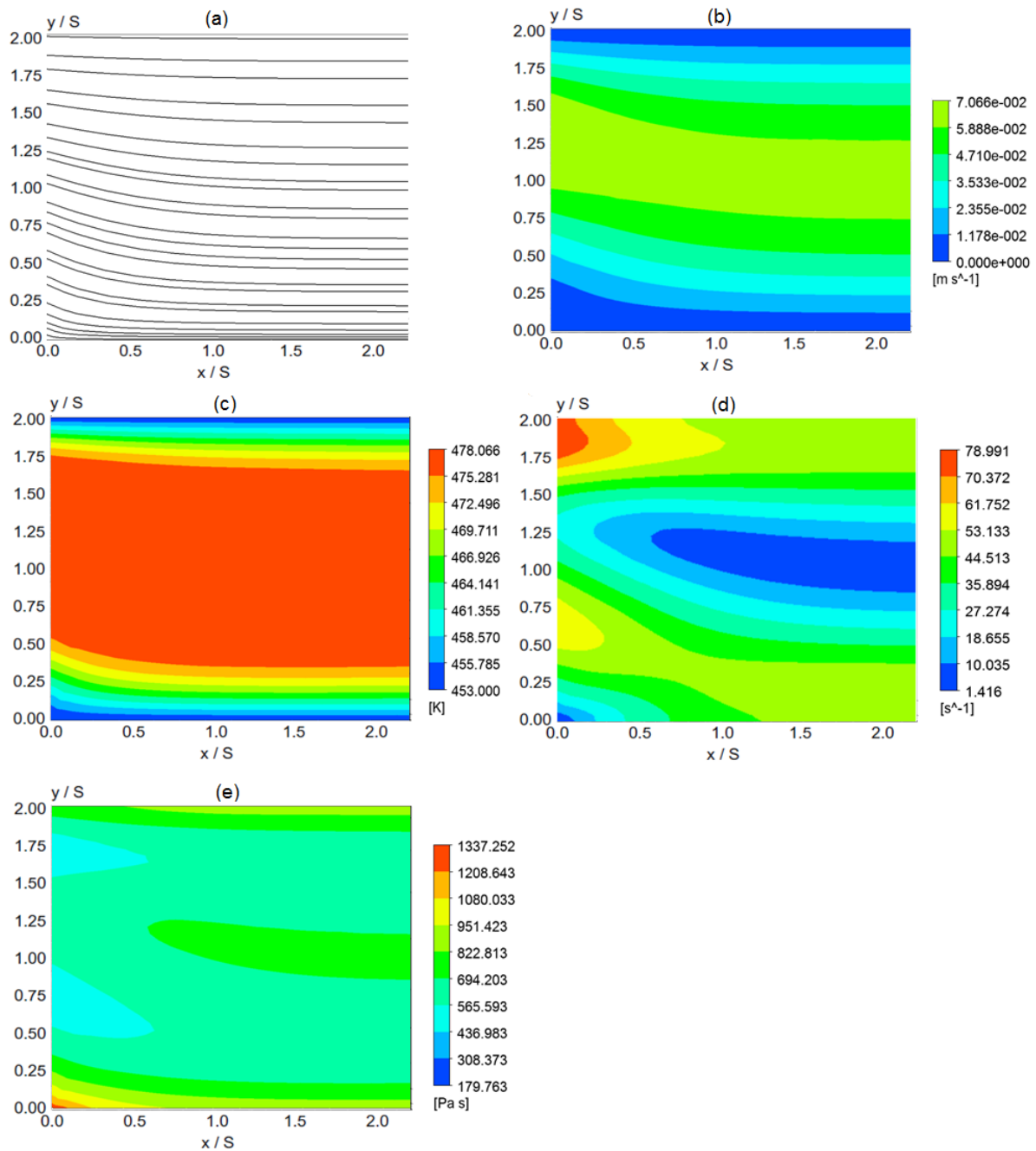
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.14: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano x-y para o canal com expansão circular em $z/S = 0.0$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.15: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c), taxa de deformação equivalente (d) e viscosidade (e) no plano x-y para o canal com expansão tipo rampa em $z/S = 0.0$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

A terceira análise topológica do escoamento é realizada no plano x-y, para uma região próxima as paredes laterais dos canais ($z/S = \pm 1.92$), à jusante da expansão e para as três geometrias. Nas figuras a seguir (Figuras 5.16, 5.17 e 5.18), são ilustradas apenas as linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) para os canais com expansão súbita cartesiana, circular e rampa, respectivamente.

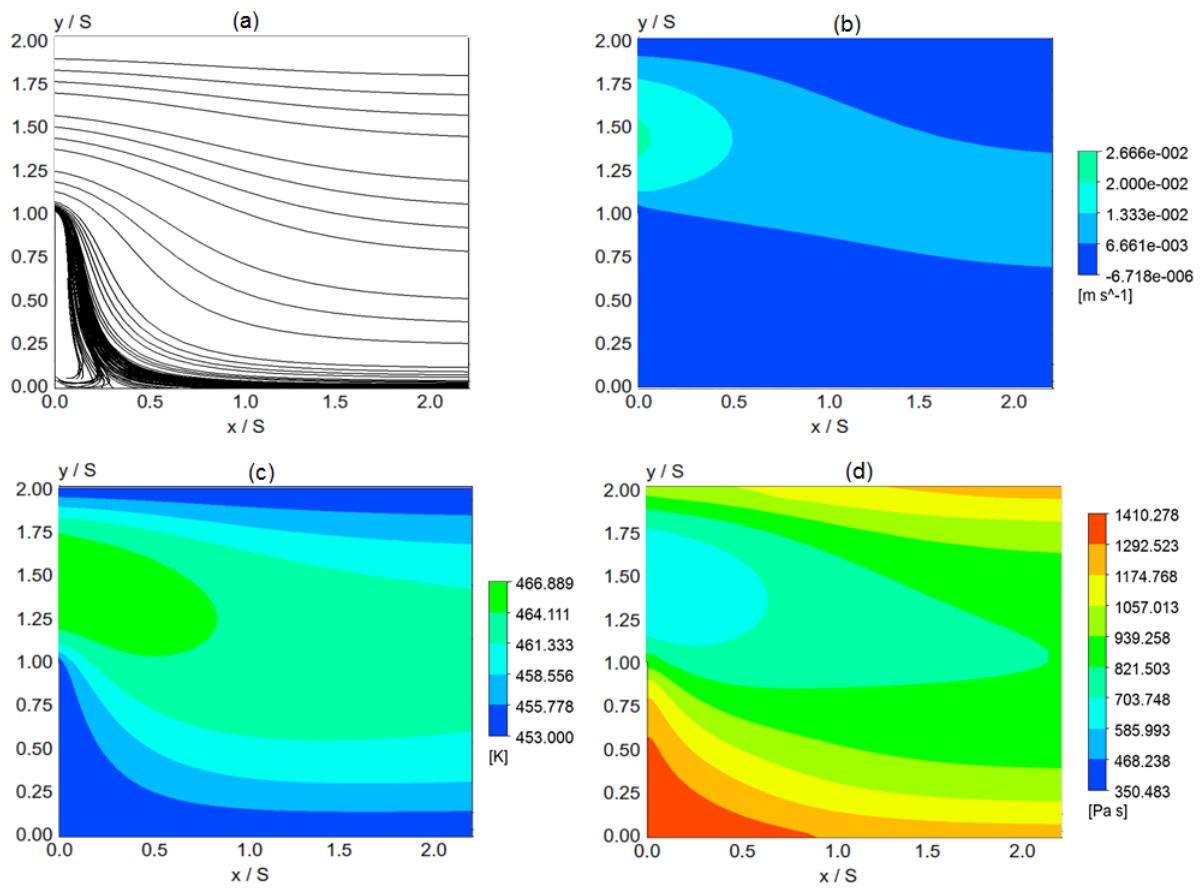
Para uma região mais próxima das paredes laterais ($z/S = \pm 1.92$), o efeito tridimensional é mais relevante devido ao atrito com as paredes e a elevada viscosidade do fluido. Nota-se que o padrão do escoamento para os canais com expansão súbita cartesiana e circular mudam drasticamente quando comparado as linhas de corrente com a região central do canal ($z/S = 0.0$). Nesta região próxima as paredes ($z/S = \pm 1.92$) ainda não existe um padrão de vórtice definido (ver Figuras 5.16 (a) e 5.17 (a)). Para o canal com expansão súbita tipo rampa as linhas de corrente próximas as paredes (ver Figura 5.18 (a)) pouco se alteram em relação ao centro do canal, não há indícios de vórtice e o escoamento segue fielmente a geometria do canal.

Pelas Figuras 5.16 (b), 5.17 (b) e 5.18 (b) é possível notar o decréscimo de velocidade na componente u dos escoamentos na região de expansão. Tomando como valores de referência, as velocidades máximas para os escoamentos nas regiões centrais dos canais ($z/S = 0.0$), há uma redução média de 76% para as velocidades máximas nas regiões próximas as paredes ($z/S = \pm 1.92$). Tal redução de velocidades deve-se ao atrito com as paredes e a elevada viscosidade do fluido.

Pelas Figuras 5.16 (c), 5.17 (c) e 5.18 (c) é possível verificar a influência da temperatura das paredes laterais no escoamento dos fluidos. Para esta região o efeito da temperatura das paredes é bem visível, como mencionado anteriormente, o perfil de temperatura torna-se decrescente a partir de $z/S = \pm 1.25$ (ver Figuras 5.10 (c), 5.11 (c) e 5.12 (c)). Em média, próximo as paredes laterais, há uma redução de 4% do valor de temperatura quando comparados com a região central do canal ($z/S = 0.0$).

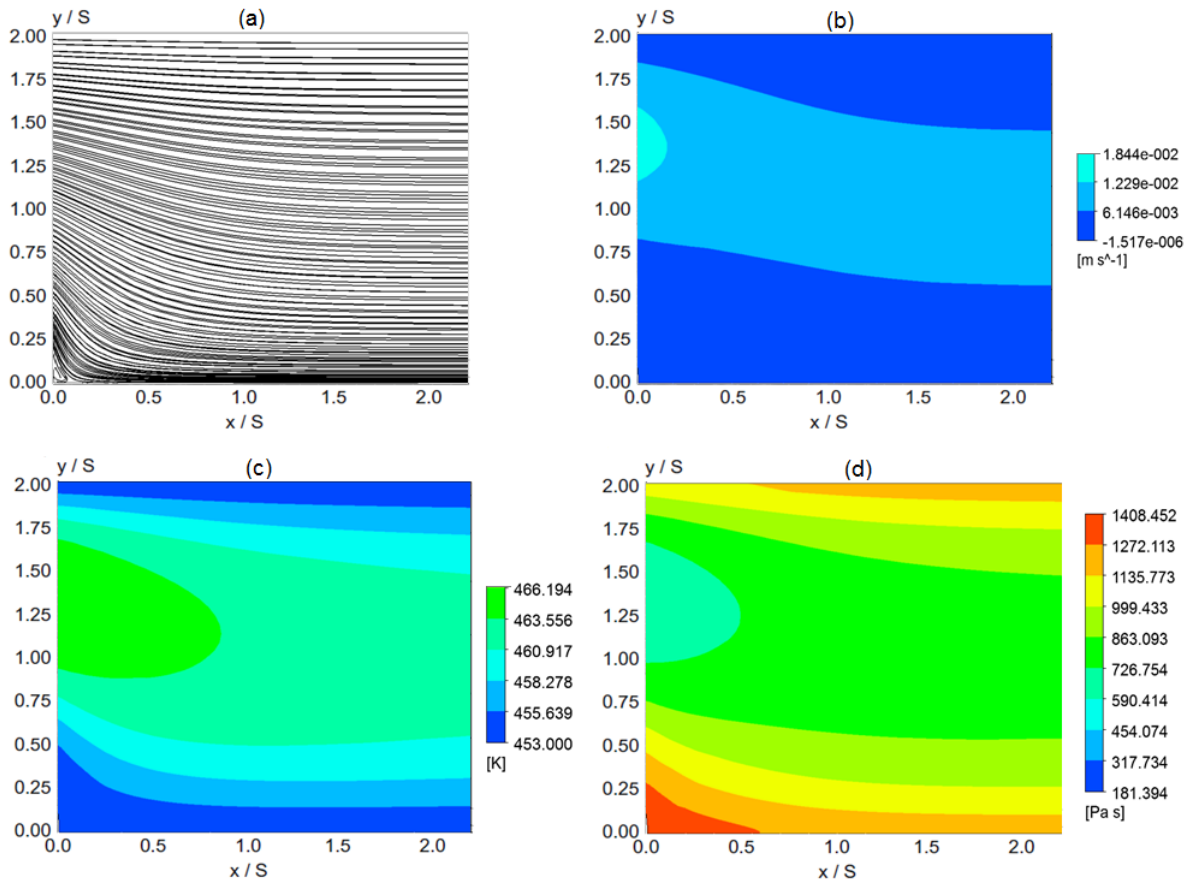
Nas Figuras 5.16 (d), 5.17 (d) e 5.18 (d) são apresentados os contornos de viscosidade para as geometrias. Os valores de viscosidades para as três geometrias são similares. Os maiores valores para viscosidade são encontrados próximos a parede inferior do canal, na região junto ao degrau ($x/S = y/S = 0.0$). Em média, próximo as paredes laterais ($z/S = 1.92$), há um aumento de 27% do valor da viscosidade devido aos menores gradientes de velocidade e baixas temperaturas quando comparados com a região central do canal ($z/S = 0.0$).

Figura 5.16: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-y para o canal com expansão súbita em $z/S = \pm 1,92$.



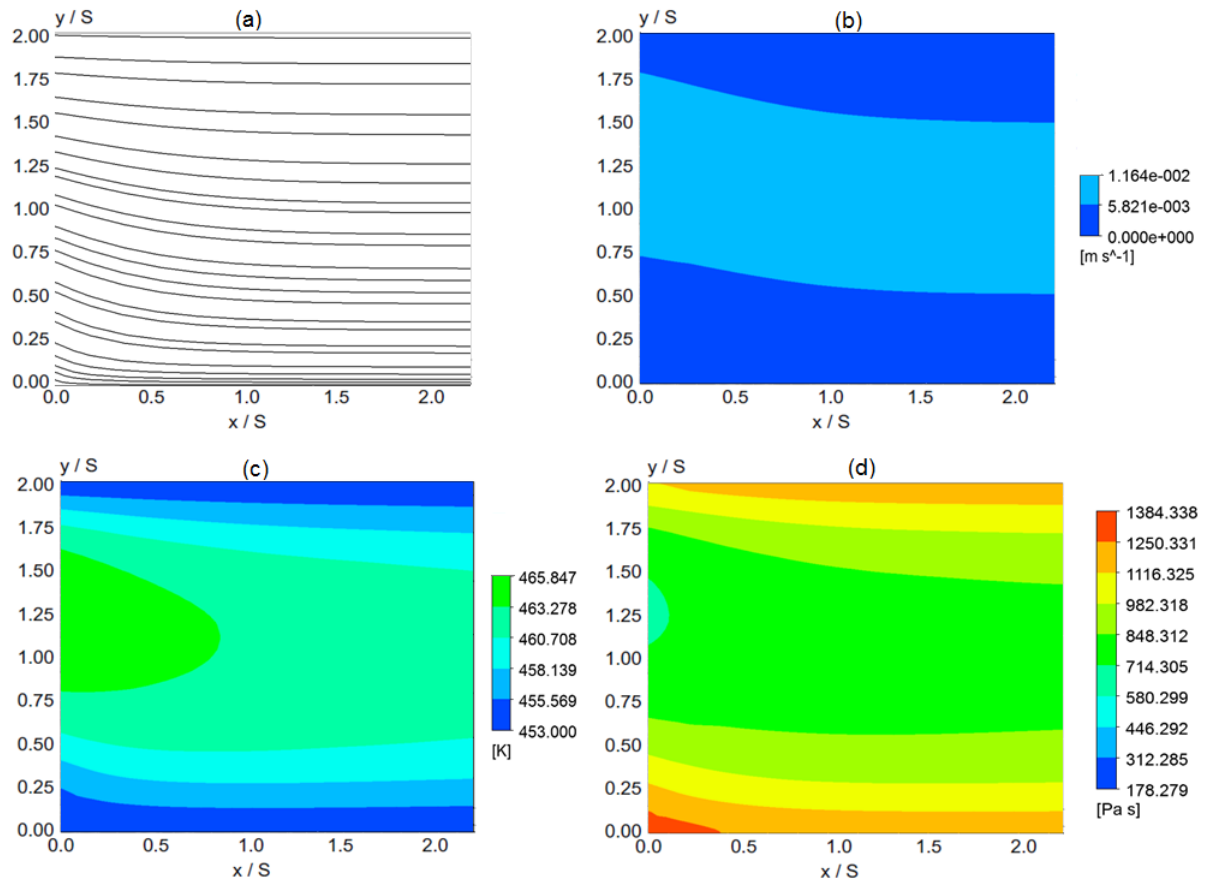
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.17: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-y para o canal com expansão circular em $z/S = \pm 1,92$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.18: Linhas de corrente (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-y para o canal com expansão tipo rampa em $z/S = \pm 1,92$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

A próxima análise topológica do escoamento é realizada no plano x-z, para uma região na altura do degrau ($y/S = 1.00$) à jusante da expansão e para as três geometrias. Nas figuras a seguir (Figuras 5.19, 5.20 e 5.21) são ilustrados os contornos de velocidade em z (a), contornos de velocidade em x (b), temperatura (c) e viscosidade (d) para os canais com expansão súbita cartesiana, circular e rampa, respectivamente.

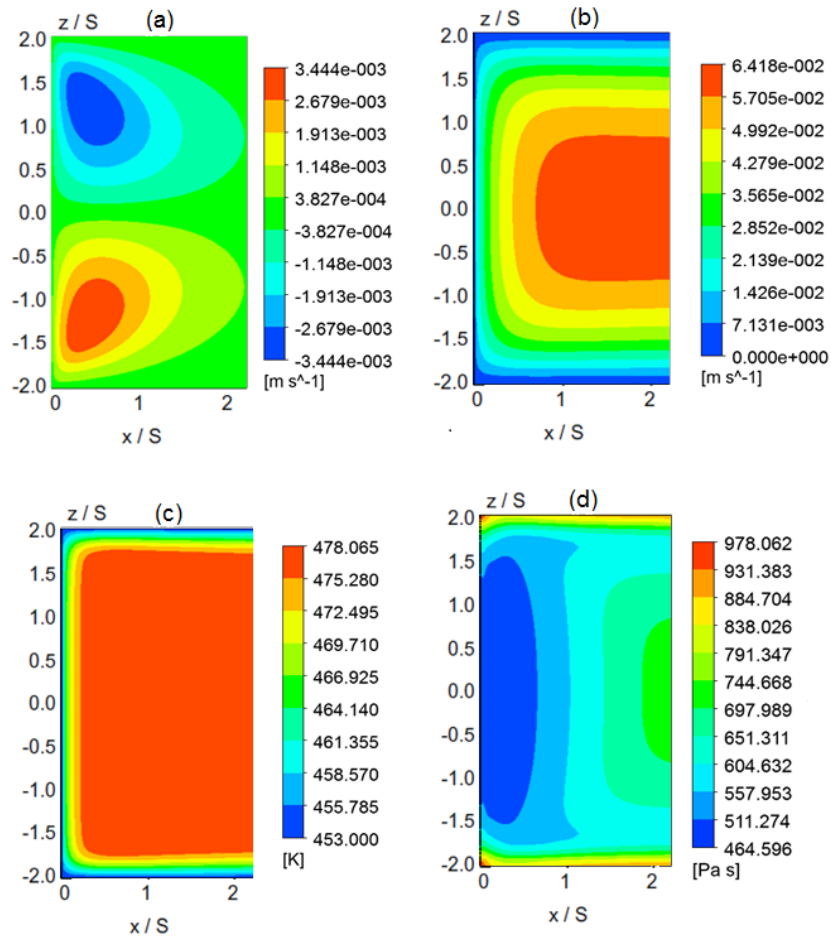
Para os contornos de velocidades em z no plano x-z (ver Figuras 5.19 (a), 5.20 (a) e 5.21 (a)) é possível notar a variação de velocidade na componente w dos escoamentos nas regiões de expansão. Tomando como valor de referência a velocidade máxima para o escoamento com expansão súbita, há uma redução de 13,6 % e 16,17 % das velocidades máximas para os canais com expansão circular e rampa, respectivamente. Novamente observa-se que os contornos de velocidade em w são simétricos, o campo de escoamento se movimenta das regiões de paredes laterais ($z/S = \pm 2$) para a região central do canal ($z/S = 0$).

Pelas Figuras 5.19 (b), 5.20 (b) e 5.21 (b) é possível notar a variação de velocidade na componente u dos escoamentos na região de expansão. Nesta região, as velocidades máximas na componente u para as três geometrias são semelhantes e estão localizadas na região de $-0.6 < z/W < 0.6$. Após estas regiões as velocidades em u começam a decrescer suavemente até a região de parede. Nota-se ainda pelas Figuras 5.19 (b), 5.20 (b) e 5.21 (b) que a maior diferença entre os contornos de velocidade na direção x ocorrem na região próxima ao degrau devido ao efeito da região de expansão.

Nas Figuras 5.19 (c), 5.20 (c) e 5.21 (c) são apresentados os contornos de temperatura no plano x - z , para uma região na altura do degrau ($y/S = 1.00$), à jusante da expansão e para as três geometrias. É possível perceber a influência da expansão abrupta e das paredes no comportamento de temperatura do fluido. Nota-se que para regiões maiores que $z/S > 1.5$ e menores que $z/S < -1.5$, a temperatura do fluido começa a diminuir devido à influência das temperaturas das paredes laterais. Percebe-se ainda pelas Figuras 5.19 (c), 5.20 (c) e 5.21 (c) que a maior diferença entre os contornos de temperaturas na direção x ocorrem na região próxima ao degrau devido ao efeito da região de expansão.

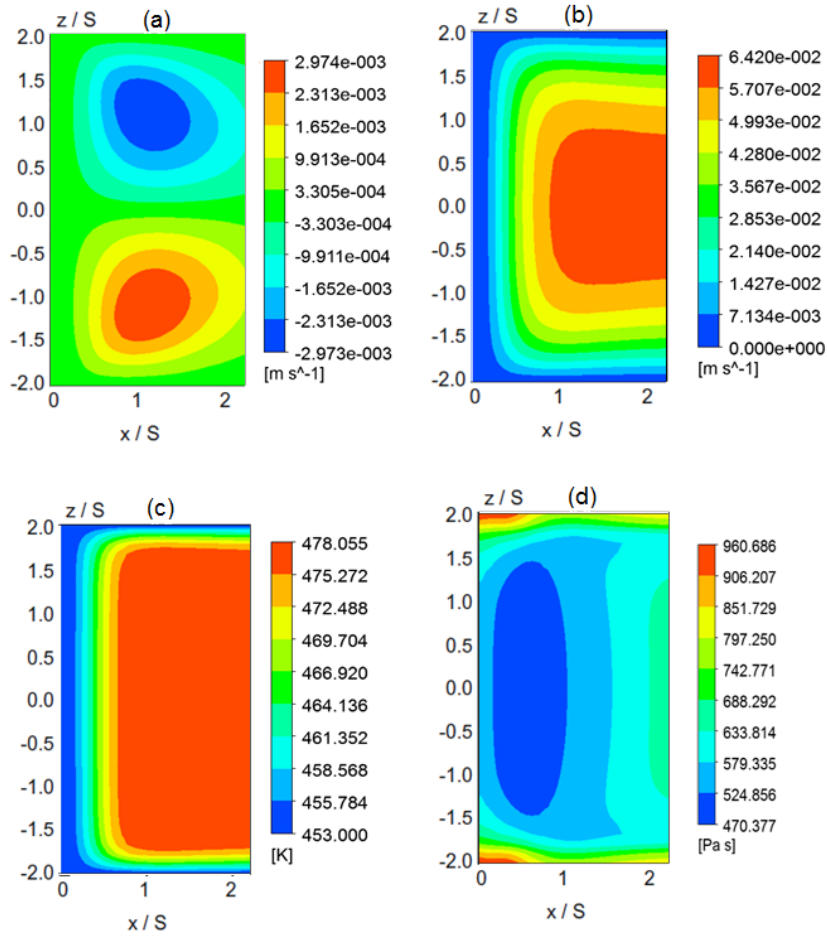
Nas Figuras 5.19 (d), 5.20 (d) e 5.21 (d) são apresentados os contornos de viscosidade para as geometrias na região $y/S = 1.00$. Os valores dos contornos de viscosidade para os canais com expansões súbita e circular são similares nesta região (ver Figuras 5.19 (d) e 5.20 (d)). Para o canal com expansão tipo rampa, devido à menor influência da expansão nesta região, o contorno de viscosidade na direção x , próxima a parede ($x/S = 0.0$), possui uma área com valores mais homogêneos de viscosidade quando comparado com os demais canais. Para regiões maiores que $z/S > 1.75$ e menores que $z/S < -1.75$, a viscosidade começa a aumentar devido à influência das paredes laterais.

Figura 5.19: Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão súbita em $y/S = 1.00$.



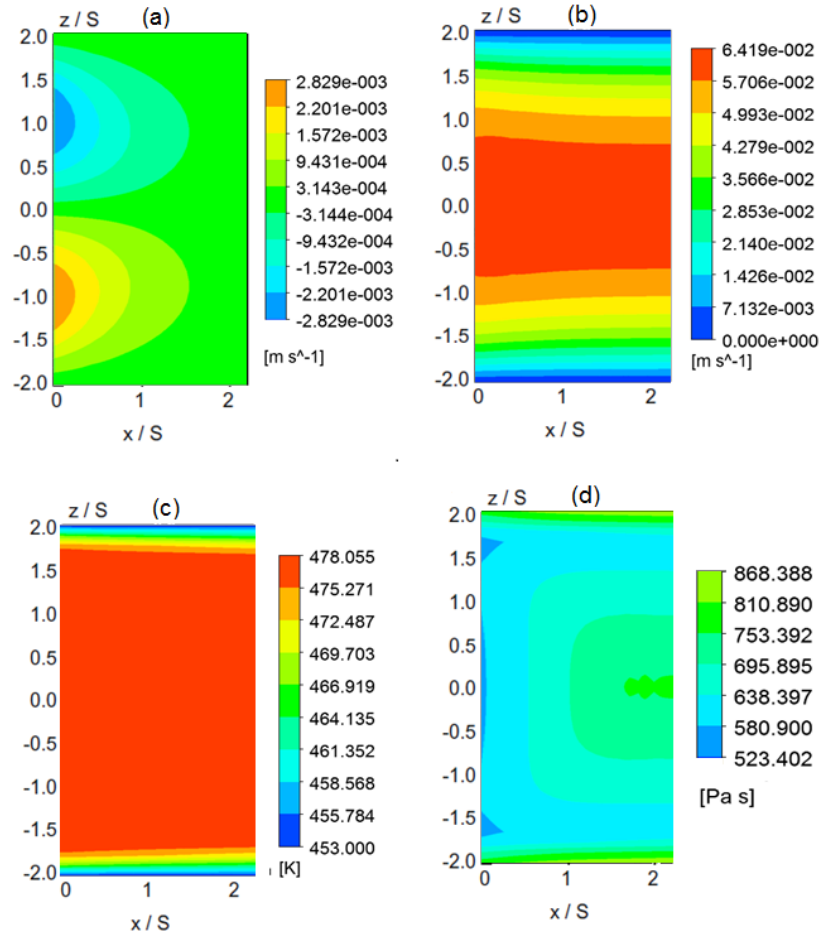
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.20: Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão circular em $y/S = 1.00$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.21: Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão tipo rampa em $y/S = 1.00$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

A última análise topológica do escoamento é realizada no plano x-z, para uma região próxima a parede inferior ($y/S = 0.09$) à jusante da expansão e para as três geometrias. Nas figuras a seguir (Figuras 5.22, 5.23 e 5.24), são ilustradas contornos de velocidade em z (a), contornos de velocidade em x (b), temperatura (c) e viscosidade (d) para os canais com expansão súbita cartesiana, circular e rampa, respectivamente.

Para os contornos de velocidades w no plano x-z (Ver Figuras 5.22 (a), 5.23 (a) e 5.24 (a)) é possível notar a variação de velocidade na componente w dos escoamentos nas regiões de expansão. Tomando como valor de referência a velocidade máxima para o escoamento com expansão súbita, há uma redução de 14,86 % e 35,33 % das velocidades máximas para os canais com expansão circular e tipo rampa, respectivamente. Nota-se também que as velocidades para esta região são menores quando comparadas com a região do central do canal ($y/S = 1.0$), analisadas anteriormente (Figuras 5.19 (a), 5.20 (a) e 5.21 (a)). Novamente observa-se que os contornos de velocidade em w são simétricos, o

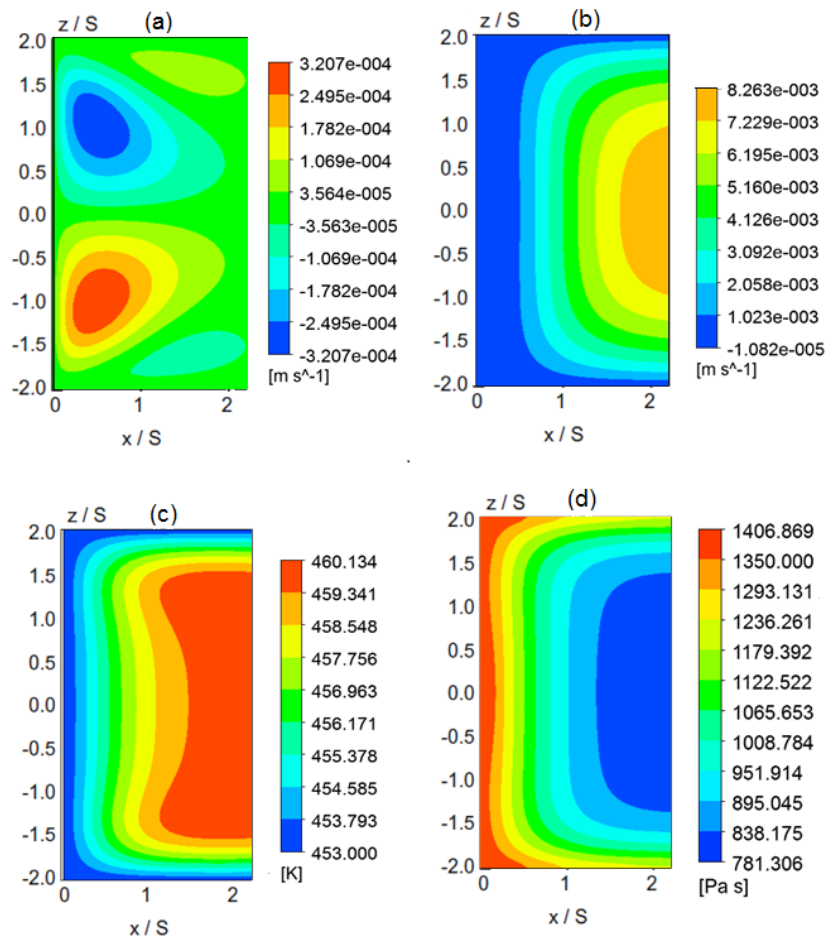
campo de velocidade se movimenta das regiões de paredes laterais ($z/S = \pm 2.0$) para a região central do canal ($z/S = 0$).

Pelas Figuras 5.22 (b), 5.23 (b) e 5.24 (b) é possível notar a variação de velocidade na componente u dos escoamentos na região de expansão. Nesta região, distintamente do que foi apresentado anteriormente, a maior velocidade na componente u encontra-se na geometria tipo rampa. Esta característica ocorre devido ao fato desta seção estar localizada nas proximidades da parede inferior, região onde ocorre a formação da zona de recirculação para as geometrias com expansão súbita e circular (região de baixa velocidade). Tomando como valor de referência, a velocidade máxima para o escoamento com expansão tipo rampa, há uma diminuição de 12,2% e 13,10% das velocidades máximas para os canais com expansão circular e súbita, respectivamente. Também é possível notar através das Figuras 5.22 (b) e 5.23 (b), referente aos canais com expansão súbita e circular que há uma região com velocidades negativas próximo da expansão, indicando a existência de uma região de recirculação de fluido.

Nas Figuras 5.22 (c), 5.23 (c) e 5.24 (c) são apresentados os contornos de temperatura para o plano x-z à jusante da expansão e para as três geometrias. É possível perceber a influência da expansão abrupta e das paredes no comportamento da temperatura do fluido. Nota-se que para regiões maiores que $z/S > 1.25$ e menores que $z/S < -1.25$, a temperatura do fluido começa a diminuir devido à influência das temperaturas das paredes laterais. Percebe-se ainda pelas Figuras 5.22 (c), 5.23 (c) e 5.24 (c) que a maior diferença entre os contornos de temperaturas na direção x ocorrem na região próxima ao degrau devido ao efeito da região de expansão e recirculação de fluido.

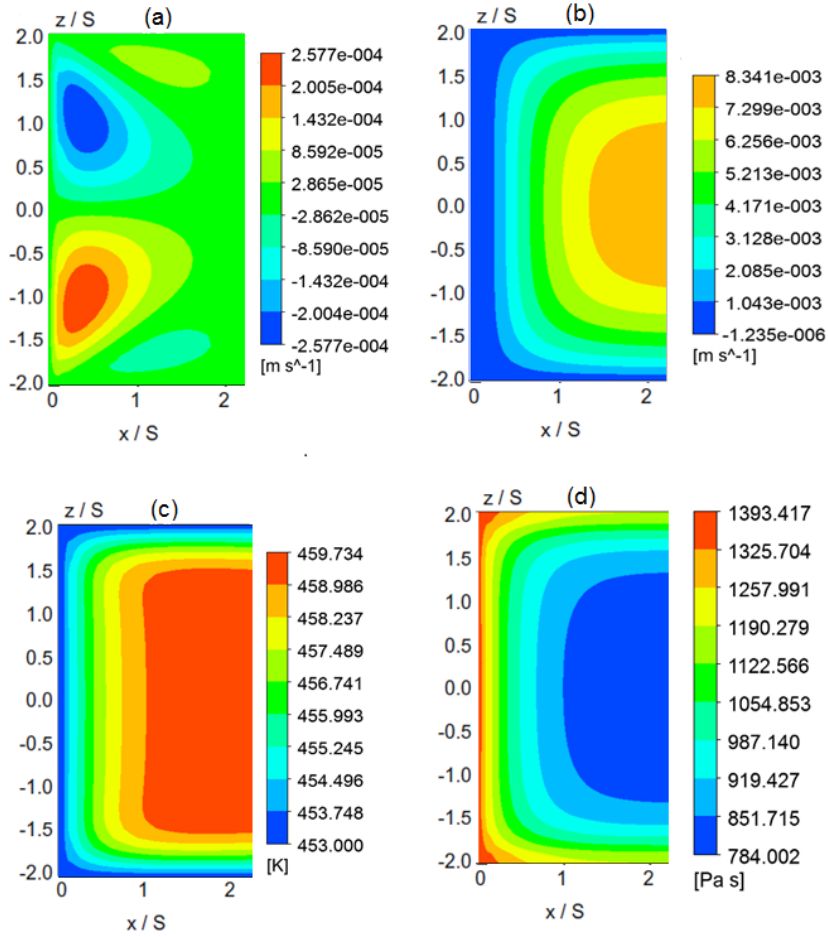
Nas Figuras 5.22 (d), 5.23 (d) e 5.24 (d) são apresentados os contornos de viscosidade para geometrias. Os valores de viscosidades para as três geometrias são similares e novamente é possível perceber a influência da temperatura e do gradiente de velocidade nos contornos de viscosidade. Os maiores valores para viscosidade são encontrados próximos a parede inferior do canal, na região junto ao degrau ($x/S = 0.0$). Nota-se que para regiões maiores que $z/S > 1.25$ e menores que $z/S < -1.25$, a viscosidade começa a aumentar devido à influência das menores temperaturas nas paredes laterais. Para o escoamento na direção x, os contornos de viscosidade para as três geometrias são decrescentes até uma região próxima de $x/S = 1.0$.

Figura 5.22: Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão súbita em $y/S = 0.09$.



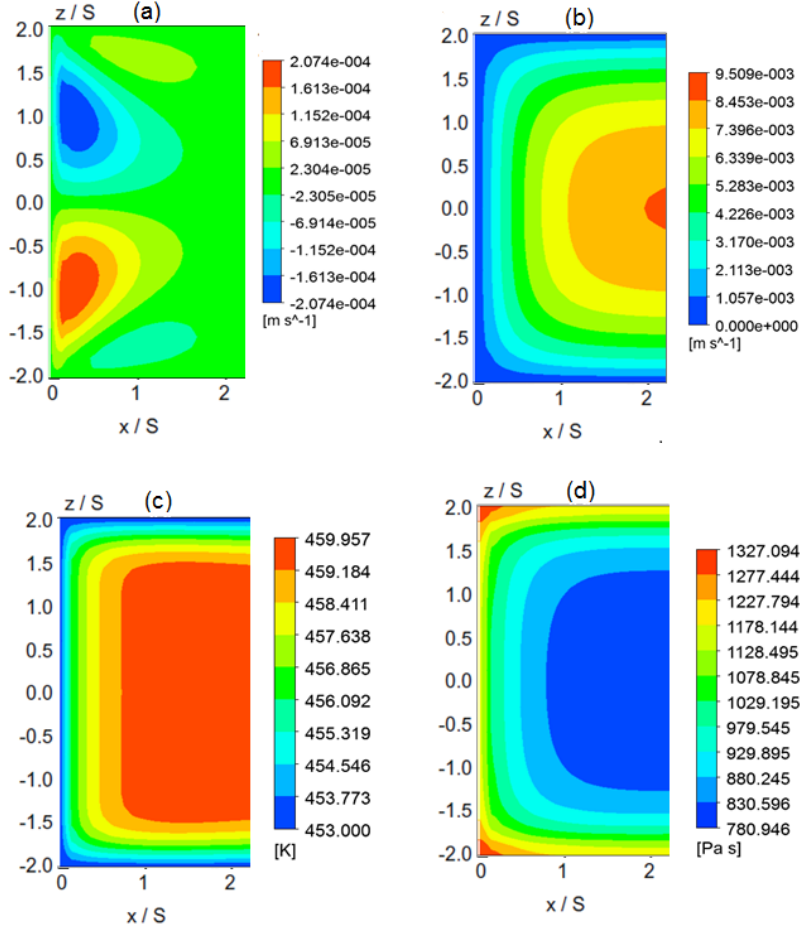
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.23: Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x - z para o canal com expansão circular em $y/S = 0.09$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.24: Contornos de velocidade em w (a), contornos de velocidade em u (b), temperatura (c) e viscosidade (d) no plano x-z para o canal com expansão tipo rampa em $y/S = 0.09$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Finalizando as discussões sobre as topologias do escoamento (em diferentes planos 2D) para diferentes expansões, pode-se construir as topologias tridimensionais destes escoamentos. Claramente percebe-se que nos canais com expansões súbita e circular ocorre a formação de uma região de recirculação com movimento em espiral (o fluido recircula na direção negativa do eixo x ao mesmo tempo em que é empurrado das paredes laterais para o centro do duto (na direção z). É importante destacar que este padrão de escoamento também foi obtido e discutido nos resultados apresentados em Zdanski e Vaz Jr. (2009b). De forma distinta, para a geometria com expansão tipo rampa não é detectado a formação de regiões de recirculação sendo que o escoamento percorre toda a extensão do canal sem mudanças súbitas de direção.

5.5 Análise dos Efeitos da Razão de Aspecto (AR) nas Zonas de Recirculação

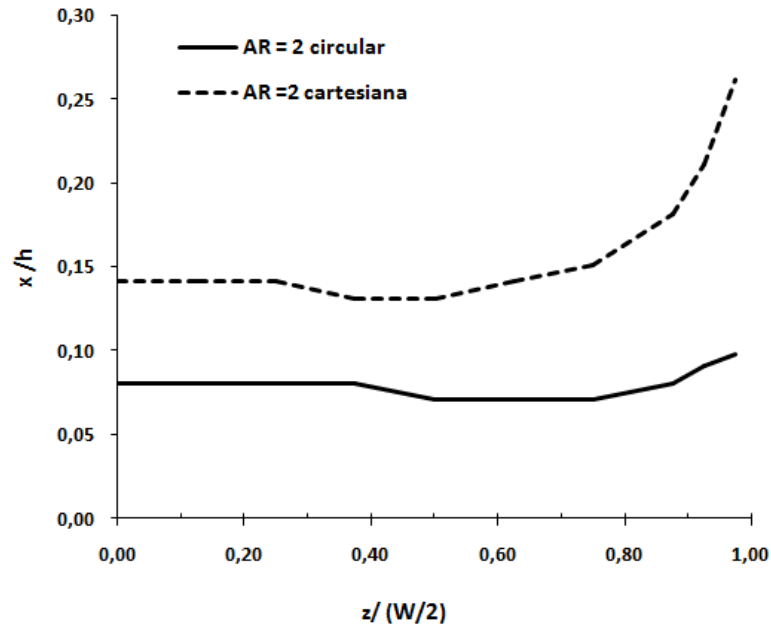
Conforme foi discutido na seção anterior, as topologias do escoamento (através das linhas de corrente) nos diferentes tipos de expansão são similares para as três razões de aspecto estudadas neste trabalho ($AR = 2, 4$ e 6). Entretanto, constatou-se que nos casos em que ocorre a formação de regiões de recirculação, os tamanhos dos vórtices são sensíveis a variação do parâmetro AR . Desta forma, de maneira semelhante realizada no capítulo anterior, a linha x_u (ver definição na Figura 4.7) é utilizada para realizar um estudo comparativo entre os tamanhos de vórtices nas geometrias com expansões súbitas e circulares para todas as razões de aspecto ($AR = 2, 4$ e 6).

A linha x_u refere-se ao campo de velocidade apenas na direção da componente u , mensurada próxima a parede inferior do canal, na região do segundo nó do domínio computacional. A linha x_u tem como objetivo medir o tamanho do vórtice formado pelo escoamento após a região de expansão do canal através da verificação de mudança de sinal do campo de velocidade (SALDANA et al., 2005). Além de expressar o tamanho do vórtice na direção x , como o escoamento é tridimensional, este parâmetro indica o tamanho do vórtice ao longo da envergadura do canal (direção z), o que caracteriza toda a região de recirculação formada a jusante da expansão.

Na Figura 5.25 é apresentada a comparação entre os tamanhos de vórtices para as geometrias com razão de aspecto igual a dois. Nota-se que o canal com expansão súbita apresenta um comprimento de vórtice maior que a geometria com expansão circular. Para a região central do canal ($z/(W/2) = 0.0$), o comprimento de vórtice para o canal com expansão súbita é de $x/S = 0.14$, já para o canal circular esse comprimento é igual a $x/S = 0.075$.

Percebe-se que para o canal com expansão súbita a partir da região de $z/(W/2) = 0.6$ o comprimento de vórtice começa a crescer de forma acentuada. Para o canal com expansão circular esse crescimento de vórtice na aproximação da região de parede lateral ocorre de forma mais suave e tem início apenas na região $z/(W/2) = 0.75$.

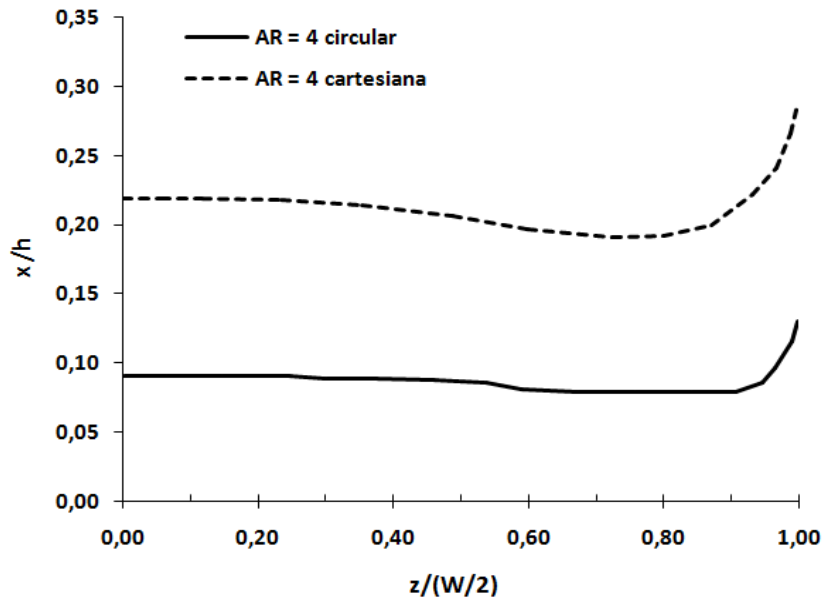
Figura 5.25: Tamanho de vórtice para geometrias com razão de aspecto igual a dois.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Na Figura 5.26 é apresentada a comparação entre o tamanho de vórtice para as geometrias com razão de aspecto igual a quatro. Como mencionado anteriormente na comparação das Figuras 5.13 (a) e 5.14 (a), que mostram as linhas de corrente para a posição central do canal, nota-se que o canal com expansão súbita apresenta um comprimento de vórtice maior que a geometria com expansão circular. Para a região central do canal ($z/(W/2) = 0,0$) o comprimento de vórtice para expansão súbita é de $x/S = 0,23$, já para o canal com seção de expansão circular esse comprimento é igual a $x/S = 0,08$.

Figura 5.26: Tamanho de vórtice para geometrias com razão de aspecto igual a quatro.

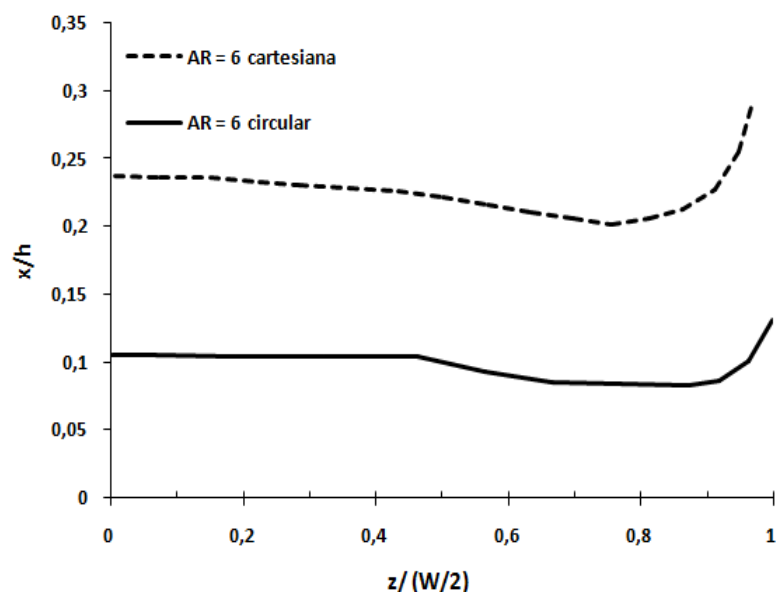


Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Na Figura 5.27 é apresentada a comparação entre o tamanho de vórtice para as geometrias com razão de aspecto igual a seis. Nota-se novamente que o canal com expansão súbita apresenta um comprimento de vórtice maior que a geometria com expansão circular. Para a região central do canal ($z/(W/2) = 0,0$), o comprimento de vórtice para o canal com expansão súbita é de $x/S = 0,24$, já para o canal circular esse comprimento é igual a $x/S = 0,11$.

Como conclusão desta análise, destaca-se que os resultados obtidos para o tamanho do vórtice são coerentes fisicamente, visto que a seção de expansão circular apresenta uma variação de área mais suave (é mais aerodinâmica) do que a expansão súbita (na forma de quina). Desta forma, era esperado que o tamanho da região de recirculação fosse reduzido à medida em que se suaviza a variação de área na expansão.

Figura 5.27: Tamanho de vórtice para geometrias com razão de aspecto igual a seis.

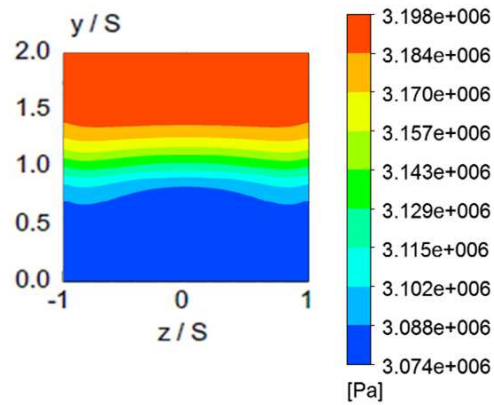


Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Em um último estudo para o comprimento do vórtice, o objetivo é verificar os efeitos da razão de aspecto para a mesma geometria. Em aspectos gerais, em função dos resultados das Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 é constatado que quanto maior for a razão de aspecto maior será o comprimento de vórtice formado a jusante da região de expansão abrupta.

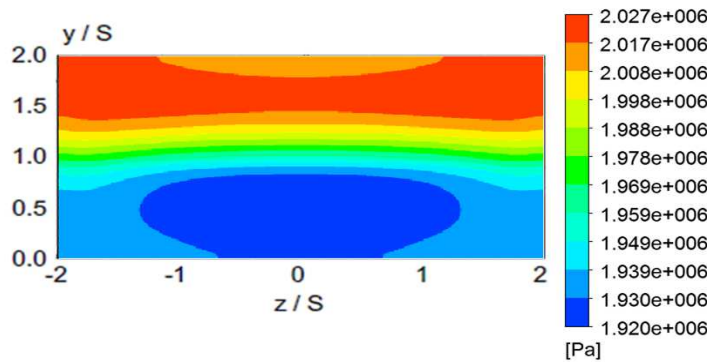
Tomando como referência o tamanho da região de recirculação nas posições centrais dos canais ($z/(W/2) = 0$), para as geometrias com expansões súbitas, têm-se os valores de $x/S = 0,14$, $x/S = 0,23$ e $x/S = 0,24$ para as razões de aspecto dois, quatro e seis, respectivamente. Para os canais com expansões circulares, os tamanhos de vórtices nas regiões centrais para as razões de aspecto dois, quatro e seis são: $x/S = 0,075$, $x/S = 0,08$ e $x/S = 0,11$, respectivamente. Desta forma, a medida em que as paredes laterais do canal são aproximadas (reduzindo a razão de aspecto), os efeitos tridimensionais se tornam mais relevantes (ocorre uma maior interação entre as paredes laterais e a base do canal) e o tamanho da região de recirculação vai sendo reduzido. A explicação física para este comportamento provavelmente está relacionada com os gradientes de pressão, sendo que as variações de pressões no canais aumentam a medida que se reduz a razão de aspecto, conforme mostram as Figuras 5.28, 5.29 e 5.30, mensuradas na região $x/S = 0,25$, salienta-se que a pressão estática na saída dos canais é zero para as três geometrias. Com um gradiente de pressão maior, a região de recirculação tende a ficar mais confinada na quina côncava da seção de expansão. Finalmente, é importante destacar que uma análise mais detalhada sobre este comportamento da região de recirculação vai além do escopo deste trabalho, sendo mencionado na seção de sugestões para trabalhos futuros.

Figura 5.28: Contornos de pressão em $x/S = 0.25$ para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a dois.



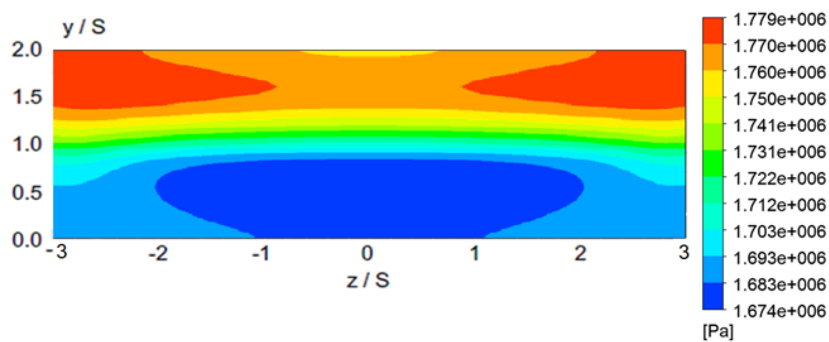
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.29: Contornos de pressão em $x/S = 0.25$ para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a quatro.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.30: Contornos de pressão em $x/S = 0.25$ para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a seis.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

5.6 Análise Paramétrica: Estudo dos Efeitos do Tipo de Expansão e da Razão de Aspecto Sobre os Parâmetros Globais

Esta seção de análise dos resultados contempla o estudo paramétrico sobre os efeitos da variação da razão de aspecto ($AR=W/h$) e do tipo de expansão sobre a queda de pressão e o número de Nusselt ao longo do canal. Em um primeiro momento é analisado a variação da queda de pressão ao longo do canal (seção 5.6.1) e num segundo momento, a distribuição do número de Nusselt (seção 5.6.2).

5.6.1 Análise da variação da queda de pressão ao longo do canal

De acordo com Biswas et al. (2004) o estudo da variação da pressão em canais com variações súbitas de seção é importante, pois esta grandeza está relacionada com a quantificação da energia necessária para sustentar o escoamento (no caso de polímeros fundidos está relacionada com a potência de bombeamento de injetoras).

Dentro deste contexto, o primeiro parâmetro analisado é o efeito da variação da razão de aspecto (efeito da envergadura) e das diferentes geometrias dos canais na região de expansão sobre a queda de pressão global (ver Equação 5.3) entre as regiões de entrada e saída dos canais. Esses valores são apresentados nas Tabelas 5.8 e 5.9. É possível verificar que o aumento da razão de aspecto causa uma diminuição da queda de pressão nos canais. Tomando como referência, os valores das variações de pressão média para as geometrias com razão de aspecto igual a dois, há uma redução de pressão (valor médio) de aproximadamente 33 % e 40% para os canais com razões de expansões quatro e seis, respectivamente. Finalmente, é importante salientar que este resultado é fisicamente coerente, visto que, ao se reduzir a razão de aspecto as paredes laterais do canal são aproximadas e aumenta consideravelmente o atrito e, como consequência, a queda de pressão.

Ainda de acordo com as Tabelas 5.8 e 5.9, analisando a variação da queda de pressão para as diferentes geometrias com a mesma razão de aspecto, nota-se um efeito pequeno do tipo de expansão sobre o valor da queda de pressão. Tomando como referência o canal com expansão súbita, há um decréscimo da queda de pressão em torno de 2,2 % e 4,11 % para os canais com expansões tipo circular e rampa, respectivamente.

Tabela 5.8: Variação da queda de pressão média entre as seções de entrada e saída.

Razão de aspecto (AR=W/h)	2	4	6
Geometria	$\Delta\bar{p}[MPa]$	$\Delta\bar{p}[MPa]$	$\Delta\bar{p}[MPa]$
<i>Expansão súbita</i>	4,064	2,7366	2,4424
<i>Circular</i>	3,9819	2,6684	2,3767
<i>Rampa</i>	3,9315	2,6176	2,3262

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Por outro lado, a Tabela 5.9 apresenta o coeficiente de queda de pressão adimensional, de acordo com a definição da Equação 5.5 . Como o valor da velocidade na entrada foi mantido constante, o comportamento do coeficiente de pressão segue a mesma tendência que a queda de pressão dimensional. É importante destacar que o coeficiente de pressão adimensional é um parâmetro fundamental nas análises de escoamentos internos visto que relaciona a queda de pressão estática no canal em relação ao valor da pressão dinâmica na entrada (ZDANSKI; VAZ JR., 2009a). Neste ponto também é importante destacar que as variações da pressão dinâmica são pequenas, de forma que a variação de pressão estática equivale à perda de carga.

Tabela 5.9: Variação do coeficiente de pressão adimensional entre as seções de entrada e saída.

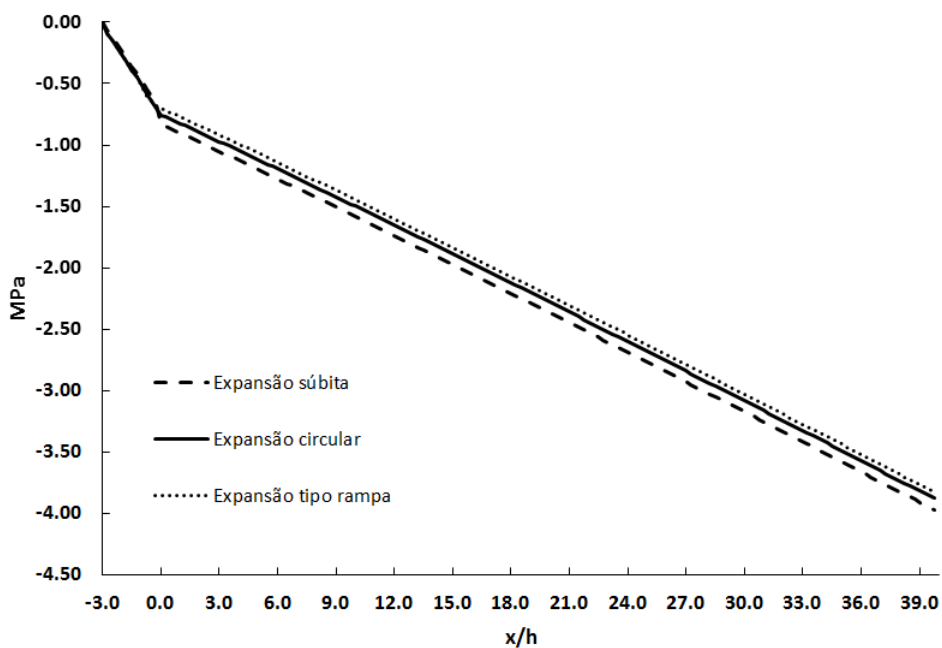
Razão de aspecto (AR=W/h)	2	4	6
Geometria	$C_I \cdot 10^{-6}$	$C_I \cdot 10^{-6}$	$C_I \cdot 10^{-6}$
<i>Expansão súbita</i>	1,9737	1,3290	1,1862
<i>Circular</i>	1,9337	1,2960	1,1543
<i>Rampa</i>	1,9094	1,2712	1,1297

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Outro resultado importante com relação as variações de pressão é a distribuição da pressão média (valor médio em uma linha no eixo y – ver Equação 5.6) ao longo do comprimento do canal (x). Esta grandeza foi avaliada no plano médio, região central do canal ($z/S = 0$) para as três geometrias e as três razões de aspecto estudadas.

Inicialmente, na Figura 5.31 são apresentados os resultados para a razão de aspecto ($AR = W/h$) igual a dois. Os resultados mostram que para a região a montante da expansão ($-3, 0 \leq x/h \leq 0$) não há diferença visível nas variações da queda de pressão entre as geometrias. Nota-se que a partir da região de expansão ($x/h \geq 0$) começa a ocorrer a variação da queda de pressão para os casos analisados. A maior queda de pressão nas geometrias ocorre para o canal com expansão súbita, seguido pelo canal com expansão circular e, por último, o canal com expansão tipo rampa.

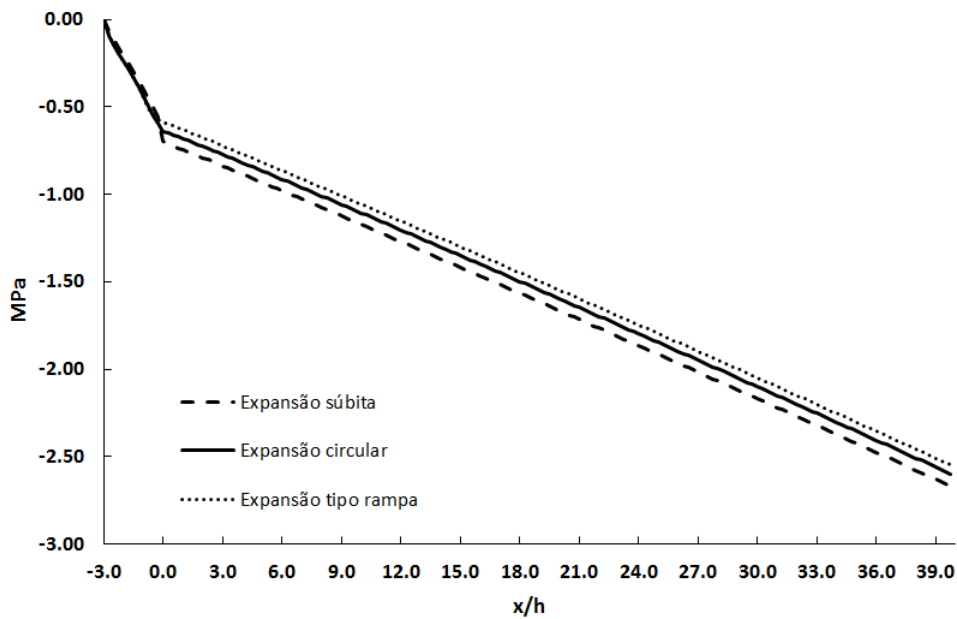
Figura 5.31: Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 2$ e $z/S = 0.0$



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

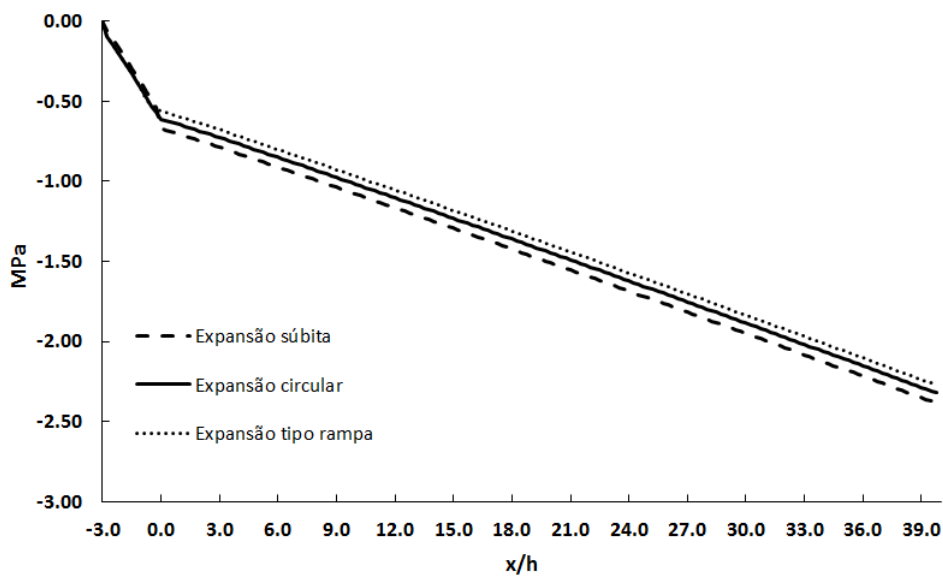
De forma similar aos resultados da Figura 5.31, as Figuras 5.32 e 5.33 mostram as variações da queda de pressão para as razões de aspecto quatro e seis, respectivamente. É possível notar que o comportamento é semelhante ao apresentado para razão de aspecto igual a dois, onde a maior queda de pressão ocorre para o canal com expansão súbita, seguido pelo canal com expansão circular e, por último, o canal com expansão tipo rampa.

Figura 5.32: Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 4$ e $z/S = 0.0$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.33: Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 6$ e $z/S = 0.0$.

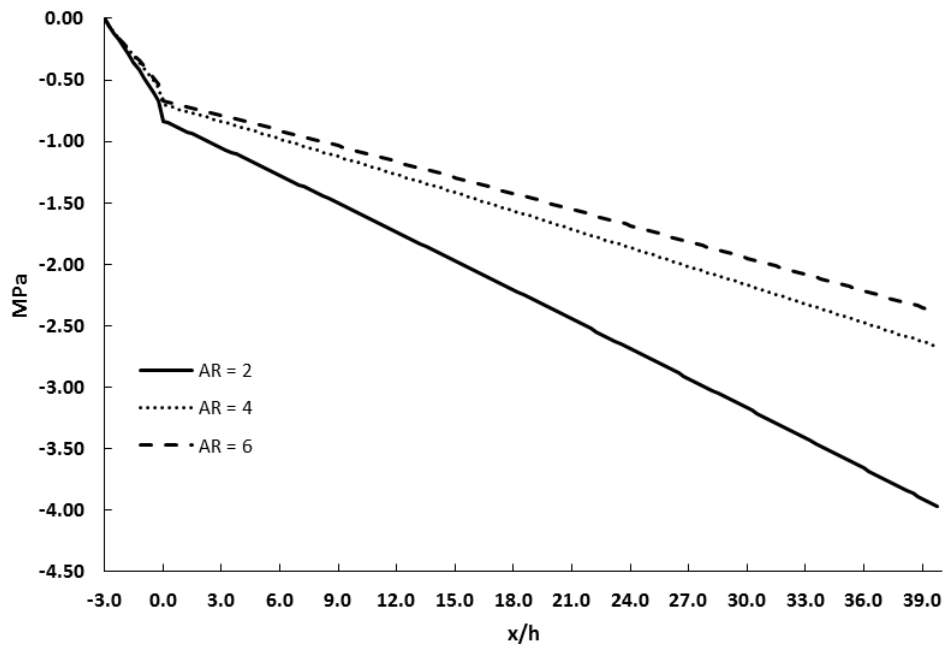


Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Finalmente, na Figura 5.34 são apresentadas as curvas de variação da queda de pressão na geometria com expansão súbita para as três razões de aspecto analisadas. Percebe-se claramente que a razão de aspecto produz alterações drásticas na queda de pressão ao longo de todo o canal (nas regiões a montante e a jusante da seção de expansão).

Este resultado indica que os efeitos tridimensionais são muito relevantes na estimativa da queda de pressão para a faixa de razão de aspecto analisada neste trabalho.

Figura 5.34: Variação da pressão média em y ao longo do comprimento do canal para $AR = 2, 4$ e 6 em $z/S = 0.0$ para o canal com expansão súbita.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

5.6.2 Análise da variação do número de Nusselt

A última análise realizada neste trabalho, consiste na avaliação das características do coeficiente de troca de calor por convecção forçada nas paredes do canal representado pelo número de Nusselt. A análise para a distribuição do número de Nusselt local é realizada na parede inferior ($y/S = 0.0$) do canal devido à maior variação dos gradientes nesta região.

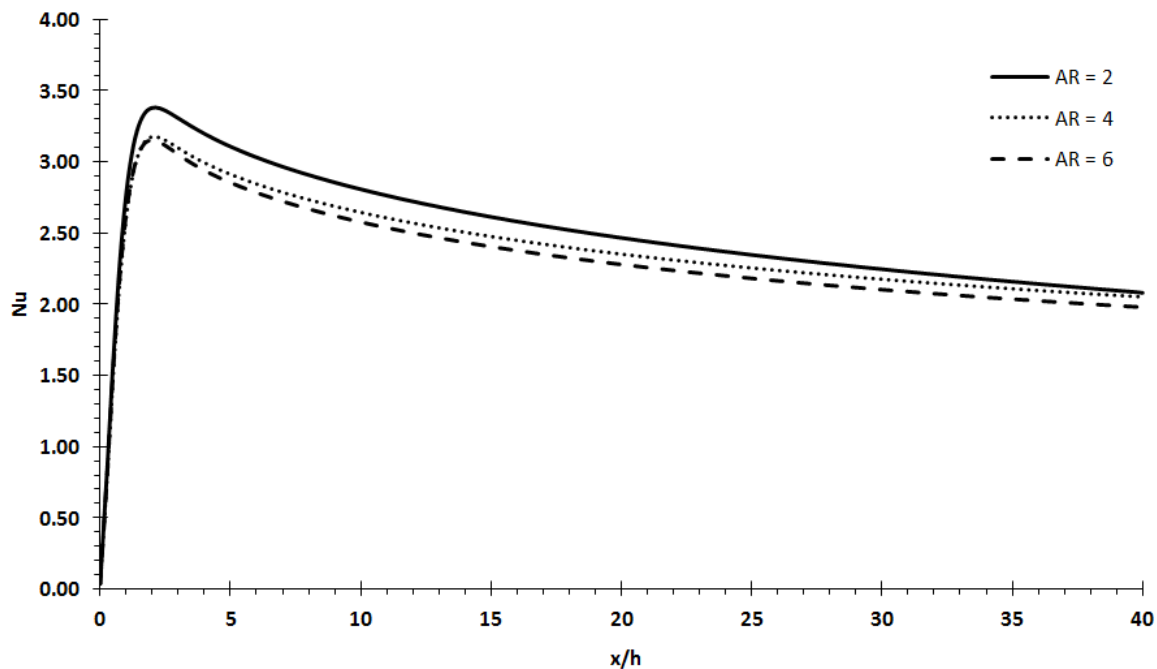
A primeira análise para a distribuição do número de Nusselt local (ver Equação 5.7) foi realizada na parede inferior à jusante da seção de expansão em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$ (plano médio do canal). Este estudo comparativo, tem como objetivo, mensurar o efeito da razão de aspecto na distribuição do número de Nusselt local no centro do canal, para as três geometrias. Nota-se, pelas Figuras 5.35, 5.36 e 5.37, que as curvas apresentam um comportamento similar para os três tipos de canais. Os maiores valores de Nusselt local ocorrem para as geometrias com razões de aspecto igual dois, seguido pelas geometrias com razões de aspecto igual a quatro e, por último, os menores valores de Nusselt local são encontrados nos canais com razões de aspecto igual a seis. Percebe-se também que entre os valores de $0 < x/h < 2.0$ o número de Nusselt local cresce de

maneira acentuada, tendo como valores máximos as regiões próximas de $x/h = 2.0$. Após essa região, $2.0 < x/h \leq 40$, os valores de Nusselt local decrescem de forma suave. O número de Nusselt tem um valor muito baixo nas proximidades da quina côncava ($x/h = 0.0$) devido aos pequenos valores de velocidade nesta região (ver Figuras 5.13(b), 5.14(b) e 5.15(b)).

O pico de Nusselt é atingido nas proximidades da região de recolamento onde o escoamento impacta na parede inferior dos canais. A redução suave de Nusselt à medida em que se aumenta o comprimento do canal é devido ao crescimento da camada limite na parede do canal, tendendo a um valor constante na região de escoamento plenamente desenvolvido. É importante destacar, que este comportamento de Nusselt também foi observado em Zdanski et al. (2008b) para expansões bidimensionais e Basso et al. (2016) para expansões tridimensionais.

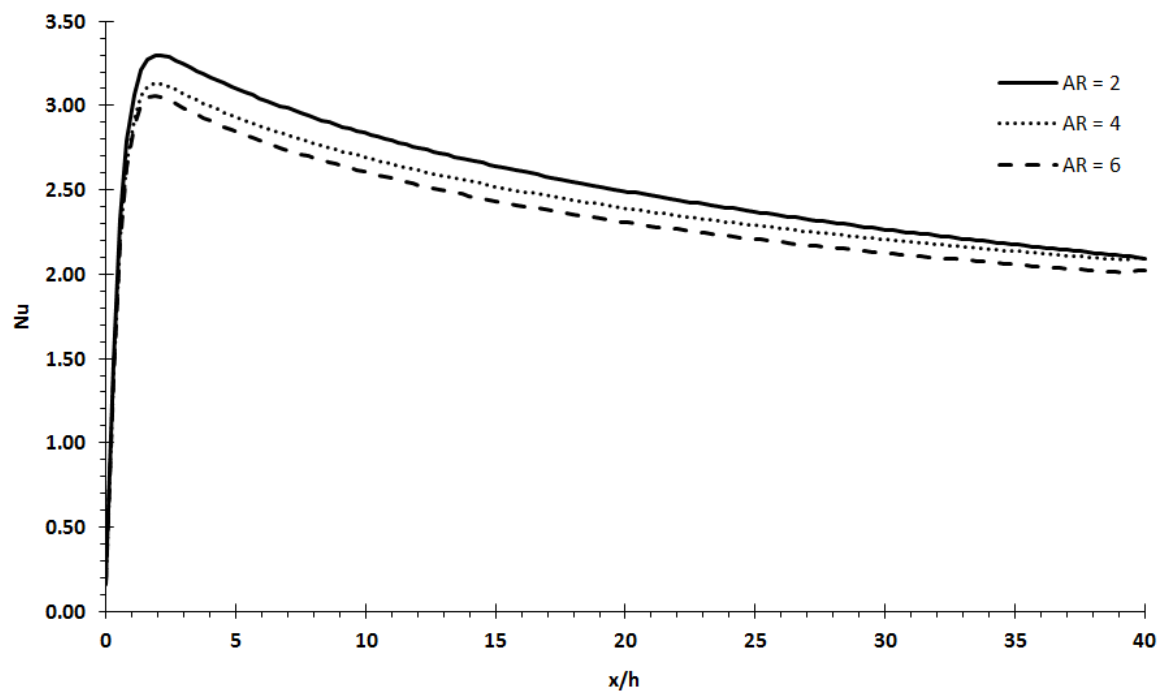
Finalmente, em outra análise, destaca-se que os valores de Nusselt crescem a medida em que se reduz a razão de aspecto. Este fato provavelmente está relacionado aos efeitos tridimensionais do escoamento, à medida que se reduz a razão de aspecto aumenta a interação entre as paredes laterais com o escoamento no centro do duto, incrementando a troca de calor convectiva.

Figura 5.35: Distribuição de Nusselt local para as três razões de aspecto na geometria com expansão súbita em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$.



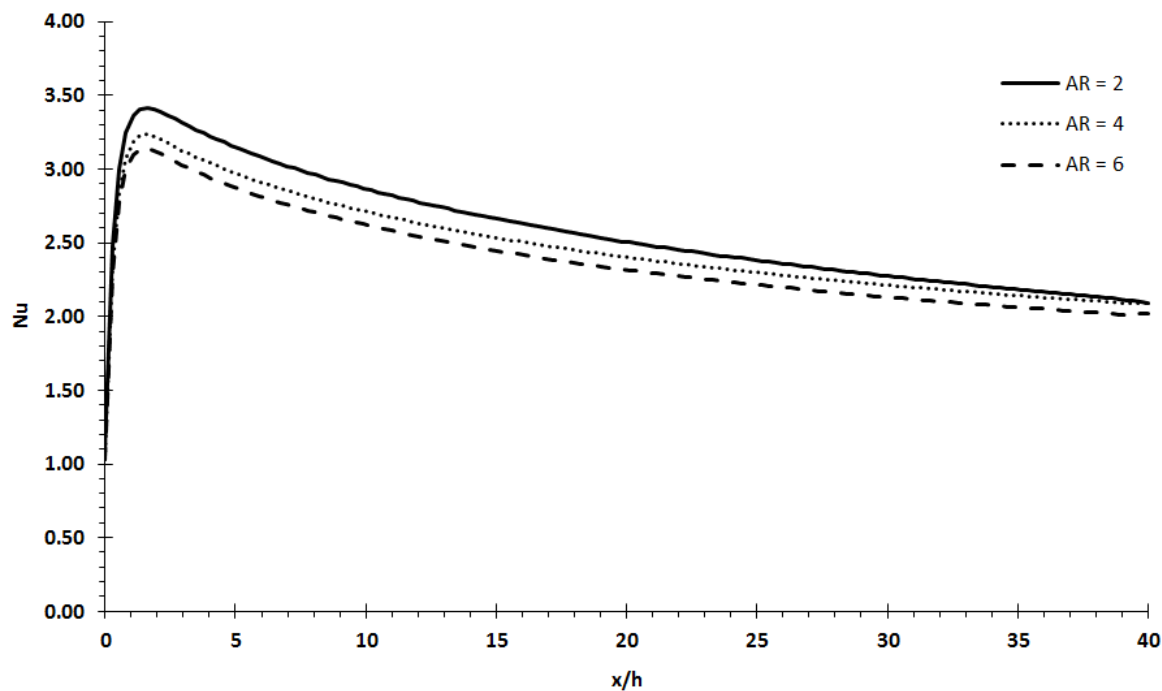
Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.36: Distribuição de Nusselt local para as três razões de aspecto na geometria com expansão circular em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Figura 5.37: Distribuição de Nusselt local para as três razões de aspecto na geometria com expansão tipo rampa em $y/S = 0.0$ e $z/S = 0.0$.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

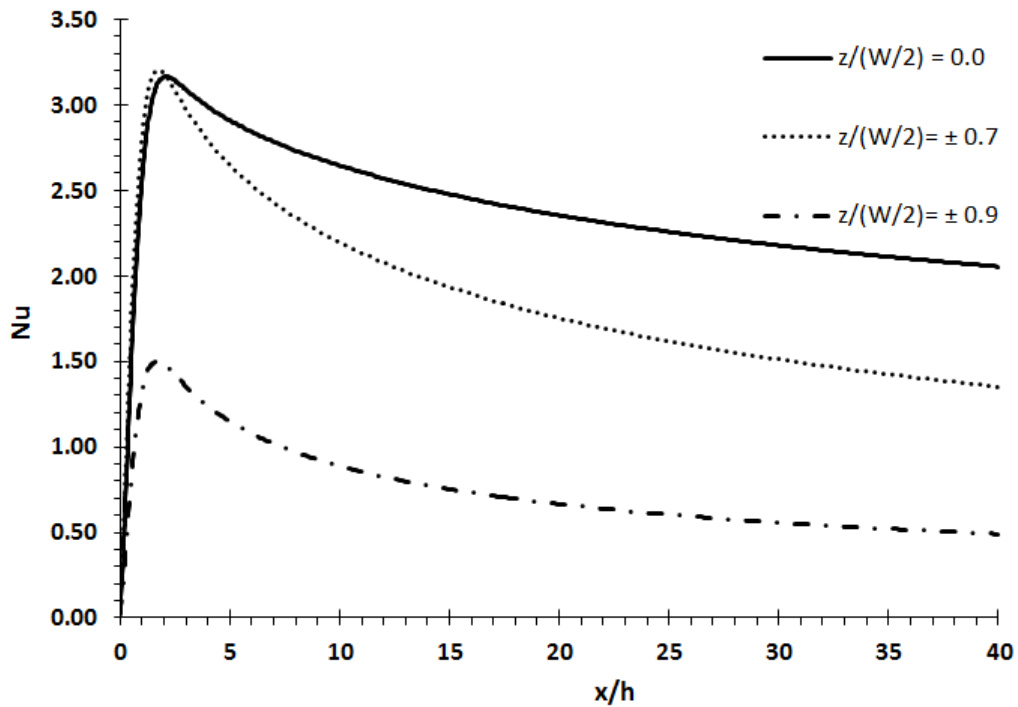
A segunda análise para a distribuição do número de Nusselt local é realizada na parede inferior à jusante da expansão em $y/S = 0.0$ com o objetivo de mensurar os efeitos da distribuição de Nusselt local para diferentes planos ao longo da envergadura ($z/(W/2) = 0.0, \pm 0.7$ e ± 0.9).

A distribuição de Nusselt local foi realizada para as três razões de aspectos ($AR = 2, 4$ e 6) e para as três geometrias (expansão súbita, circular e rampa), porém, devido à similaridade dos resultados apenas são mostradas as distribuições de Nusselt local para a geometria com expansão súbita cartesiana.

Neste estudo fica visível o efeito das regiões de paredes laterais na troca de calor, nota-se pela Figura 5.38 que os menores valores de Nusselt ocorrem para a região mais próxima da parede lateral ($z/(W/2) = \pm 0.9$). Para uma região localizada em $z/(W/2) = \pm 0.7$ há um aumento considerável em relação a posição anterior e, para o plano central $z/(W/2) = 0.0$ ocorrem os maiores valores para a distribuição de Nusselt local a partir de uma região $x/h > 2.5$. Este comportamento está relacionado aos efeitos do campo de velocidades, sendo observado para as três razões de aspecto analisadas neste trabalho. Os planos $z/(W/2) = \pm 0.9$ estão localizados nas proximidades das paredes laterais, sendo que nestas regiões as velocidades de escoamento são muito baixas (ver Figura 5.16 (b)). Desta forma, nestas regiões a troca de calor por convecção forçada é reduzida (valores baixos para o número de Nusselt).

Nota-se ainda que o valor máximo de Nusselt local ocorre para a plano $z/(W/2) = \pm 0.7$, na região de $x/h = 1.73$. Esse comportamento ocorre porque o fluxo de calor entre a parede e fluido neste posição é maior, conforme mostram os contornos de temperatura próxima à região de parede ilustrada na Figura 5.22 (c) ($(z/(W/2) = \pm 0.7) = (z/S = \pm 1.4)$). A explicação física para este fenômeno está relacionado com o comprimento de vórtice, discutido nas Figuras 5.26 e 4.8, percebe-se que o menor tamanho da zona de recirculação de fluido é justamente nesta posição, ($z/(W/2) = \pm 0.7$).

Figura 5.38: Distribuição do Nusselt local para diferentes posições ao longo do escoamento na parede inferior do canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a quatro.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

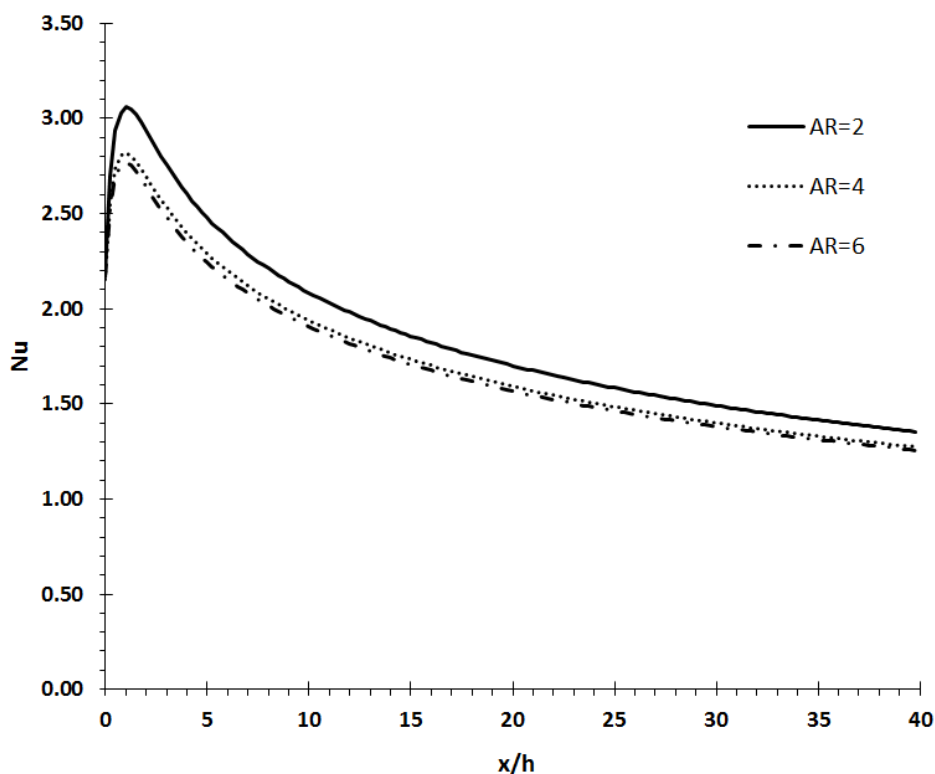
Como última análise deste trabalho foi realizada uma avaliação da distribuição do número de Nusselt médio na seção transversal de acordo com a Equação 5.9 para todo o escoamento na região a jusante da expansão. É importante destacar que neste caso o fluxo de calor médio foi avaliado nas quatro paredes do canal (laterais, inferior e superior).

A distribuição de Nusselt médio na seção transversal foi realizada para as três razões de aspecto ($AR = 2, 4$ e 6) e para as três geometrias (expansão súbita, circular e rampa), porém, devido à similaridade dos resultados, são mostradas apenas a distribuição de Nusselt médio para a geometria com expansão súbita de acordo com a Figura 5.39.

Para as três razões de aspectos, as distribuições de Nusselt médio na seção transversal possuem comportamentos semelhantes. Para uma região entre $0 < x/h < 0.8$ as curvas têm um aumento acentuado, tendo o valor máximo na região de $x/h = 0.8$. A jusante desta região, $x/h > 0.8$, as curvas começam a diminuir seus respectivos valores de forma suavizada até a região final do escoamento, $x/h = 40.0$.

A redução suave de Nusselt à medida em que se aumenta o comprimento do canal é devido ao crescimento da camada limite nas paredes do canal, tendendo a um valor constante na região de escoamento plenamente desenvolvido, como mencionado anteriormente. Tomando como referência, o valor máximo de Nusselt para a geometria com razão de aspecto igual a dois, há um decréscimo de 8,4 % e 9,8 % para as razões de aspecto quatro e seis, respectivamente, situadas na mesma posição ($x/h = 0.8$). Em média, a partir do ponto $x/h = 5.0$, o decréscimo de Nusselt médio para as razões de aspecto quatro e seis são 5 % e 7,7 %, respectivamente.

Figura 5.39: Distribuição do Nusselt médio ao longo do escoamento para o canal com expansão súbita e razão de aspecto igual a quatro.



Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Finalmente, ao comparar o Nusselt médio na seção transversal é possível notar que os valores médios dos fluxos de calor que atravessam as paredes laterais são maiores à medida que se reduz a razão de aspecto das geometrias, conforme é apresentado a seguir na Tabela 5.10 para o canal com expansão súbita.

Tabela 5.10: Comparativo dos fluxos médios de calor que atravessam as paredes laterais do canal com expansão súbita.

Razão de aspecto (AR)	AR = 2	AR = 4	AR = 6
<i>Fluxo de calor nas paredes laterais</i>	$\overline{q_s''}[W/m^2]$	$\overline{q_s''}[W/m^2]$	$\overline{q_s''}[W/m^2]$
x/h = 5	-10.320,0	-8.339,0	-7.732,0
x/h = 10	-8.440,0	-6.724,0	-6.203,0
x/h = 25	-6.238,0	-4.804,0	-4.367,0
x/h = 40	-5.288,0	-3.966,0	-3.561,0

Fonte: produção do próprio autor, 2016.

Sendo assim, fica evidente o efeito tridimensional do escoamento, à medida que se reduz a razão de aspecto aumenta a interação entre as paredes laterais com o escoamento, incrementando a troca de calor convectiva.

Conclusão e Perspectivas Futuras

O presente trabalho propôs uma solução numérica, via metodologia dos volumes finitos, do escoamento de polímeros fundidos através de diferentes canais tridimensionais com expansões assimétricas. Foi assumida a formulação de Fluido Newtoniano Generalizado (FNG) sendo utilizado o modelo reológico de *Cross* para descrever a função material do fluido. Utilizou-se o programa comercial ANSYS FLUENT para a solução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. O acoplamento pressão-velocidade foi resolvido através do algoritmo SIMPLE.

Para a validação numérica foi feito uma comparação dos resultados do presente trabalho com valores da literatura. Os casos de validação compreenderam: um canal bidimensional com placas paralelas, um canal bidimensional com expansão súbita assimétrica e, por fim, um canal tridimensional com expansão súbita assimétrica. Os resultados obtidos nos casos de validação foram satisfatórios em comparação com os dados da literatura.

Com relação a análise numérica realizada do escoamento tridimensional de polímeros em canais com expansões assimétricas (escopo principal desta dissertação), destacam-se as seguintes conclusões:

- Aspectos sobre a topologia do escoamento: Entre as geometrias estudadas, as maiores zonas de recirculação de fluido ocorrem nos canais com expansão súbita, os canais com expansão tipo rampa não apresentam recirculação de fluido. Para os canais com expansão súbita e circular, o fluido que desce pelas paredes laterais na região de expansão vai até a região central do canal em formato espiral. Nas regiões bem próximas às paredes laterais, os canais com expansão súbita e circular não apresentam uma região de recirculação bem definida. Para uma região central ($z/S = 0$) o comportamento do vórtice é qualitativamente similar ao de um canal com expansão abrupta bidimensional. Quanto maior a razão de aspecto, maior é o comprimento de vórtice formado após a região de expansão. Finalmente, nota-se a influência das paredes e das temperaturas de parede no escoamento, afetando diretamente a distribuição de velocidade, temperatura, taxa de deformação equivalente e viscosidade do fluido;

- Aspectos sobre a variação de pressão do escoamento: Para uma mesma razão de aspecto, uma simples mudança na geometria da expansão influencia na variação de pressão. A maior variação de pressão ocorre para o canal com expansão súbita, seguido pelo canal com expansão circular e, por último, o canal com expansão tipo rampa apresenta a menor variação de queda de pressão. Quanto maior é a razão de aspecto, menor é a variação da queda de pressão ao longo do canal;
- Aspectos sobre o número de Nusselt no escoamento: Quanto menor a razão de aspecto, maior é o valor de Nusselt local para o centro do canal ($z/S = 0$) e de Nusselt médio na seção transversal. Para a região inferior do canal, quanto mais próximos das paredes laterais, menor é a distribuição de Nusselt local.

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos, apontam-se como sugestões os seguintes aspectos:

- Investigar a influência da variação da temperatura de entrada e das paredes, como também a influência da variação de velocidade do escoamento na região de recirculação de fluido;
- Investigar o efeito de contração súbita nas geometrias estudadas;
- Estudar a possibilidade de empregar outras funções materiais para modelar o comportamento do fluido, visando alguns modelos viscoelásticos;
- Estudar detalhadamente o comportamento da região de recirculação de fluido;
- Estudar a variação do ângulo de inclinação do canal tipo rampa até o surgimento do vórtice na região à jusante da expansão.

Bibliografia

BARTH, T.; JESPERSEN, D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. In: *27th Aerospace sciences meeting*. [S.l.: s.n.], 1989. p. 366.

BASSO, F.; ZDANSKI, P.B.S.; BEPPLER, D. L.; VAZ JR, M. Polymer melt flow in asymmetric sudden expansion: a numerical study. *16 Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, ENCIT-2016, 2016.

BINDING, D. M.; PHILLIPS, P.; PHILLIPS, T. N. Contraction/expansion flows: The pressure drop and related issues. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, Elsevier, v. 137, n. 1, p. 31–38, 2006.

BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. *Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid mechanics*. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., New York, NY, 1987.

BISWAS, G.; BREUER, M.; DURST, F. Backward-facing step flows for various expansion ratios at low and moderate reynolds numbers. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING*, AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS, v. 126, p. 362–374, 2004.

BRETAS, R.; D’AVILA, R. S. *Reologia de polímeros fundidos*. [S.l.]: São carlos, Ed UFS-CAR, 2005.

CHORIN, A. J. The numerical solution of the navier-stokes equations for an incompressible fluid. *Bulletin of the American Mathematical Society*, v. 73, n. 6, p. 928–931, 1967.

CHORIN, A. J. Numerical solution of the navier-stokes equations. *Mathematics of computation*, v. 22, n. 104, p. 745–762, 1968.

DHINAKARAN, S.; OLIVEIRA, M.; PINHO, F.; ALVES, M. Steady flow of power-law fluids in a 1: 3 planar sudden expansion. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Elsevier, v. 198, p. 48–58, 2013.

ESTACIO, K. C. *Simulação de escoamento de fluidos em superfícies definidas por pontos não organizados*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

FÁVERO, J. L. *Simulação de escoamentos viscoelásticos: desenvolvimento de uma metodologia de análise utilizando o software Openfoam e equações constitutivas diferenciais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.; LEONARD, A. *Computational methods for fluid dynamics*. [S.l.]: AIP, 1999.

- FLUENT®. A. Release 15, theory guide. 2015.
- HASSAN, H.; REGNIER, N.; BOT, C. L.; DEFAYE, G. 3d study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. *International Journal of Thermal Sciences*, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 161–169, 2010.
- HASSAN, H.; REGNIER, N.; DEFAYE, G. A 3d study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Elsevier, v. 30, n. 6, p. 1218–1229, 2009.
- HIRSCH, C. *Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2007.
- HUTCHINSON, B.; RAITHBY, G. A multigrid method based on the additive correction strategy. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Taylor & Francis, v. 9, n. 5, p. 511–537, 1986.
- KENNEDY, P.; ZHENG, R. *Flow analysis of injection molds*. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.
- KIM, S.-W.; TURNG, L.-S. Developments of three-dimensional computer-aided engineering simulation for injection moulding. *Modelling and Simulation in Materials Science and engineering*, IOP Publishing, v. 12, n. 3, p. S151, 2004.
- KOH, Y.; ONG, N.; CHEN, X.; LAM, Y.; CHAI, J. Effect of temperature and inlet velocity on the flow of a nonnewtonian fluid. *International communications in heat and mass transfer*, Elsevier, v. 31, n. 7, p. 1005–1013, 2004.
- LOUDA, P.; PŘÍHODA, J.; KOZEL, K.; SVÁČEK, P. Numerical simulation of flows over 2d and 3d backward-facing inclined steps. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Elsevier, v. 43, p. 268–276, 2013.
- MACHADO, F. M. *Aproximação de Galerkin mínimos-quadrados de escoamentos axissimétricos de fluido Herschel-Bulkley através de expansões abruptas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- MALISKA, R. C. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. [S.l.: s.n.], 2004.
- MARTINS, R. d. R. *Modelagem mecânica e aproximação de Galerkin mínimos quadrados de escoamentos axissimétricos de fluidos pseudoplásticos sujeitos a efeitos de inércia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. et al. *The finite volume method in computational fluid dynamics*. [S.l.]: Springer, 2016.
- NEJAD, M. M.; JAVAHERDEH, K. Numerical simulation of power-law fluids flow and heat transfer in a parallel-plate channel with transverse rectangular cavities. *Case Studies in Thermal Engineering*, Elsevier, v. 3, p. 68–78, 2014.
- OBERKAMPF, W. L.; TRUCANO, T. G. Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, Elsevier, v. 38, n. 3, p. 209–272, 2002.

- OLIVEIRA, M. S.; OLIVEIRA, P. J.; PINHO, F. T.; ALVES, M. A. Effect of contraction ratio upon viscoelastic flow in contractions: the axisymmetric case. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Elsevier, v. 147, n. 1, p. 92–108, 2007.
- PATANKAR, S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. [S.l.]: CRC press, 1980.
- PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International journal of heat and mass transfer*, Elsevier, v. 15, n. 10, p. 1787–1806, 1972.
- PEDRO BOM, R.; HERRMANN, M.; HOAYS, H. S. Análise reológica via simulador de fluxo. In: *Congresso em Ciência de Materiais da Região Sul*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 948–957.
- POOLE, R.; PINHO, F. T. d.; ALVES, M.; OLIVEIRA, P. The effect of expansion ratio for creeping expansion flows of ucm fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Elsevier, v. 163, n. 1, p. 35–44, 2009.
- RHIE, C.; CHOW, W. L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA journal*, v. 21, n. 11, p. 1525–1532, 1983.
- SALDANA, J. B.; ANAND, N.; SARIN, V. Forced convection over a three-dimensional horizontal backward facing step. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, Taylor & Francis, v. 6, n. 4, p. 225–234, 2005.
- SIQUEIRA, E. S. *Aproximação numérica de escoamentos de fluidos power-law utilizando o código livre MFIX*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2013.
- TERNIK, P. Planar sudden symmetric expansion flows and bifurcation phenomena of purely viscous shear-thinning fluids. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, Elsevier, v. 157, n. 1, p. 15–25, 2009.
- VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. [S.l.]: Pearson Education, 2007.
- WACHS, A.; CLERMONT, J.-R.; KHALIFEH, A. Computations of non-isothermal viscous and viscoelastic flows in abrupt contractions using a finite volume method. *Engineering Computations*, MCB UP Ltd, v. 19, n. 8, p. 874–901, 2002.
- ZDANSKI, P.; VAZ JR, M.; DIAS, A. P. C. Polymer melt flow in sudden expansions: The effects of viscous heating. *Thermal Engineering*, v. 7, n. 1, p. 65–70, 2008b.
- ZDANSKI, P.; VAZ JR, M.; INÁCIO, G. A finite volume approach to simulation of polymer melt flow in channels. *Engineering Computations*, Emerald Group Publishing Limited, v. 25, n. 3, p. 233–250, 2008a.
- ZDANSKI, P.B.S.; VAZ JR, M. Non-isothermal polymer melt flow in sudden expansions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Elsevier, v. 161, n. 1, p. 42–47, 2009a.
- ZDANSKI, P.B.S.; VAZ JR, M. Three-dimensional polymer melt flow in sudden expansions: Non-isothermal flow topology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 52, n. 15, p. 3585–3594, 2009b.

ZDANSKI, P.B.S.; VAZ JR, M.; DIAS, A. Forced convection heat transfer of polymer melt flow inside channels with contraction/expansion sections. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 1335–1339, 2011.

ZINANI, F. S. F. *Desenvolvimento e implementação computacional de formulações Galerkin mínimos-quadrados para escoamentos não Newtonianos sensíveis à cinemática*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

Apêndice A

Abaixo é apresentado o código implementado.

```
# include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, c, t)
{
real mu_l;
real gamma = C_STRAIN_RATE_MAG(c,t);
real T = C_T(c,t);
real etao;
real lambda;
real n;

real a1 = 0.022603;
real a2 = 5003.01;
real b1 = 1.6425e-6;
real b2 = 3901.0;
real c1 = 1.3574;
real c2 = 653.73;

etao = a1*exp(a2/T);
lambda = b1*exp(b2/T);
n = c1*exp(-1*c2/T);
mu_l = etao/(1+pow(lambda*gamma,(1-n)));

if(mu_l > 100000)
{
mu_l=100000;
}
return mu_l; }
```