

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAMON SILVA MARTINS

**SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM SEÇÕES DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE  
ESCOAMENTOS A BAIXA PRESSÃO**

VITÓRIA

2009

RAMON SILVA MARTINS

**SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM SEÇÕES DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE  
ESCOAMENTOS A BAIXA PRESSÃO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Rogério Ramos, D.Sc.

VITÓRIA

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAMON SILVA MARTINS

**SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM SEÇÕES DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE  
ESCOAMENTOS A BAIXA PRESSÃO**

Aprovado em 07 de dezembro de 2009.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Rogério Ramos, D.Sc.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. Edson José Soares, D.Sc.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

---

Prof. Márcio Ferreira Martins, Ph.D.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

VITÓRIA

2009

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela oportunidade da vida e de melhorar a cada dia.

Agradeço aos meus pais, Wildo e Lucila, pelo carinho, pelo investimento, pela confiança, pelo amor e pelo estímulo que sempre deram. A todo o resto da família que contribuiu com palavras, dicas, gestos e muitos sorrisos para que esta etapa de minha carreira fosse alcançada com sucesso.

Agradeço à minha namorada, Maíra, e sua família pela dose quase diária de força, paciência, compreensão, apoio, incentivo, felicidade e companheirismo.

Agradeço ao meu orientador, professor Rogério Ramos, pelo espírito educador e científico, bem como pelo caráter profissional e inteligente aplicado ao trabalho proposto, assim como a tudo que tive oportunidade de compartilhar com ele.

Agradeço ao professor de Engenharia Ambiental, Neyval Costa, e ao doutorando em Engenharia Ambiental, Rafael Sartim, pela disponibilidade e paciência para tirar dúvidas em relação ao ANSYS CFX.

Agradeço a Márcio Martins, pelas dicas e ajudas com Linux e o *cluster* e conversas relaxantes em meio a tanto trabalho.

Agradeço aos demais professores que foram grandes educadores nesta caminhada.

Agradeço ao companheiro Alex Luz Salgado, por compartilhar este projeto, mesmo em etapas diferentes da ciência.

Agradeço aos companheiros de sala que fizeram com que estes cinco anos de graduação passassem mergulhados em divertimento, apoio, companheirismo, churrascos, conversas, festas, cálculos, exercícios, madrugadas de estudo e muitas histórias. Estas histórias, assim como o conhecimento adquirido por todos, estarão sempre na memória como algo extremamente positivo. Sucesso para todos nós!

Não posso deixar de exaltar a figura de Anselmo Soeiro Pereira, companheiro de sala que se tornou parceiro e irmão na caminhada da vida. Obrigado por compartilhar tantas emoções ao

longo dos últimos anos de graduação. Torço para que esta amizade ainda nos renda muita música boa e muitos artigos publicados. Você foi muito importante nesta conquista!

Agradeço aos meus amigos, que foram e serão sempre pessoas das quais eu recebo alegria e conforto. Os laços são muitos... Musicais, educacionais, esportivos, religiosos... Obrigado a todos!

Agradeço à Escola São Domingos pelos funcionários, professores e colegas de sala que participaram de minha educação e têm parcela significativa de contribuição neste patamar alcançado.

Agradeço à Fundação Espírito-santense de Tecnologia – FEST – pela bolsa de estudos. À Agência Nacional de Petróleo – ANP –, em especial, ao Programa de Recursos Humanos PRH 29b pela oportunidade que me foi dada de enfatizar os conhecimentos na indústria de Petróleo e Gás Natural, bem como de usar o Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional – LFTC – da Universidade Federal do Espírito Santo, no qual as simulações numéricas foram processadas. Agradeço ao professor Edson Soares, pela coordenação coesa deste programa e pelos ideais científicos e filosóficos que compartilha com os que o cercam.

Por fim, agradeço a todos que foram fonte de paciência, aprendizado e conhecimento, mesmo aqueles que, porventura, sequer notaram que contribuíram.

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a investigação de perfis de velocidades perturbados em seções de medição de vazão à jusante de acidentes de linha. A principal motivação vem do fato de que em situações de medição de vazão operacional e fiscal na indústria de petróleo e gás é comum ter que lidar com a falta de espaço disponível para trechos retos que proporcionem perfis completamente desenvolvidos na seção medição de vazão. Sabe-se que os medidores de vazão utilizados são sensíveis às perturbações causadas nos perfis de velocidades em função de curvas, válvulas e mudanças abruptas de diâmetro à montante da seção de medição. A proposta de trabalho é simular numericamente o escoamento em uma geometria típica e investigar o perfil de velocidades resultante na seção de medição. As simulações numéricas foram feitas com o *software ANSYS CFX* versão 11.0, o qual utiliza o método dos volumes finitos para a solução das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. Os modelos k- $\epsilon$  e RNG k- $\epsilon$  foram testados e os resultados foram comparados qualitativamente com resultados experimentais e numéricos disponíveis na literatura. O escoamento mostrou comportamentos esperados para a geometria proposta e os resultados, de uma forma geral, foram importantes para a determinação de possíveis métodos para correção da medição de vazão, baseados na distribuição tridimensional de velocidades na seção de medição.

**Abstract**

The main objective of this work is to investigate disturbed flow profiles in metering sections downstream of accidents. Motivation is given by some legal and operational flow measurement situations in oil and natural gas industry in which there is not enough free space available, and consequently there are not desirable straight lengths to achieve fully developed flow at the metering section. Flow meters are sensitive to installation effects which cause disturbances in the velocity distribution, such as valves, curves and abrupt pipe contractions or expansions. The proposals of this work are obtaining numerical simulation of the flow through a typical geometry and investigating the result for velocity profiles at the metering section. All numerical simulations were made using the software *ANSYS CFX* version 11.0 which uses the finite volume methods for the solution of mass and momentum conservation equations.  $k-\epsilon$  and RNG  $k-\epsilon$  turbulence models were tested and the results were compared with some numerical and experimental results available in the literature. Expected flow behavior for the proposed geometry was achieved. Finally, results were somehow important to the determination of possible methods for flow measurement correction and calibration based on tridimensional flow distribution at the metering section obtained from numerical simulations.

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Chama de gás de queimadores em plataforma de petróleo. [7] .....	17
Figura 1.2: Condicionador de fluxo instalado em tubulação. [24] .....	23
Figura 2.1: Desenho esquemático de um medidor de vazão ultra-sônico por tempo de trânsito com indicação de alguns parâmetros de instalação e medição.(adaptada de [30]) .....	27
Figura 2.2: Exponente $n$ em função do número de Reynolds ( $Re$ ).....	30
Figura 2.3: Perfis de Hinze em função do número de Reynolds ( $Re$ ). ....	31
Figura 2.4: Fator de correção $k$ em função do número de Reynolds ( $Re$ ). ....	32
Figura 3.1: Representação esquemática da flutuação da velocidade em escoamento turbulento. [31].....	35
Figura 3.2: Superfície de um volume de controle. [31].....	40
Figura 3.3: Face de um elemento isolado de uma malha. [31] .....	41
Figura 3.4: Geometria definida para a simulação.....	47
Figura 3.5: Malha na seção de saída do domínio: (a) sem <i>inflation</i> ; (b) com <i>inflation</i> .....	51
Figura 3.6: Detalhe da malha perto da parede na seção de saída do domínio: (a) sem <i>inflation</i> ; (b) com <i>inflation</i> . ....	51
Figura 3.7: Malha na seção longitudinal: (a) sem <i>inflation</i> ; (b) com <i>inflation</i> .....	52
Figura 3.8: Detalhe da malha situada perto da parede na seção longitudinal: (a) sem <i>inflation</i> ; (b) com <i>inflation</i> . ....	53
Figura 3.9: Identificação das esferas para controle do tamanho dos elementos na região das curvas. .....	54
Figura 3.10: Parcela de malha com controle de tamanho dos elementos. ....	54

Figura 3.11: Resultado do teste de sensibilidade de malha na direção $y$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente $u$ adimensional; (c) componente $v$ adimensional; (d) componente $w$ adimensional.....	57
Figura 3.12: Resultado do teste de sensibilidade de malha na direção $z$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente $u$ adimensional; (c) componente $v$ adimensional; (d) componente $w$ adimensional.....	59
Figura 3.13: Erro relativo médio entre as malhas testadas: (a) velocidade global adimensional; (b) componente $u$ adimensional; (c) componente $v$ adimensional; (d) componente $w$ adimensional.....	62
Figura 4.1: Comportamento típico do escoamento à jusante de uma curva: (a) Ruppel e Peters [23]; (b) Hilgenstock e Ernst [18]; (c) linhas de corrente obtidas neste trabalho; (d) projeções tangenciais da velocidade obtidas neste trabalho.....	64
Figura 4.2: Comportamento típico do escoamento à jusante de duas curvas em planos diferentes: (a) Ruppel e Peters [23]; (b) Hilgenstock e Ernst [18]; (c) linhas de corrente obtidas neste trabalho; (d) projeções tangenciais da velocidade obtidas neste trabalho.....	65
Figura 4.3: Perfis de velocidades globais na seção de medição: (a) direção $y$ ; (b) direção $z$ ...	67
Figura 4.4: Perfis do componente $u$ da velocidade na seção de medição: (a) direção $y$ ; (b) direção $z$ .....	68
Figura 4.5: Comparação dos perfis nas direções principais na seção de medição com o perfil de Hinze para $Re = 2.26 \times 10^5$ .....	69
Figura 4.6: Vetores normais de velocidade na seção de medição de vazão. ....	70
Figura 4.7: Vetores de velocidade no plano longitudinal XZ.....	70
Figura 4.8: Resultados na direção $y$ para os modelos de turbulência k- $\epsilon$ e RNG k- $\epsilon$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente $u$ adimensional; (c) componente $v$ adimensional; (d) componente $w$ adimensional.....	73

Figura 4.9: Resultados na direção  $z$  para os modelos de turbulência  $k-\varepsilon$  e RNG  $k-\varepsilon$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente  $u$  adimensional; (c) componente  $v$  adimensional; (d) componente  $w$  adimensional..... 75

**Lista de Tabelas**

Tabela 1.1: Características dos medidores de vazão.(adaptada de [1]) .....	14
Tabela 1.2: Características dos medidores de vazão (continuação).(adaptada de [1]) .....	15
Tabela 3.1: Valores das constantes do Modelo k- $\varepsilon$ . ....	38
Tabela 3.2: Valores das constantes do Modelo RNG k- $\varepsilon$ . ....	39
Tabela 3.3: Parâmetros do ar seco usados nas simulações. ....	48
Tabela 3.4: Condições na entrada do domínio. ....	48
Tabela 3.5: Condições na saída do domínio. ....	48
Tabela 3.6: Condições na parede do domínio.....	49
Tabela 3.7: Síntese do teste de sensibilidade de malha. ....	50

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO: OS CIENTISTAS E SEUS FEITOS .....	12
1.2	APLICAÇÕES GERAIS DOS MEDIDORES DE VAZÃO .....	13
1.3	MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
1.4.1	<i>Tecnologia dos Medidores por Ultra-Som .....</i>	18
1.4.2	<i>Efeito de Acidentes de Linha na Medição .....</i>	20
1.4.3	<i>O Uso de Condicionadores de Fluxo .....</i>	22
1.5	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>NOÇÕES BÁSICAS SOBRE MEDIDORES DE VAZÃO ULTRA-SÔNICOS POR TEMPO DE TRÂNSITO.....</b>	<b>26</b>
2.1	ONDAS ULTRA-SÔNICAS .....	26
2.2	MEDIDORES DE VAZÃO ULTRA-SÔNICOS POR TEMPO DE TRÂNSITO .....	26
<b>3</b>	<b>PRINCÍPIOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA E DO MÉTODO NUMÉRICO .....</b>	<b>33</b>
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	33
3.1.1	<i>Equações Governantes .....</i>	33
3.1.2	<i>Modelos Estatísticos de Turbulência.....</i>	34
3.1.3	<i>Hipótese de Boussinesq .....</i>	36
3.1.4	<i>Modelo k-<math>\varepsilon</math> .....</i>	37
3.1.5	<i>Modelo RNG k-<math>\varepsilon</math> .....</i>	38
3.2	MODELAGEM NUMÉRICA .....	39
3.2.1	<i>Discretização das Equações Governantes .....</i>	39
3.2.2	<i>Solução das Equações Discretas.....</i>	41
3.3	ANSYS CFX 11.0.....	44
3.3.1	<i>Desenho da Geometria .....</i>	44
3.3.2	<i>Elaboração da Malha.....</i>	44
3.3.3	<i>Pré-processamento .....</i>	45

3.3.4 <i>Processamento</i> .....	46
3.3.5 <i>Pós-processamento</i> .....	46
3.4 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO.....	46
3.4.1 <i>Definição da Geometria</i> .....	46
3.4.2 <i>Os Parâmetros de Simulação e as Condições de Contorno</i> .....	48
3.4.3 <i>Sensibilidade e Qualidade de Malhas</i> .....	49
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA.....	63
4.2 VELOCIDADES NA SEÇÃO DE MEDIÇÃO .....	66
4.3 TESTE COM MODELO RNG K-E DE TURBULÊNCIA.....	71
<b>5 COMENTÁRIOS FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>76</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	76
5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	77
5.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	77
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>

## 1 Introdução

### 1.1 Contextualização Histórica da Medição de Vazão: os cientistas e seus feitos

O primeiro indício de medição de vazão aconteceu com fins fiscais para a cobrança de taxas da administração pública das civilizações que começaram a canalizar água para o consumo doméstico. Documentos romanos e egípcios fazem menção a essas medições primárias de líquidos, sendo, esses, datados de séculos atrás.

Houve um grande intervalo de tempo no qual o assunto não foi tratado com visão científica relevante. Os próximos responsáveis por estudar fenômenos relativos ao movimento e ao escoamento da água foram os italianos Leonardo da Vinci (1452-1519), durante o século XV; Galileo Galilei (1564-1642), já no século XVII e seu discípulo, Evangelista Torricelli (1608-1647).

Fundamentos equacionados matematicamente começaram a surgir já no século XVIII, junto com os princípios da ciência intitulada Mecânica dos Fluidos. Os dois principais nomes do início da abordagem desta ciência são o holandês Daniel Bernoulli (1700-1782) e o suíço Leonhard Euler (1707-1783). A maior contribuição de Bernoulli à Mecânica dos Fluidos foi a, hoje chamada, equação de Bernoulli. Euler alcançou equações diferenciais capazes de expressar o comportamento de fluidos sujeitos condições diversas. Henri Pitot (1695-1771), engenheiro francês, apresentou no mesmo século um instrumento utilizado para medir a velocidade da água, o tubo de Pitot. Este instrumento se aprimorou e hoje é usado para medir velocidade e vazão de fluidos em diversas áreas, como na aeronáutica e na indústria de petróleo e gás. O último destaque do século XVIII foi o italiano Giovanni Venturi (1746-1822), responsável pelo desenvolvimento do tubo de Venturi.

O século XIX foi marcado pelo desenvolvimento matemático na dinâmica dos fluidos, o que resultou em maior entendimento do comportamento e das propriedades dos fluidos, que foi de grande utilidade para as inovações nos instrumentos de medição surgidos no século seguinte. Os principais cientistas deste período foram o médico e físico francês Jean Poiseuille (1797-1869), que estudou escoamentos de fluidos viscosos em tubos capilares (inspirado no fluxo sanguíneo); o físico irlandês *sir* George Stokes (1819-1903), com trabalhos sobre a hidrodinâmica e o, também físico, britânico Osborne Reynolds (1842-1912), que propôs um número adimensional que ponderava a relação entre forças de inércia e forças viscósas.

Os processos nos quais a medição de vazão era utilizada tornaram-se mais complexos, abrangentes e exigentes no século XX. Havia a necessidade do desenvolvimento de instrumentos mais confiáveis, versáteis e precisos para as medições. Universidades, instituições privadas e institutos de pesquisa organizaram congressos e publicaram trabalhos e normas, visando o desenvolvimento dos processos de medição. Alguns cientistas, mesmo que de séculos anteriores, foram inspiração para soluções que usavam princípios que não o de Bernoulli, tais como Kármán Tódor (Theodor von Karman) (1881-1963), húngaro que estudou os vórtex; o britânico Michael Faraday (1791-1867), um dos precursores do estudo do eletromagnetismo; o austríaco Johann Doppler (1803-1853), que com seus estudos sobre as ondas sonoras escreveu o que ficou posteriormente conhecido como efeito Doppler e Gaspard Coriolis (1792-1843), engenheiro e matemático francês que estudou leis da cinética, propondo o que veio a ser chamado de força de Coriolis. Estes estudos proporcionaram o desenvolvimento de medidores, tais como o medidor de vórtices, o medidor eletromagnético, o medidor por ultra-som e o medidor por efeito Coriolis. [1] [2] [3]

## **1.2 Aplicações Gerais dos Medidores de Vazão**

Os medidores desenvolvidos ao longo destes últimos anos foram motivos de estudo em empresas e institutos de pesquisa. O somatório destes levantamentos resultou em normas específicas que indicam as condições de trabalho para a obtenção de valores dentro de uma faixa aceitável de resultados. O aprofundamento cada vez maior em cada tipo de medidor possibilitou a relação das principais características de instalação de cada tipo de medidor, levando em consideração o fluido de trabalho, instrumentos auxiliares necessários, normas regentes, custos e outros fatores. A Tabela 1.1 e a Tabela 1.2 mostram essas relações para alguns dos medidores mais usuais.

**Tabela 1.1: Características dos medidores de vazão.(adaptada de [1])**

	<b>Placas de Orifício Padrão</b>	<b>Bocal de Vazão</b>	<b>Bocais Venturi</b>	<b>Pitot</b>	<b>Área Variável</b>	<b>Coriolis</b>
F L U I D O S	Líq. Limpos	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
	Líq. Sujos	Não usar	Não usar	Não usar	Restrições	Adequado
	Líq. Carreg.	Não usar	Não usar	Não usar	Não usar	Adequado
	Líq. Viscosos	Não usar	Não usar	Não usar	Restrições	Adequado
	Líq. Corrosivos	Adeq./restr.	Adeq./restr.	Adeq./restr.	-	Restrições
	Líq. Erosivos	Não usar	Restrições	Restrições	-	Restrições
	Gases Limpos	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado	Adequado
	Gases Sujos	Não usar	Não usar	Não usar	Restrições	Não usar
	Gases Úmidos	Adeq. (dreno)	Adeq. (dreno)	Adeq. (dreno)	Restrições	Adequado
	Vap. Superaq.	Adequado	Adequado	Adequado	Restrições	Adequado
M M C T C C C C C C	Vap. Sat. Seco	Adequado	Adequado	Adequado	Restrições	Adequado
	Vap. Sat. Úmido	Restrições	Restrições	Restrições	Restrições	-
	Normas	ISO 5167 ISO/TR 15377 AGA 3	ISO 5167 ASME	ISO 5167 ASME	ISO 3966	Não há ANSI/ASME MFC-11M
	Limite inferior	50 mm (25 mm)	50 mm (25 mm)	50 mm (25 mm)	200 mm	3 mm 3 mm
	Cl. de exatidão	0,5 a 2	1 a 3	1 a 3	1 a 3	0,5 a 5 0,1 a 0,5
	Cl. de rangeabilidade	3 {5} a 5 {15}	3 {5} a 5 {15}	3 {5}	3 {5}	10 40 a 100
	Trecho reto mínimo	10 a 50 D, depende das curvas a montante	10 a 50 D	7 a 15D	10D	Não há necessidade N/A (cuidado com cavitação)
	Instrumento auxiliar	Transmissor de pressão diferencial	Transmissor de pressão diferencial	Transmissor de pressão diferencial	Transmissor de pressão diferencial	Não há necessidade Computador de vazão
	Vantagem principal	Simplicidade Incerteza calculável por norma	Pouca perda de carga. Recomendado para vapor	Pouca perda de carga	Podem ser inseridos com carga	Leitura direta Excelente exatidão Q massa direta
	Inconveniente principal	Possível desgaste da borda	Fabricação custosa	Classe de exatidão modesta	Classe de exatidão modesta	Exatidão modesta, transmissão difícil Preço elevado. Tamanho limitado
Custo inicial	Médio ou elevado, se usado com um <i>meter run</i>	Médio ou elevado, se usado com um <i>meter run</i>		Médio	Baixo	Baixo Elevado
	Custo de instalação	Médio, considerando as soldas na linha	Médio a alto, com um <i>meter</i> <i>run</i>	Baixo	Baixo	Baixo Médio
	Custo de manutenção	Baixo. Verificação/ calibração fácil	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
Estabilidade	Boa, mas pode ser afetada pela erosão ou detritos	Boa	Boa	-	Boa	Muito Boa

**Tabela 1.2: Características dos medidores de vazão (continuação).(adaptada de [1])**

	<b>Eletromagnéticos</b>	<b>Térmicos</b>	<b>Ultra-sônicos (D) Doppler (T) Transit Time</b>	<b>Turbinas</b>	<b>Vórtices</b>
F L U I D O S	Líq. Limpos	Adequado	Restrições	Adequado (T)	Adequado
	Líq. Sujos	Adequado	-	Adequado (T,D)	-
	Líq. Carreg.	Adequado	-	Adequado (D)	-
	Líq. Viscosos	-	-	Adequado (T,D)	-
	Líq. Corrosivos	Adequado	-	Adequado (T,D)	-
	Líq. Erosivos	-	-	Adequado (T,D)	-
	Gases Limpos	-	Adequado	Adequado (T)	Adequado
	Gases Sujos	-	-	Restrições (T,D)	-
	Gases Úmidos	-	Restrições	Restrições (T,D)	-
	Vap. Superaq.	-	-	-	Adequado
V A C R E M P C T E	Vap. Sat. Seco	-	-	-	Adequado
	Vap. Sat. Úmido	-	-	-	Restrições
	Normas	ISO 6871 ISO 9104	Não há	ASME MFC-YY AGA 9	AGA 7 ISO 2715
	Limite inferior	3 mm	8 mm	12 mm	6 mm
	Cl. de exatidão	0,5 a 2	1 a 5	0,15 a 5	0,1 a 1
	Cl. de rangeabilidade	30 a 100	10 a 100	10{20}	10{50}
	Trecho reto mínimo	5 a 10D (montante) 3D (jusante)	10 a 20D (montante) 3D (jusante)	igual placas com $\beta=0,7$	Consultar normas
	Instrumento auxiliar	Computador de vazão	Computador de vazão	Computador específico	Sensor de pulsos
	Vantagem principal	Sem obstáculo no fluxo	Q massa direta	Boa exatidão, Normas	Boa exatidão, Normas
	Inconveniente principal	Mede somente fluidos com condutibilidade elétrica	Pode ser afetado por depósito de impurezas	Recalibração difícil	Necessidade de número de Reynolds alto
Custo	Custo inicial	Médio	Médio	Médio/Alto	Médio
	Custo de instalação	Médio	Baixo	Baixo/Médio	Médio/Elevado
	Custo de manutenção	Baixo	Baixo	Médio	Médio
	Estabilidade	Boa, mas depende da aplicação	Depende do fluido medido	Varia conforme a tecnologia	Depende do fluido medido
					Boa

Nas Tabela 1.1 e Tabela 1.2 pode-se notar que os medidores a efeito Coriolis e por ultra-som são bem promissores, dada a adequação de ambos a várias condições de fluido. Os medidores ultra-sônicos têm mostrado muita força e crescimento no mercado dos medidores de vazão nos últimos anos, são mais vantajosos que os medidores a efeito Coriolis, principalmente em função do preço, mas também pela aplicação em tubulações mais robustas (maiores diâmetros), muito comuns na indústria, em especial, na de petróleo e gás natural.

### 1.3 Motivações e Objetivos do Trabalho

Uma das motivações deste trabalho coincide com o fator estimulante para o surgimento da necessidade de medir vazão: a fiscalização. A medição de vazão mostrou-se uma ferramenta essencial em partes dos processos de controles operacional e fiscal. No Brasil, contudo, desde que se começou a produzir petróleo e gás, as empresas responsáveis pela exploração ou exploração estavam também encarregadas de medir, fiscalizar a quantidade de produto vendida e ainda distribuir os tributos arrecadados ao Estado. Porém, essas medições, tanto operacionais como fiscais, não eram normatizadas e as incertezas envolvidas nos procedimentos adotados sempre geraram falta de confiabilidade na medição.

Este cenário só foi alterado em 2000, com a publicação da Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 1 [4]. Este documento regula tecnicamente as condições, os procedimentos e os requisitos mínimos de sistemas de medição de vazão de petróleo e gás natural, visando resultados acurados. Os medidores autorizados previamente para a medição de gás natural pela Portaria são a placa de orifício, o do tipo turbina e o ultra-sônico. Lynnworth e Liu [5] mostram o desenvolvimento dos medidores ultra-sônicos desde 1955 e que estes medidores eram responsáveis por cerca de 10% do volume de vendas de medidores de vazão, já em 2005. A Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 1 também exige que os medidores ultra-sônicos atendam os requisitos de um documento publicado em 1998 pela *American Gas Association – AGA* [6]. Este documento divulgou o funcionamento destes medidores, suas principais características e limitações e ainda levantou necessidades de pesquisa em relação à tecnologia de medição de vazão de gás por ultra-som, para que houvesse resultados ainda mais confiáveis. As propostas de estudo giravam em torno da influência de alguns parâmetros do escoamento, da geometria da tubulação e de algumas propriedades do gás na medição. A comunidade científica respondeu a este chamamento, ao apresentar diversos artigos resultantes de pesquisas sobre estes temas que influenciam a medição.

Dentre estes temas, foi abordada a influência de acidentes de linhas (tais como curvas, válvulas, joelhos e flanges) e, consequentemente, do perfil de velocidades (distribuição dos vetores de velocidade em uma dada seção transversal do tubo) na medição de vazão. Ao se analisar os princípios de funcionamento e de cálculo de vazão do medidor ultra-sônico mostrados em AGA Report Nº 9, entende-se que a incerteza da vazão obtida aumenta quando o perfil de velocidades não está completamente desenvolvido na seção de medição; isto é, se no trecho onde o medidor de vazão por ultra-som foi instalado o perfil de velocidades ainda varia, o valor da medição passa a ter um erro em função de alguma perturbação indevida no

escoamento. Incerteza de medição de vazão devido à influência de acidentes de linha pode ter um significado razoavelmente considerável em se tratando de medição fiscal. *Royalties* e outros pagamentos são calculados em função da vazão medida, portanto, a incerteza interfere diretamente no preço a ser cobrado ou pago por alguém. Fica evidente que é de interesse do vendedor e do comprador que a incerteza envolvida na medição seja conhecida e, de preferência, reduzida a um valor consensualmente aceitável.

Um exemplo de aplicação do medidor ultra-sônico é para a obtenção da vazão de gás de queimadores (*flare*) em plataformas de exploração de petróleo e gás. O gás de *flare* é aquele indesejado, oriundo de uma sobre-pressão na planta de produção de gás. É queimado e sua chama fica constantemente acesa na ponta da tubulação (geralmente inclinada quase na vertical), conforme representação da Figura 1.1.



**Figura 1.1: Chama de gás de queimadores em plataforma de petróleo. [7]**

A restrição de espaço é uma realidade nas plataformas de petróleo e gera consequências prejudiciais à medição. O perfil de velocidades precisa de um trecho sem acidentes de linha para se desenvolver completamente – o chamado trecho reto. É muito comum em plataformas, porém, pela falta de espaço, que a medição de vazão ocorra em trechos em que o escoamento ainda não se desenvolveu. O estudo das incertezas na medição neste caso é importante em função da necessidade de se manter os valores dentro dos padrões estabelecidos pela norma

regente. Faz-se essencial a abordagem dos porquês e dos modos que alguns elementos influenciam - muitas vezes comprometendo a confiabilidade – a mediação.

As motivações levam este trabalho aos seguintes objetivos:

- a) Fazer simulações numéricas de casos típicos de medição de gás por ultra-som na indústria, abordando as etapas de desenho de geometria, elaboração de malha, teste de malhas, análise de tempo computacional e tratamento de dados;
- b) Estudar e criticar, por intermédio das simulações, a influência de acidentes de linha (curvas em arranjos diversos) no perfil de velocidades na seção de medição de vazão;
- c) Validar o modelo proposto para garantir a confiabilidade de futuras abordagens distintas do mesmo caso.

## **1.4 Revisão Bibliográfica**

Para que os objetivos deste trabalho fossem cumpridos, algumas frentes de bibliografia fizeram-se necessárias. A primeira divisão se deu entre trabalhos que tratavam de simulações numéricas e trabalhos puramente de caráter experimental. Ambos os caminhos apresentam trabalhos que estudam as influências do arranjo do medidor ultra-sônico, outros que abordam o uso de condicionadores de fluxo, aqueles que buscaram a influência de parâmetros da tubulação, tais como os acidentes de linha e suas diversas disposições ou mesmo a rugosidade das paredes internas da tubulação. Pode-se separar a abordagem bibliográfica de acordo com os temas a seguir.

### **1.4.1 Tecnologia dos Medidores por Ultra-Som**

Conforme já comentado, os medidores por ultra-som são uma tecnologia promissora, porém ainda carentes de melhorias capazes de adequá-los aos padrões de exigências das normas em algumas situações peculiares de escoamento, muito embora tenham passado por melhorias razoáveis em termos de tecnologia e incertezas nos últimos anos.

Lynnworth e Liu [5] mostram as diferentes técnicas de medição por ultra-som, as aplicações de cada técnica, a melhoria da tecnologia envolvida neste tipo de medição. Estas melhorias possibilitaram medidores mais acurados e versáteis, capazes de lidar com diferentes tipos de fluido, regimes de escoamento e valores de rugosidade na parede da tubulação. Concluem que, em 2005, os medidores ultra-sônicos mais acurados disponíveis no mercado possuíam leituras de incertezas em laboratório 0,5% (ou melhores) em relação à faixa de outros medidores de vazão, embora, muitas vezes, fazendo-se necessário a disponibilidade de um

trecho reto suficientemente grande ou, até mesmo, o uso de condicionadores de fluxo. Os autores ainda chamam atenção para o fato de que alguns medidores ultra-sônicos (dependendo da técnica de medição usada) são capazes de mensurar outros parâmetros do escoamento e do fluido, como peso molecular, temperatura, massa específica e viscosidade, usando o valor da velocidade de propagação do som no fluido medido.

Raišutis [8] investigou o perfil de velocidades em medidores invasivos, isto é, os que, por ventura, possuem parte dos transdutores perturbando o escoamento, por ultrapassarem a parede interna da tubulação. Comprovou que tanto o transdutor quanto a própria forma da cavidade na qual este está inserido formam vórtices que interferem no perfil de velocidades, portanto na medição e concluiu que os resultados obtidos são importantes para o cálculo do fator de correção do perfil de velocidades, que depende da velocidade do escoamento e ainda do arranjo do medidor na seção de medição.

Calogirou, Boekhoven e Henkes [9] exploraram o efeito da rugosidade da tubulação na medição por ultra-som. Os perfis de velocidade e o próprio funcionamento do medidor ultra-sônico foram modelados e validados com comparações experimentais. Seus principais resultados mostram que um aumento na rugosidade da parede interna da tubulação causa um aumento na vazão lida pelo medidor ultra-sônico e que este aumento pode ser ainda mais acentuado com o aumento do número de Reynolds e com a diminuição do diâmetro da tubulação. Concluíram também que a posição do caminho acústico é fator dominante na sensibilidade à variação do perfil de velocidades.

Yeh e Mattingly [10] compararam numericamente o desempenho dos medidores ultra-sônicos em escoamentos com condições ideais e com perturbações. Os autores notaram que o desempenho destes medidores em condições não idéias de escoamento é função de alguns parâmetros de instalação, localização e orientação dos mesmos, somados ao tipo da própria perturbação e confirmaram que medidores de múltiplos caminhos acústicos são mais acurados e insensíveis às condições não ideais.

Yeh, Espina e Osella [11] propõem um medidor ultra-sônico inteligente, capaz de facilitar a calibração e melhorar os resultados de vazão. O princípio deste sistema é determinar detalhadamente características e propriedades do escoamento, comparar com um banco de dados com modelos adquiridos em simulações e experimentações, classificar o campo de velocidades e o acidente de linha que causou tal efeito e, por fim, ajustar parâmetros com o intuito de obter resultados mais acurados.

Lansing [12] afirma que mesmo a melhor tecnologia de medição de vazão não terá o resultado esperado se não tiver sido projetado e instalado corretamente ou ainda se não passar por manutenção apropriada. Aborda questões que influenciam a medição, tais como a velocidade do escoamento, a configuração de montagem da tubulação à montante e à jusante do medidor, a presença de válvulas de controle na tubulação, a temperatura do meio, a presença de impureza no fluido medido e a calibração do medidor. O autor comenta reações típicas dos medidores a tais tipos de influência e propõe maneiras de melhorar a confiabilidade da medição.

Sanderson e Yeung [13] traçam diretrizes concretas para a medição de vazão de líquidos usando ultra-som. Chamam atenção para as limitações destes equipamentos e para as condições de trabalho que trazem resultado confiável. Abordam os efeitos dos parâmetros mais importantes na medição e ainda comentam sobre suas correções em determinadas situações.

#### **1.4.2 Efeito de Acidentes de Linha na Medição**

A influência de acidentes de linha na medição de vazão é um fator de estudo para qualquer tipo de medidor. Estes acidentes causam modificações no perfil de velocidades que agregam alteração na medição de vazão, pois os medidores, com exceção do rotâmetro, independentemente do princípio de medição, são, uns mais, outro menos, sensíveis a isto. A importância deste estudo se dá pelo fato de conhecer os efeitos que os acidentes causam, analisar a alteração que isto traz à medição e tentar propor correções para estes distúrbios. Nota-se que é comum na literatura a abordagem de duas configurações: uma curva de 90° e duas curvas de 90° em planos distintos. Estas duas instalações são comuns na indústria e recebem o maior número de estudo e proposta de correções de medição. Esta segunda configuração causa um efeito redemoinho (*swirl*) no escoamento que é motivo de complicações para a mediação, em função de este efeito se propagar até trechos razoavelmente longos de tubulação após o acidente.

Mattingly e Yeh [14], nos anos 80, foram os primeiros a investigar especificamente os efeitos de acidentes de linha na medição de vazão. Estes estudos iniciais ocorreram em função de um projeto de patrocínio à pesquisa proposto pelo *National Bureau of Standards* – NBS (que depois passou a ser conhecido como *National Institute of Standards and Technology* - NIST) em parceria com várias empresas e com o Departamento de Comércio dos Estados Unidos da América. Este programa de pesquisa visava melhorias tecnológicas nas indústrias americanas

e propunha reuniões e apresentações de relatórios para arquivamento de resultados. Em 1988, Mattingly e Yeh apresentam um relatório que contem análises de perfil de velocidades e flutuações turbulentas medidas usando a tecnologia de velocimetria a laser Doppler (*Laser Doppler Velocimeter – LDV*); de decaimento do efeito *swirl* ao longo do trecho pós-accidente; de medições de pressão; do fator de atrito no escoamento e outros parâmetros. Os principais resultados foram a observação do erro na medição em função dos diferentes arranjos da tubulação à montante do medidor e do efeito desses acidentes de linha em relação à queda de pressão no escoamento e ao trecho reto necessário para que o efeito *swirl* diminua.

Mattingly e Yeh [15], já em 1991, publicaram resultados interessantes oriundos da análise dos efeitos de curvas e condicionadores de fluxo nas vazões medidas por turbinas e placas de orifício. Notaram que as normas de instalação mostravam-se insuficientes em relação ao trecho reto sugerido para uma medição acurada. Outra conclusão importante foi em relação à reação dos medidores à inserção do condicionador de fluxo. Para algumas configurações, a presença do condicionador de fluxo gerou um erro ainda maior de medição em relação ao caso ideal.

Após estas publicações destes dois autores um dos primeiros artigos nesta área foi resultado do estudo de Branch [16], que identificou os efeitos de uma curva fechada (raio de curvatura pequeno) no coeficiente de descarga (razão entre a vazão real e a vazão teórica) de uma placa de orifício. A bancada de teste também possibilitou que ele investigasse a influência da localização das tomadas de pressões ao redor da placa e notasse que este fator também influenciava na medição, embora ainda não soubesse explicar a causa.

Holm, Stang e Delsing [17] estudaram numericamente a reação do fator de calibração em alguns acidentes de linha. Os resultados experimentais, analíticos e numéricos são comparados e discutidos para uma faixa de diversos números de Reynolds. Os autores comentam que o resultado numérico pode ajudar no desenvolvimento de medidores ultrassônicos capazes de se adaptar a condições diferentes de instalação e de corrigir os resultados obtidos. Afirmaram ainda que é necessário que haja mais pesquisa quanto aos modelos de turbulência usados para as simulações, em prol de previsões mais realistas e corretas.

Hilgenstock e Ernst [18] compararam experimentos e simulações numéricas e também constataram que simulações numéricas são uma ferramenta poderosa na verificação da influência dos acidentes de linha, bem como da correção da medição comprometida e, em função de sua rapidez, costumam ser mais eficazes que os experimentos. Apresentaram ainda

um estudo do erro na medição em função dos arranjos diferentes para os caminhos acústicos (configuração dos transdutores) e dos tipos mais usuais de efeito redemoinho (*swirl*) no escoamento. Também concluíram que o modelo de turbulência adotado na simulação numérica pode ser responsável por um resultado de alta confiabilidade.

Wendt, Mickan, Kramer e Dopheide [19] [20] [21] fazem um diagnóstico detalhado dos efeitos de acidentes de linhas motivados em achar maneiras eficientes de minimizar esses efeitos. Usando tecnologia de anemômetros do tipo laser Doppler (LDA, do inglês *laser Doppler anemometer*), são capazes de obter o perfil de velocidades tridimensional, em seus componentes axial e tangencial, à jusante de acidentes de linha, *a priori*, e testam, em seguida, alguns tipos de condicionadores de fluxo. Os testes baseiam-se na análise da distribuição tridimensional do perfil de velocidades (componente axial), do efeito *swirl* em função da magnitude do componente tangencial e, principalmente, do erro percentual na leitura do medidor de vazão (neste trabalho foi usado um medidor do tipo turbina) quando colocado à jusante dos acidentes de linha (com ou sem condicionador de fluxo) em relação ao caso no qual o trecho reto foi suficiente para deixar o escoamento tornar-se completamente desenvolvido.

Fletcher, Nicholson e Smith [22] testaram medidores de inserção em diferentes condições de escoamento, provocando perturbações ao fluxo e coletando informações via tecnologia de LDV. Notaram que, para essa técnica de medição, os resultados são aceitáveis, comparados aos de situações ideais.

Um dos estudos recentes relacionados aos acidentes de linha foi o de Ruppel e Peters [23], no qual propõem um sistema de medição de vazão capaz de levar em consideração os erros de medição oriundos de instalações com acidentes. Os autores fazem um levantamento do erro para escoamentos em vários números de Reynolds e comparam dados experimentais e numéricos, variando configurações dos medidores e distância da seção de medição após o acidente de linha e concluem que o método adotado para a análise, que se trata de tomadas de pressão na parede da tubulação, capazes de indicar a direção do escoamento perto da parede, pode ser efetivo para a redução do erro na medição.

#### **1.4.3 O Uso de Condicionadores de Fluxo**

Os condicionadores de fluxo são ferramentas comumente usadas para diminuir o efeito de acidentes de linha, uma vez que possibilitam o completo desenvolvimento do escoamento

com um trecho reto menor. A Figura 1.2 apresenta um exemplo de condicionador de fluxo instalado em uma tubulação de acrílico.



**Figura 1.2: Condicionador de fluxo instalado em tubulação. [24]**

A eficiência destes condicionadores, em se tratando da incerteza na medição e do trecho reto necessário para se obter de fato escoamento completamente desenvolvido, é testada por pesquisadores. Em algumas ocasiões, o uso desta alternativa é inviável. É o que ocorre, por exemplo, com a tubulação de gás de *flare* em plataformas de petróleo e gás. O escoamento deste gás tem a característica de ser bem inconstante e apresentar picos de vazão bem alta, que impossibilitam quaisquer intrusões, pois a energia do escoamento chega a ser grande o suficiente para deformar o condicionador e comprometer a tubulação.

Na maioria das demais aplicações industriais, porém, o condicionador de fluxo mostra-se como uma opção eficiente na amenização dos efeitos de acidentes de linha, desde que utilizado de maneira correta. Há vários tipos de condicionadores de fluxo e deve-se levar em consideração o local onde serão instalados o condicionador e o medidor de vazão à jusante; e são exatamente estes os fatores mais estudados nos últimos anos.

Schlüter e Merzkirch [25] usaram a tecnologia de velocimetria de imagem de partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*) para analisar alguns tipos de condicionadores e o trecho reto necessário para o completo desenvolvimento do escoamento após a passagem por estes. Concluíram que a tecnologia de PIV é rápida, porém seus resultados não conseguem agregar tanta informação sobre o escoamento como quando se usa o LDA, por exemplo.

Ainda notaram o destaque de um modelo de condicionador de fluxo proposto por um pesquisador e que os modelos normatizados não apresentaram resultados tão bons e mereciam modificações.

O avanço das ferramentas numéricas possibilitou que Frattolillo e Massarotti [26] apresentassem um estudo comparativo entre alguns modelos de condicionadores de fluxo via dinâmica dos fluidos computacional (DFC). A comparação é feita pela análise de alguns parâmetros de controle propostos pelos autores que levam em consideração, por exemplo, o efeito *swirl* e a assimetria do perfil de velocidades. Perceberam que, de fato, cada tipo de condicionador de fluxo tem desempenhos distintos em relação aos parâmetros adotados, ou seja, um é proporciona melhor simetria no perfil ao passo que não tira o efeito *swirl* por completo e outro que diminua razoavelmente o efeito de giro (*swirl*) não é capaz de melhorar a inclinação causada por curvas.

Xiong, Kalkühler e Merzkirch [27] mostraram o estudo com o mesmo escopo dos trabalhos anteriormente citados, porém, usaram tecnologia de PIV e de anemometria a fio quente. Os parâmetros de estudo foram, além do perfil de velocidades, as flutuações turbulentas e o valor dos tensores de Reynolds em posições à jusante dos condicionadores de fluxo. Os autores confirmaram que os condicionadores do tipo “prato perfurado” são mais eficientes que os tubos propostos por norma. Além disso, notaram que, muito embora com aproximadamente 25 diâmetros de trecho reto pós-condicionador é possível obter escoamento completamente desenvolvido, nem mesmo 50 diâmetros à jusante consegue-se estado de equilíbrio turbulento (representado, por exemplo, pelos tensores de Reynolds). Alertaram que isso deve ser levado em consideração quando este estudo é feito numericamente e não mostraram a influência na leitura de medidores de vazão, mas já sugerem um posicionamento mais adequado para estes.

## 1.5 Estruturação do Trabalho

Além deste capítulo, no qual são mostrados um breve histórico sobre os principais nomes da ciência envolvidos na mediação de vazão, demonstradas algumas condições para aplicação dos medidores de vazão, apresentados a motivação e os objetivos que nortearam o trabalho e a revisão bibliográfica, este trabalho tem mais quatro capítulos organizados conforme a descrição a seguir.

O Capítulo 2 mostra princípios básicos de funcionamento do medidor ultra-sônico e as características operacionais que são consequência deste modo de funcionamento. Serve de base para entender o porquê da análise do perfil de velocidades na seção de medição.

O Capítulo 3 envolve a questão do método numérico e da modelagem matemática decorrentes do uso do *software* para as simulações. Além disso, é apresentado neste item como se dá o desenvolvimento de uma simulação neste aplicativo e, por fim, a metodologia adotada para fazer as simulações e analisar a qualidade dos resultados gerados.

O Capítulo 4 apresenta a validação do modelo adotado, comparando com resultados obtidos por demais cientistas e os principais resultados com suas devidas colocações referentes a estes.

O Capítulo 5 encerra o trabalho apresentando as conclusões obtidas com este estudo e as recomendações para trabalhos futuros que foram notadas como interessantes durante o desenvolvimento deste trabalho.

## 2 Noções Básicas Sobre Medidores de Vazão Ultra-Sônicos por Tempo de Trânsito

### 2.1 Ondas Ultra-Sônicas

Vibrações mecânicas que têm freqüência maior que a audível para os seres humanos propagadas em um meio qualquer, são consideradas ondas ultra-sônicas. Estas ondas têm freqüência entre 20,0 kHz e 1,0 GHz e possuem características que possibilitam aplicações interessantes. Por possuírem alta freqüência, ondas ultra-sônicas têm pequeno comprimento, logo, sua propagação pode ocorrer em meios sólidos e fluidos com facilidade, devido ao fato de o comprimento de onda estar associado ao tamanho característico dos meios nos quais a onda se propaga. Outro fato importante oriundo desta característica é a possibilidade da previsão do comportamento das ondas ultra-sônicas, quando sujeitas à transição entre meios distintos, fazendo uso das leis de reflexão e refração da ótica, aplicáveis, exatamente, em função da semelhança de comportamento das ondas ultra-sônicas em relação às ondas óticas.

As aplicações desta ferramenta se dão em vários campos da tecnologia, como, por exemplo, em medição de fluxo sanguíneo, medição de nível, medição de massa específica, medição de diâmetros internos, ensaios não destrutivos, diatermia (para tratamentos medicinais e fisioterápicos), ultrassonografia (geralmente usados pela medicina), e medição de vazão. [28]

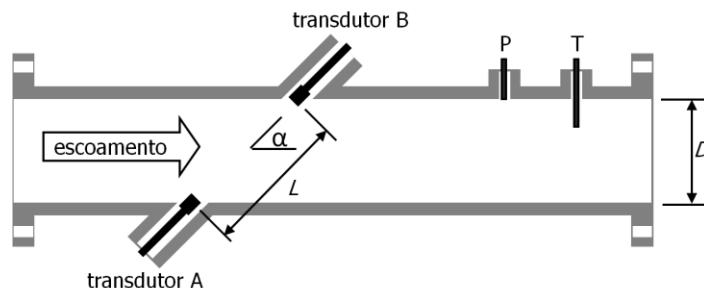
Uma aplicação mais recente foi proposta e testada por Obayashi *et al.* [29]. Este estudo consistiu em medir os vetores do perfil de velocidades usando transdutores ultra-sônicos em posições específicas e caminhos acústicos focados em alguns pontos. O sistema proposto, apesar de necessitar de aperfeiçoamentos, foi capaz de medir com certa exatidão a formação de vórtices atrás de um cilindro sobre o qual incidia um escoamento controlado.

### 2.2 Medidores de Vazão Ultra-Sônicos por Tempo de Trânsito

Os medidores de vazão por ultra-som foram desenvolvidos na segunda metade do século XX, mas a comercialização destes instrumentos só se concretizou na década de 80. Uma grande vantagem destes medidores é permitir a leitura de vazão de forma não-intrusiva. As ondas ultra-sônicas são produzidas por quartzo piezelétrico localizado nos transdutores que ficam alojados em um aparato acoplado à parede externa da tubulação. Estes quartzos produzem ondas na faixa de 200 kHz a 4 MHz.

Os medidores de vazão por ultra-som podem apresentar diversas configurações de instalação, sendo que, cada uma delas implica em diferentes princípios e parâmetros de medição. As

técnicas de medição de vazão por ultra-som mais difundidas na indústria são a que usa o efeito Doppler e a que usa o tempo de trânsito. A Figura 2.1 mostra a configuração usada como referência para os estudos apresentados – a baseada no tempo de trânsito. Os transdutores A e B têm uma inclinação ( $\alpha$ ) de 45 graus em relação à direção principal do escoamento. A função dos transdutores é emitir e receber pulsos ultra-sônicos através do fluido que escoa entre eles. O transdutor A transmite um pulso para o transdutor B e o tempo que este pulso leva para ser recebido é computado e chamado de tempo de trânsito de A para B ( $t_{AB}$ ). A linha que representaria a passagem do pulso entre os transdutores é chamada de caminho acústico. Assim que o primeiro pulso é computado, o transdutor B emite um pulso para o transdutor A e o procedimento se repete, agora computando o tempo de trânsito de B para A ( $t_{BA}$ ). Ao se comparar os tempos de trânsito, nota-se que  $t_{AB}$  é maior que  $t_{BA}$ . Isto ocorre, pois o pulso que sai do transdutor A para o transdutor B viaja a favor do escoamento, e o pulso que vai do transdutor B para o transdutor A viaja contra o escoamento.



**Figura 2.1: Desenho esquemático de um medidor de vazão ultra-sônico por tempo de trânsito com indicação de alguns parâmetros de instalação e medição.(adaptada de [30])**

É possível determinar as velocidades de trânsito em cada trecho, pois a distância ( $L$ ) entre os transdutores A e B é conhecida. As velocidades calculadas serão iguais à velocidade do som no meio (fluido) acrescida ou decrescida do componente da velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico ( $V_{CA}$ ) na direção de trânsito do pulso:

$$v_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c + V_{CA} \cdot \cos\alpha \quad (2.1)$$

$$v_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c - V_{CA} \cdot \cos\alpha \quad (2.2)$$

Conhecendo o diâmetro da tubulação ( $D$ ), é possível resolver este sistema para  $c$  e  $V_{CA}$  e obtendo-se:

$$c = \frac{D}{2 \sin \alpha} \left( \frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \quad (2.3)$$

$$V_{CA} = \frac{D}{\sin 2\alpha} \left( \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \quad (2.4)$$

O objetivo principal é calcular a vazão volumétrica ( $\dot{Q}$ ) do escoamento fazendo uso da equação (2.5):

$$\dot{Q} = \bar{V} \times A \quad (2.5)$$

Para isso, é necessário saber a área da seção transversal da tubulação ( $A$ ) e a velocidade média nesta mesma seção ( $\bar{V}$ ). A velocidade  $V_{CA}$  calculada pelo medidor ultra-sônico é uma velocidade média ao longo do caminho acústico e não da seção transversal. Considerando que o perfil de velocidades é constante ao longo do comprimento longitudinal da tubulação entre os dois transdutores, é possível considerar que a velocidade média ao longo do caminho acústico  $V_{CA}$  é igual à velocidade média ao longo do diâmetro da tubulação, portanto:

$$V_{CA} = \frac{1}{D} \int_D v(r) dr \quad (2.6)$$

Donde:

$v(r)$  : velocidade local na coordenada radial  $r$ .

Existe, porém, um fator de correção ( $k$ ) que relaciona  $V_{CA}$  e  $\bar{V}$ , de modo que, uma vez que o medidor calcula a velocidade média sobre o caminho acústico ( $V_{CA}$ ), é possível calcular a velocidade média na seção transversal ( $\bar{V}$ ) de medição usando a seguinte relação:

$$\bar{V} = k \cdot V_{CA} \quad (2.7)$$

Este fator de correção depende do perfil de velocidades na seção de medição e varia, portanto, com a natureza do escoamento. Para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos em tubos lisos, o valor de  $k$  é relacionado com expressões que prevêem o perfil de velocidades e a velocidade média deste perfil associada a este perfil. Um dos modelos adotados como referência para este cálculo é o proposto por Hinze em AGA Report N° 9 [6] pela seguinte expressão:

$$v(r) = v_0 \left(1 - \left|\frac{r}{R}\right|\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.8)$$

Donde:

$v_0$  : velocidade máxima do escoamento;

$r$  : coordenada radial;

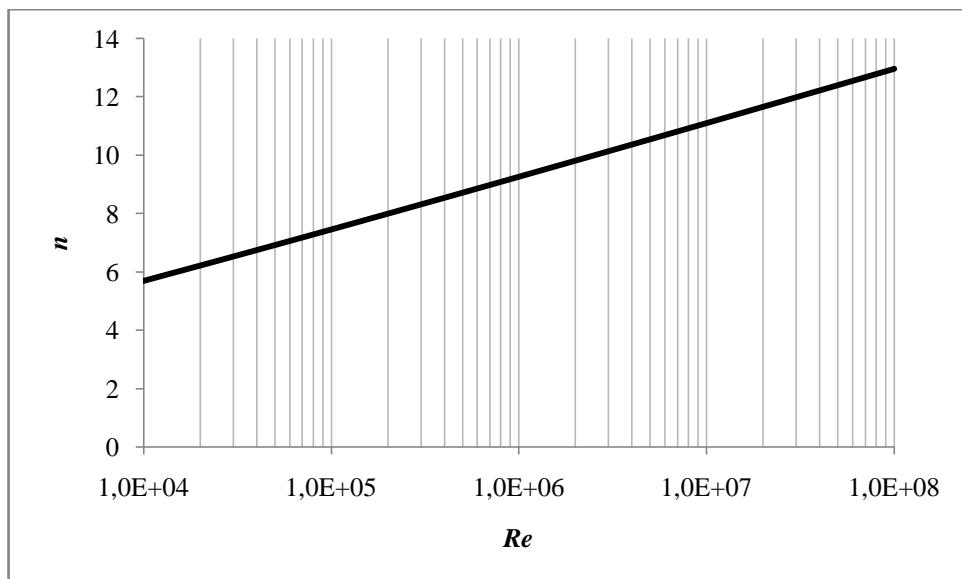
$R$  : raio da tubulação;

$n$  : expoente dependente da natureza do escoamento.

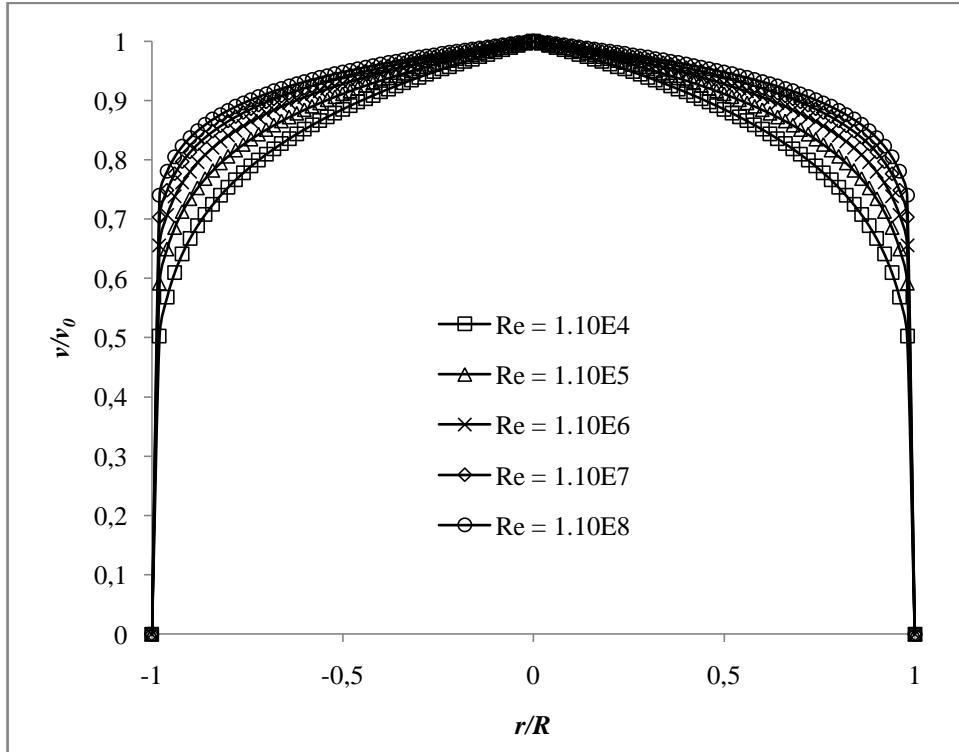
O valor de  $n$  é, comumente, calculado em função do número de Reynolds ( $Re$ ) pela seguinte equação implícita, que pode ser, portanto, resolvida iterativamente:

$$n = 2 \log\left(\frac{Re}{n}\right) - 0,8 \quad (2.9)$$

A Figura 2.2 mostra a relação entre  $n$  e  $Re$  para o intervalo de Reynolds de  $10^4$  a  $10^7$ . Uma vez que se tem os valores de  $n$ , é notável a possibilidade de se apresentar o perfil de velocidades adimensional em função do número de Reynolds, usando as equações (2.8) e (2.9), conforme mostrado na Figura 2.3.



**Figura 2.2:** Exponente  $n$  em função do número de Reynolds ( $Re$ ).



**Figura 2.3: Perfis de Hinze em função do número de Reynolds ( $Re$ ).**

A velocidade média na seção transversal calculada para um escoamento completamente desenvolvido conforme o perfil de Hinze é dada pela expressão:

$$\bar{V} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \cdot v_0 \quad (2.10)$$

Percebe-se, então, que, para escoamentos totalmente desenvolvidos, é possível calcular o fator  $k$  que corrige o valor da velocidade média. Resolvendo a equação (2.6) usando o perfil de velocidades da equação (2.8), tem-se:

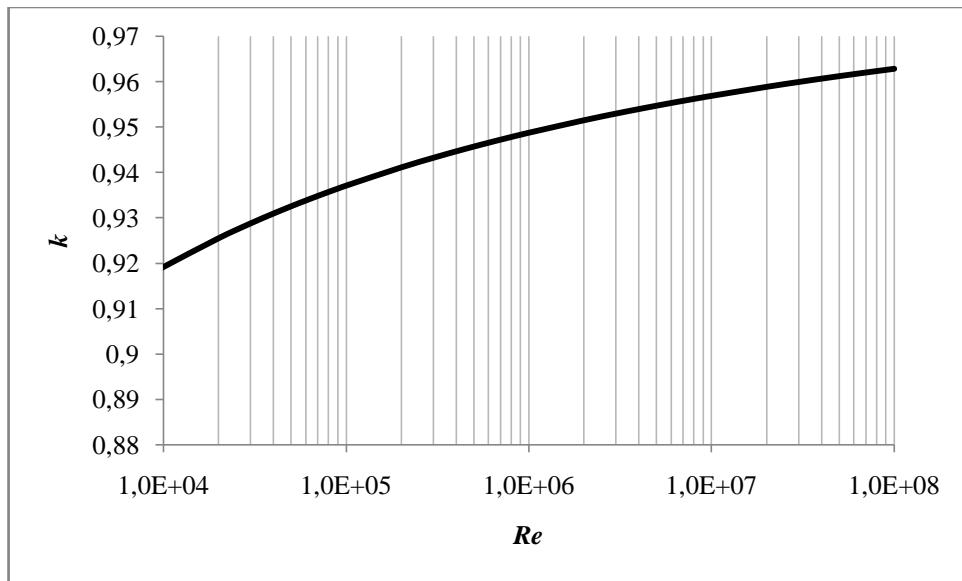
$$V_{CA} = \frac{n}{(n+1)} \cdot v_0 \quad (2.11)$$

Daí obtém-se  $k$ :

$$k = \frac{\bar{V}}{V_{CA}} = \frac{\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \cdot v_0}{\frac{n}{(n+1)} \cdot v_0} = \frac{2n}{(2n+1)}$$

(2.12)

Também é possível analisar a variação de  $k$  com o número de Reynolds para escoamentos completamente desenvolvidos, como mostra a Figura 2.4.



**Figura 2.4: Fator de correção  $k$  em função do número de Reynolds ( $Re$ ).**

Quando o perfil de velocidade está perturbado, em função de acidentes de linha, por exemplo, o valor de  $k$  passa a embutir um erro em função desta perturbação. Este erro é devido ao fato de que o perfil de velocidades não tem a forma de um escoamento completamente desenvolvido e as velocidades médias calculadas perdem a coerência com o escoamento. Esta alteração compromete a qualidade da medição e é motivo de pesquisa nos últimos anos. A proposta destes estudos é que se possa prever o comportamento do escoamento – portanto o perfil de velocidades – na seção de medição de vazão com a ajuda de ferramentas de DFC para vários acidentes de linha típicos e calcular fatores de correção específicos para cada instalação.

### 3 Princípios da Modelagem Matemática e do Método Numérico

As simulações numéricas tornaram-se ferramentas poderosas na solução de problemas de engenharia moderna. Este poder é, basicamente, consequência da melhoria significativa de facilidades computacionais em termos de *hardware*.

Esta seção tem por objetivo a apresentação das equações que governam o escoamento, as condições de contorno que permitem a solução e o método numérico de solução dessas equações.

#### 3.1 Modelagem Matemática

A modelagem matemática consiste na definição das equações e relações que governam o problema simulado. São apresentadas, a seguir, as principais equações que regem os fenômenos envolvidos no escoamento estudado neste trabalho.

##### 3.1.1 Equações Governantes

As equações que representam o comportamento do escoamento de um fluido não newtoniano, com propriedades constantes são apresentadas a seguir.

*Equação de Conservação da Massa*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Donde:

$\rho$  : massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>];

$U_i$  : componente da velocidade instantânea na direção  $i$  [m/s];

$x_i$  : coordenada cartesiana  $i$ .

*Equação de Conservação da Quantidade de Movimento ou Equação de Cauchy*

$$\rho \left[ \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.2)$$

Donde:

$U_j$  : componente da velocidade instantânea na direção  $j$  [m/s];

$\tau_{ij}$  : tensor das tensões [N/m<sup>2</sup>];

$g_i$  : componente da aceleração da gravidade na direção  $i$  [m/s<sup>2</sup>].

O tensor de tensões é dado pela seguinte expressão:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \left( p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \quad (3.3)$$

Donde:

$\mu$  : viscosidade dinâmica [kg/m/s];

$p$  : pressão estática do fluido [N/m<sup>2</sup>];

$\delta_{ij}$  : delta de Kronecker (matriz identidade).

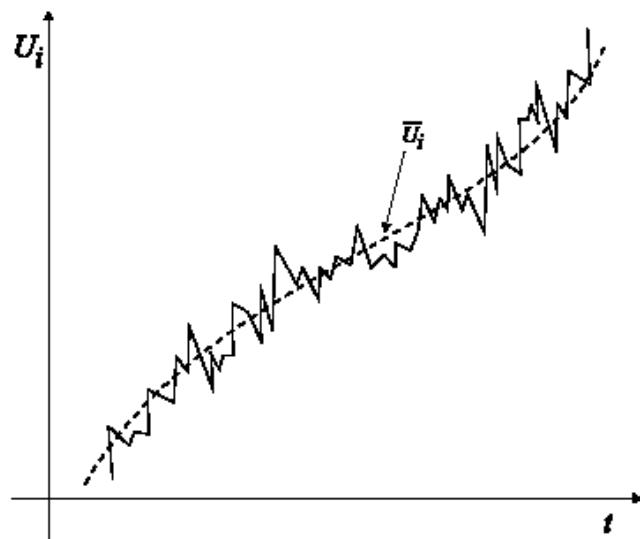
### 3.1.2 Modelos Estatísticos de Turbulência

Turbulência consiste em flutuações do escoamento que ocorre no espaço e no tempo. É considerada como processo complexo, pois é transitória, tridimensional e ocorre em várias escalas. Ocorre em escoamentos com altos números de Reynolds, isto é, em escoamentos nos quais as forças de inércia preponderam em relação às forças viscosas.

As equações de conservação de massa e quantidade de movimento são, *a priori*, capazes de descrever qualquer escoamento de fluido newtoniano sem a necessidade de informação adicional. A solução integral e fiel destas equações é conhecida como Simulação Numérica Direta (DNS, do inglês *Direct Numerical Simulation*). Em escoamentos em altos números de Reynolds os fenômenos turbulentos acontecem em um range amplo de escalas de tempo e

comprimento e envolvem escalas tão pequenas que podem não ser capturadas mesmo com malhas extremamente refinadas. A solução via DNS destes escoamentos requer robustez computacional indisponível no atual cenário tecnológico, ficando restrita a escoamentos simples e com baixo número de Reynolds. Para viabilizar previsões razoáveis dos fenômenos de turbulência sem fazer uso de malhas extremamente refinadas e simulações diretas, foram estudados métodos que fazem uso de modelos de turbulência.

Os modelos de turbulência ditos estatísticos são baseados na proposta de Reynolds, em expressar os valores de uma variável com flutuações turbulentas como um valor médio acrescido de uma flutuação. A Figura 3.1 exemplifica a proposta de Reynolds com a velocidade.



**Figura 3.1: Representação esquemática da flutuação da velocidade em escoamento turbulento. [31]**

Escreve-se, então:

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i \quad (3.4)$$

Uma vez decompostas as variáveis envolvidas nas equações de conservação da quantidade de movimento em um valor médio e uma flutuação, obtém-se o grupo de equações chamado de RANS (do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

$$\rho \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{Tij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.5)$$

A equação (3.5) ganha, em relação à equação de Cauchy, um termo adicional oriundo de turbulência. Este termo é expresso conforme equação (3.6):

$$\tau_{Tij} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_3 u'_1} & \overline{u'_3 u'_2} & \overline{u'_3 u'_3} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$\tau_{Tij}$  é chamado de *tensor de tensões de Reynolds*. A determinação direta dos valores de cada termo (tensões de Reynolds) é difícil, o que faz com que estes termos passem a ser considerados variáveis para a solução do problema. Para fechar o sistema de equações que resolve o problema, é necessário que se conheça os valores destas tensões. Assim, as diferentes equações que modelam as tensões de Reynolds por intermédio de parâmetros conhecidos consistem nos modelos de turbulência. Estes modelos são consideravelmente utilizados na engenharia, em função da diminuição do esforço computacional envolvido na resolução.

### 3.1.3 Hipótese de Boussinesq

Boussinesq sugeriu em 1887 que o tensor das tensões de Reynolds fosse escrito como o produto de uma viscosidade turbulenta ( $\mu_T$ ) com a taxa de deformação.

$$\tau_{Tij} = \mu_T \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

A viscosidade turbulenta é função da intensidade de turbulência do escoamento e as diferentes equações para expressá-la também compreendem os modelos de turbulência. Uma vez definida a viscosidade turbulenta, a viscosidade efetiva é dada pela seguinte expressão:

$$\mu_{ef} = \mu_T + \mu \quad (3.8)$$

### 3.1.4 Modelo k- $\varepsilon$

O modelo k- $\varepsilon$  é o mais difundido entre os códigos de DFC, basicamente por proporcionar resultados satisfatórios para muitos casos com baixo tempo computacional. Este modelo propõe a seguinte equação para  $\mu_T$ :

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.9)$$

Donde:

$C_\mu$  : constante do modelo;

$k$  : energia cinética turbulenta [ $m^2/s^2$ ];

$\varepsilon$  : dissipação da energia cinética turbulenta [ $m^2/s^3$ ];

Os valores de  $k$  e de  $\varepsilon$  são obtidos por meio da resolução das seguintes equações de transporte diferenciais:

$$\rho \left[ \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{U}_i k)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.10)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{U}_i \varepsilon)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.11)$$

$P_k$  representa a produção de energia cinética turbulenta por forças viscosas e é dado pela seguinte expressão, para escoamentos incompressíveis:

$$P_k = \mu_T \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.12)$$

O valor das constantes  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  é apresentado na Tabela 3.1:

**Tabela 3.1: Valores das constantes do Modelo k- $\varepsilon$ .**

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0,09	1,0	1,3	1,44	1,92

A equação de conservação da quantidade de movimento governante considerando o modelo k- $\varepsilon$  de turbulência passa a ser a seguinte:

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \bar{U}_i)}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{ef} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.13)$$

### 3.1.5 Modelo RNG k- $\varepsilon$

O modelo RNG k- $\varepsilon$  é baseado na análise do grupo de renormalização (*renormalization group*, daí, RNG) em relação às equações de Navier-Stokes (Equações da Conservação da Quantidade de Movimento). As equações de transporte para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e para a dissipação da energia cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ) são as mesmas do modelo k- $\varepsilon$ , porém, os valores das constantes das equações são diferentes.

$$\rho \left[ \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i k)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{kRNG}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.14)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i \varepsilon)}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (3.15)$$

Donde:

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1,42 - f_\eta \quad (3.16)$$

$$f_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38}\right)}{(1 + \beta_{RNG} \eta^3)}$$

(3.17)

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}}$$

(3.18)

O valor das novas constantes envolvidas no equacionamento é mostrado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2: Valores das constantes do Modelo RNG k- $\varepsilon$ .**

$\sigma_{kRNG}$	$\sigma_{\varepsilon RNG}$	$C_{\varepsilon 1 RNG}$	$C_{\varepsilon 2 RNG}$	$\beta_{RNG}$	$C_{\mu RNG}$
0,7179	0,7179	1,42- $f_\eta$	1,68	0,012	0,085

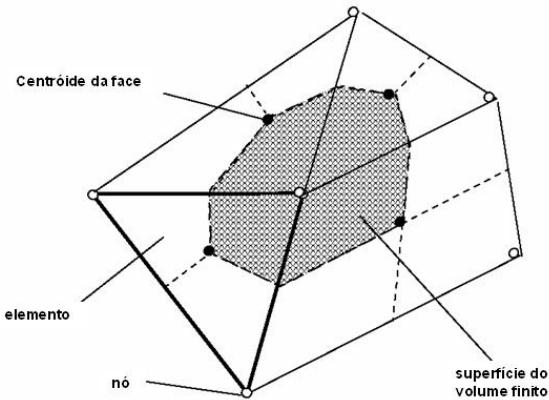
Em geral, estas modificações fazem com que o modelo RNG k- $\varepsilon$  proporcione resultados razoavelmente melhores que os do modelo k- $\varepsilon$ . Existem vários outros modelos de turbulência, porém, neste trabalho, somente estes dois modelos foram testados.

### 3.2 Modelagem Numérica

Soluções analíticas das equações de Navier-Stokes são restritas a escoamentos simples em condições ideais. A modelagem numérica visa à substituição destas equações por aproximações algébricas, que, por sua vez, são resolvidas por meio de um método numérico. Estas aproximações permitem soluções razoáveis de escoamentos reais e mais complexos.

#### 3.2.1 Discretização das Equações Governantes

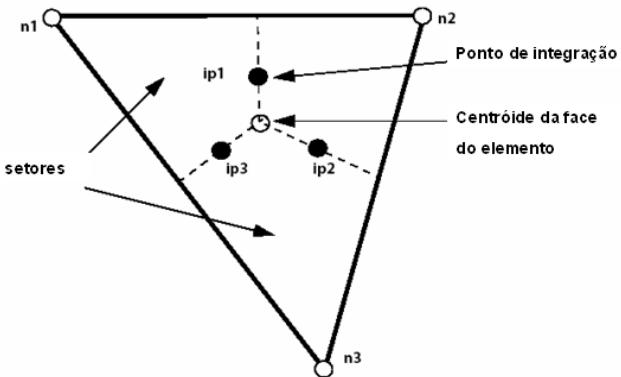
Existem vários técnicas de abordagem para a solução de casos numéricos. O método dos volumes finitos é um dos mais utilizados para o resultado de problemas de DFC. Este método visa a integração das equações diferenciais que governam o problema em torno de volumes finitos ou volume de controles. Estes volumes de controle são gerados a partir da malha (ver seção 3.3.2), que tem exatamente o papel de criar elementos discretos, os quais podem ter forma tetraédrica, piramidal, hexaédrica ou prismática. A Figura 3.2 mostra a vista bidimensional de um volume de controle típico, destacado pela sombra.



**Figura 3.2: Superfície de um volume de controle. [31]**

Cada vértice de um elemento é chamado de nó. Os nós são envolvidos por um arranjo de superfícies que moldam o volume finito. Todas as soluções das variáveis e propriedades dos fluidos são armazenadas nos nós para o processo de solução. É importante ressaltar que a quantidade de volumes de controle usada para solucionar o caso equivale à quantidade de nós, uma vez que em torno do cada nó é gerado um volume de controle.

As equações governantes são, então, integradas em torno do volume de controle para formar equações relacionadas a cada nó. A partir deste ponto, o *ANSYS CFX* versão 11.0 [32], *software* utilizado neste trabalho desenvolve uma metodologia particular em relação à discretização e à solução das equações. O Teorema de Divergência de Gauss é aplicado nestas equações possibilitando a conversão de algumas integrais de volume em integrais de superfície, de tal modo que as integrais de volume remanescentes representam termos de fonte ou acumulação e as integrais de superfície correspondem ao somatório dos fluxos sobre as superfícies que envolvem o volume de controle. Feito isso, cada termo é convertido para uma forma discreta, para que se possa solucionar o problema por meio de equações algébricas linearizadas. Para tanto, os termos de volume são discretizados pela aproximação dos valores específicos em cada setor e depois pela integração destes valores em torno de todos os setores que contribuem para um volume de controle. Os termos de superfície (que representam os fluxos) são discretizados por meio da aproximação dos fluxos nos pontos de integração, que estão localizados no centro de cada segmento formado entre o centróide da superfície de um elemento e suas arestas, conforme ilustrado na Figura 3.3. Por fim, os fluxos são integrados ao longo dos segmentos que contribuem para o volume de controle.



**Figura 3.3: Face de um elemento isolado de uma malha. [31]**

### 3.2.2 Solução das Equações Discretas

Conforme comentado na seção anterior, o que resulta da aplicação do método dos volumes finitos para problemas de DFC são equações de conservação em forma de um sistema de equações lineares, oriundas do balanço em cada nó (volume de controle), que podem ser escritas na seguinte forma:

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \phi_i^{nb} = b_i \quad (3.19)$$

Donde:

$\phi$  : solução;

$b$  : valor do lado direito;

$a$  : coeficientes da equação;

$i$  : identifica o número do volume finito ou nó em questão;

$nb$  : (do inglês *neighbour*, que quer dizer vizinho) representa o valor no nó adjacente, que também inclui o coeficiente central multiplicando a solução na  $i$ -ésima posição.

O conjunto de sistemas lineares de todos os nós constitui o sistema de equação linear geral. Para equações escalares, tal como a da energia cinética turbulenta,  $a_i^{nb}$  e  $b_i$  são números. No caso das equações acopladas de velocidade e pressão, estes termos são matriz e vetor, respectivamente, que podem ser expressos como:

$$a_i^{nb} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{up} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} \end{bmatrix}_i^{nb} \quad (3.20)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{bmatrix}_i \quad (3.21)$$

e

$$\phi_i^{nb} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}_i^{nb} \quad (3.22)$$

Para a solução das equações que envolvem velocidade e pressão, há estratégias distintas de solução. Uma é segregada, na qual os valores de velocidades são calculados primeiro, usando uma pressão estimada, e depois é necessário que se resolva outra equação para a correção da pressão. O ANSYS CFX usa um sistema de equações acopladas para a solução destas equações de velocidade e pressão. Assim, estas são resolvidas como um sistema único, o que, geralmente, proporciona maior velocidade de convergência.

A cada iteração, o programa adota dois passos para a solução geral, a saber:

- A linearização das equações não-lineares e a inclusão dessas na matriz de solução geral;
- A solução das equações lineares usando o método *Algebraic Multigrid*.

O sistema linear das equações discretas descritas anteriormente pode ser representado em forma matricial generalizada, como a seguir.

$$[A][\phi] = [b] \quad (3.23)$$

Donde:

$[A]$  : matriz de coeficientes;

$[\phi]$  : vetor de soluções;

$[b]$  : vetor do lado direito da equação.

A equação

(3.23) é resolvida iterativamente a partir de uma solução aproximada,  $\phi^n$ , que por sua vez é melhorada por uma correção,  $\phi'$ , resultando em uma solução melhor,  $\phi^{n+1}$ , ou seja:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi' \quad (3.24)$$

$\phi'$ , por sua vez, é a solução da seguinte equação:

$$A\phi' = r^n \quad (3.25)$$

$r^n$  representa o resíduo, obtido da relação:

$$r^n = b - A\phi^n \quad (3.26)$$

A repetição iterativa deste algoritmo implica em uma solução para uma precisão desejada. Os valores dos resíduos de cada equação podem ser mostrados a cada equação. Estes valores servem de critério de convergência, de maneira que é possível programar o algoritmo para apresentar a solução depois atingir uma das duas situações:

- Quando o resíduo máximo (máximo entre os resíduos das equações discretas de cada nó ao longo do domínio) for menor que um valor estabelecido (um valor aceitável é de 5,0 E-04);
- Quando o resíduo RMS (do inglês *root mean square*), for menor que um valor estabelecido (tipicamente uma ordem de grandeza abaixo do resíduo máximo). O resíduo RMS é calculado por meio da raiz quadrada da soma dos quadrados de todos os resíduos ao longo do domínio. [32]

### 3.3 ANSYS CFX 11.0

O pacote *CFX* da *ANSYS* é uma ferramenta específica para problemas que envolvem DFC. O Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo possui licenças da versão não-comercial do programa, com as quais foram feitas as simulações aqui apresentadas. Esta seção mostra o procedimento usual para se obter resultados, abordando, de modo geral, as principais etapas da análise numérica usando o *CFX*.

#### 3.3.1 Desenho da Geometria

O desenho da geometria é a primeira etapa do desenvolvimento de resultados numéricos. O programa permite usar um *software* que vem no pacote *ANSYS CFX (DesignModeler)* ou importar figuras de outros *softwares* de CAD disponíveis. Esta etapa exige o conhecimento do chamado domínio. Por domínio, entende-se o espaço no qual o fluido irá escoar, seja ele interno ou externo. Para escoamentos externos em volta de uma geometria cúbica, por exemplo, faz-se necessário o desenvolvimento de um cubo representando uma parcela da atmosfera e, dentro deste domínio, o desenho da geometria cúbica analisada. Já no caso de escoamento interno, na maioria dos casos, o domínio coincide com a própria geometria do problema. Pode-se imaginar, por exemplo, a análise de transferência de calor em uma sala cúbica com um ar condicionado. Basta desenhar um cubo, representando a sala, e o domínio também está estabelecido. O domínio é, por fim, todo o volume de interesse em relação à análise. Não é possível obter resultados em pontos fora do domínio.

#### 3.3.2 Elaboração da Malha

Depois de definida a geometria do problema, dá-se início à elaboração da malha. A malha consiste na repartição virtual da geometria em volumes de controle nos quais, na etapa de processamento (seção 3.3.4), as equações serão aplicadas iterativamente até que se atinja o

critério de convergência aplicado no pré-processamento (seção 3.3.3). Esta etapa é decisiva na qualidade dos resultados e será tratada com maior detalhamento na seção 3.4.3.

### 3.3.3 Pré-processamento

A partir desta etapa que o *CFX* é, de fato, utilizado. O pré-processamento é feito por meio do *CFX-Pre* e consiste na etapa na qual se entra com as informações necessárias para que o processamento (seção 3.3.4) ocorra. Nesta etapa são definidos diversos parâmetros em relação

- ao fluido;
- às condições iniciais;
- às condições de contorno;
- aos fenômenos que ocorrem no escoamento;
- à solução e aos critérios de convergência.

Sobre o fluido é possível definir o estado, propriedades como viscosidade e massa específica, pressão e temperatura de referência, usando modelos de fluidos padrões do banco de dados de materiais do *CFX-Pre*. Caso nenhum destes materiais satisfaça as necessidades, é possível criar um material, por exemplo, usando um modelo de fluido não newtoniano. Ainda em relação ao fluido, pode-se alterar regimes de escoamento (transiente ou permanente, subsônico ou supersônico, compressível ou incompressível) e modelos de turbulência ( $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , LRR Reynolds Stress, dentre outros).

As condições iniciais e de contorno também são definidas nesta etapa. Essas condições fecham o sistema de equações e variáveis para o processamento, impondo condições de entrada, saída, simetria, comportamento como parede etc. Alguns exemplos destas condições seriam a velocidade na entrada do domínio, a rugosidade das paredes, a temperatura das faces presentes na geometria, as pressões relativas de saída etc.

Em relação aos fenômenos ocorrentes no escoamento, é possível, dentre outras coisas, escolher modelos para o cálculo de transferência de calor e de massa, provocar reações entre materiais ou combustão e incluir particulados e controlar emissões e dimensões.

Sobre a convergência, pode-se controlá-la e aplicar critérios. O controle pode dar-se por meio da imposição do número máximo de iterações, por exemplo; e o critério de convergência pode ser adotado como sendo o resíduo RMS nas equações governantes ou ainda o resíduo máximo

das mesmas tomadas em todo o domínio, conforme citado na seção 3.2.2. Para o critério de convergência, basta que se defina um valor o qual o resíduo deve ser menor.

### **3.3.4 Processamento**

Definidos o material, as condições e os fenômenos do escoamento, parte-se para a etapa de processamento. Nesta etapa, o *CFX-Solver* é acionado e define-se o arquivo que contém as definições; um possível arquivo de resultados para interpolação dos resultados iniciais; e ainda o tipo de processamento. O *CFX-Solver* permite também o processamento paralelo em máquinas com mais de um núcleo de processamento ou em rede.

### **3.3.5 Pós-processamento**

O pós-processamento é o último passo da e é feito com o *CFX-Post*. Este aplicativo permite o tratamento e a visualização dos resultados. Neste ambiente, é possível criar planos, linhas, superfícies sobre os quais propriedades e parâmetros podem ser apresentados de forma prática. Também é possível criar animações, possibilitando entendimento de comportamentos que são, muitas vezes, invisíveis, como o caminho de partículas sobre as linhas de corrente de um escoamento de gás. O *CFX-Post* possibilita exportação de dados, imagens e vídeos e ainda prepara relatórios de engenharia.

## **3.4 Metodologia de Simulação**

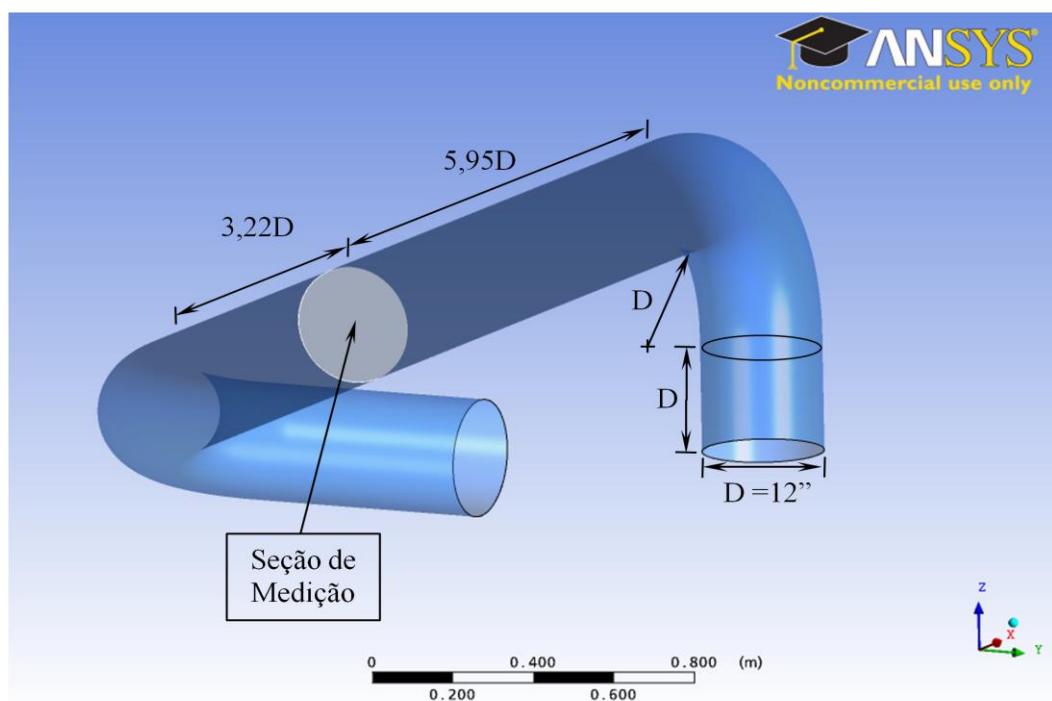
Esta seção tem como finalidade a apresentação da metodologia usada nas sucessivas simulações numéricas feitas neste trabalho. São apresentadas as principais características usadas neste trabalho relativas às etapas descritas na seção 3.3.

### **3.4.1 Definição da Geometria**

A geometria do caso aqui proposto é baseada no caso de uma tubulação de gás de queimador (*flare*) de uma plataforma off-shore em funcionamento na costa brasileira. Este caso apresenta o problema descrito na introdução referente à falta de espaço em plataformas de exploração de petróleo e gás natural. Sabe-se que a localização do medidor de vazão de gás de *flare* desta plataforma não está conforme a que seria adequada e este estudo visa à detecção do campo de escoamento na seção de medição de uma geometria semelhante a esta disposta na plataforma, uma vez que este problema é comum e ainda não tem solução prática, ou seja, a vazão ainda é medida com erro. Não foi possível o agendamento de uma visita técnica para levantamento dimensional detalhado, portanto, a definição da geometria é uma adaptação da condição desta plataforma que serviu de referência.

O arranjo consiste em uma tubulação de 12 polegadas de diâmetro com um trecho reto inicial de um diâmetro, isto é, com o comprimento equivalente de um diâmetro (12 polegadas). Esta prática de colocar dimensões da tubulação em função do diâmetro é comum na indústria e na literatura. Após este trecho inicial há uma curva de  $90^\circ$  sobre o eixo Y com raio de curvatura interno de um diâmetro. Após a primeira curva existe um trecho reto de 9,17 diâmetros (cerca de 2800 mm). Neste trecho que está situado o medidor de vazão ultra-sônico, sendo que, a seção de medição encontra-se a 5,95 diâmetros após o fim da curva. Ao fim deste trecho existe outra curva de  $90^\circ$ , porém agora sobre o eixo Z. Ao fim desta curva tem-se mais dois diâmetros de trecho reto, mas este trecho não faz parte da análise deste projeto.

É importante ressaltar que o sistema de coordenadas cartesianas de referência não se altera desde o desenho da geometria até o pós-processamento. Isso implica que até mesmo os vetores de velocidade visualizados no pós-processamento indicarão valores positivos ou negativos obedecendo ao sistema de coordenadas definido na etapa de desenho. Para este trabalho, a origem do sistema de coordenadas é o ponto central da seção transversal de entrada que foi desenhada sobre o plano XY. A Figura 3.4 mostra a geometria desenhada no *DesignModeler*.



**Figura 3.4: Geometria definida para a simulação.**

### 3.4.2 Os Parâmetros de Simulação e as Condições de Contorno

As condições de escoamento foram adotadas por meio de informações cedidas pela empresa detentora da plataforma citada na seção anterior e ainda de algumas hipóteses adotadas. O fluido utilizado no presente trabalho foi ar seco. As principais propriedades deste fluido provenientes do banco de dados do *CFX* são mostradas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3: Parâmetros do ar seco usados nas simulações.**

Massa molar [kg/kmol]	28,96
Viscosidade dinâmica [kg/m/s]	1,83E-05
Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	1,185
Pressão de referência [atm]	1
Temperatura de referência [°C]	25

Como condições na entrada do domínio, foram adotadas as seguintes condições.

**Tabela 3.4: Condições na entrada do domínio.**

Vazão mássica [kg/s]	0,9875
Intensidade de turbulência	Média (5%)
Regime	Subsônico

A vazão mássica é consequência da informação obtida de vazão típica de uma tubulação de gás de *flare* igual a 3.000 m<sup>3</sup>/h. A intensidade de turbulência é função das flutuações da velocidade na entrada do domínio. Como não há dados de campo disponíveis, foi adotada a sugestão padrão do programa (intensidade média) para estes casos.

Na saída do domínio as seguintes condições foram adotadas.

**Tabela 3.5: Condições na saída do domínio.**

Equilíbrio de massa e quantidade de energia	Pressão estática média
Pressão de referência [atm]	1
Regime	Subsônico

A opção de pressão estática média para o equilíbrio de massa e quantidade de movimento permite que o programa estabeleça a saída necessária de fluido do domínio para a condição de pressão na saída, neste caso, a tubulação de gás de *flare* é aberta para a chama na extremidade, então a pressão de referência estabelecida foi de 1 atm.

Para a parede do domínio, que neste caso coincide com a parede da tubulação, foram adotadas as seguintes condições.

**Tabela 3.6:** Condições na parede do domínio.

Influência no escoamento	Não-deslizamento
Rugosidade	Parede lisa

### 3.4.3 Sensibilidade e Qualidade de Malhas

O teste de sensibilidade de malhas visa investigar a dependência dos resultados em relação ao refinamento da malha. Esta análise se faz necessária em função de erros numéricos presentes na discretização das equações governantes do problema. Uma malha é tanto mais fina ou refinada quanto maior for o número de nós que a formam. A importância de se obter uma malha fina é, exatamente, tentar diminuir, até um grau satisfatório ou até um limite computacional, a influência destes erros numéricos na qualidade do resultado.

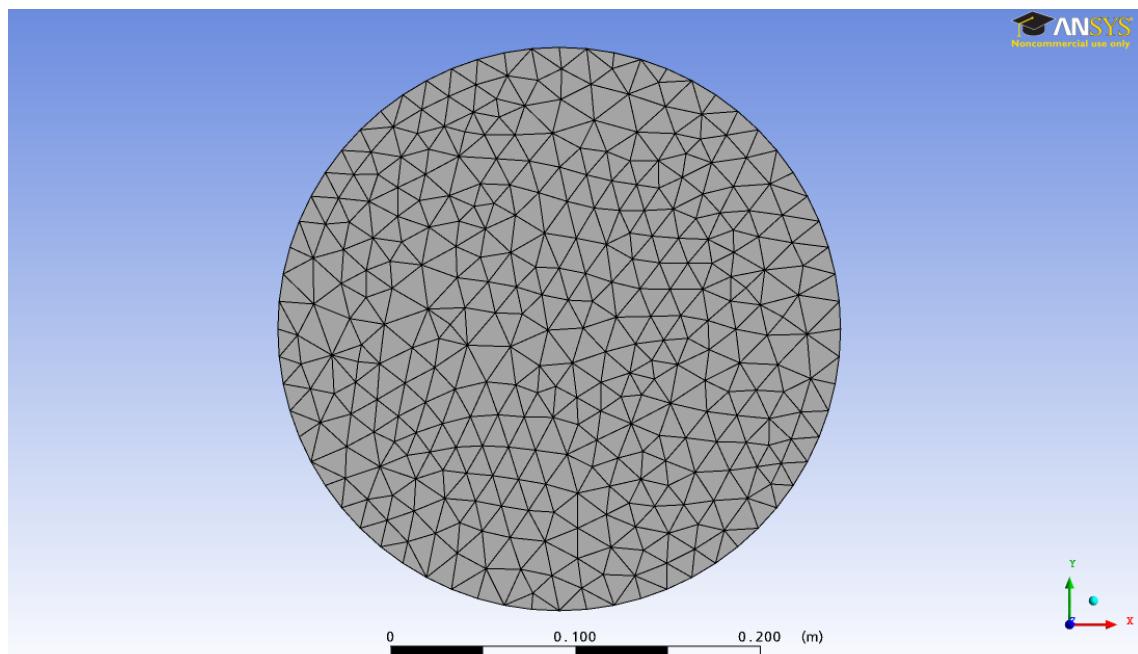
Este teste consiste em repetir o processamento do caso com malhas cada vez mais refinadas até que a variação dos parâmetros escolhidos como referência seja suficientemente pequena a ponto de garantir a confiabilidade dos resultados. Obviamente que esta confiabilidade é função do grau de exigência que o próprio caso requer, ou seja, é uma espécie de bom senso, baseado em experiência, em relação à qualidade e à precisão dos resultados obtidos. Vale lembrar que quanto mais refinada a malha, maior o gasto computacional envolvido no processamento, portanto o propósito principal é conseguir a melhor malha com o menor esforço computacional. Em simulações de casos tridimensionais, como a deste trabalho, a robustez numérica é razoavelmente maior que a dos casos bidimensionais e o controle dos erros numéricos faz-se essencial, porém não trivial.

As malhas deste problema foram geradas com o aplicativo *CFX-Mesh*, que é parte do pacote *ANSYS Workbench*. Este aplicativo permite o controle do tamanho e da forma dos elementos de volume de controle, bem como o refinamento de regiões específicas da geometria. Este refinamento localizado é proposto em regiões que passem por situações numericamente críticas, como a presença de vórtices, a proximidade de paredes ou altos gradientes, pois permite melhor discretização localizada e melhor reprodução dos fenômenos dos fluidos. A Tabela 3.7 resume o procedimento adotado para o teste de sensibilidade de malhas.

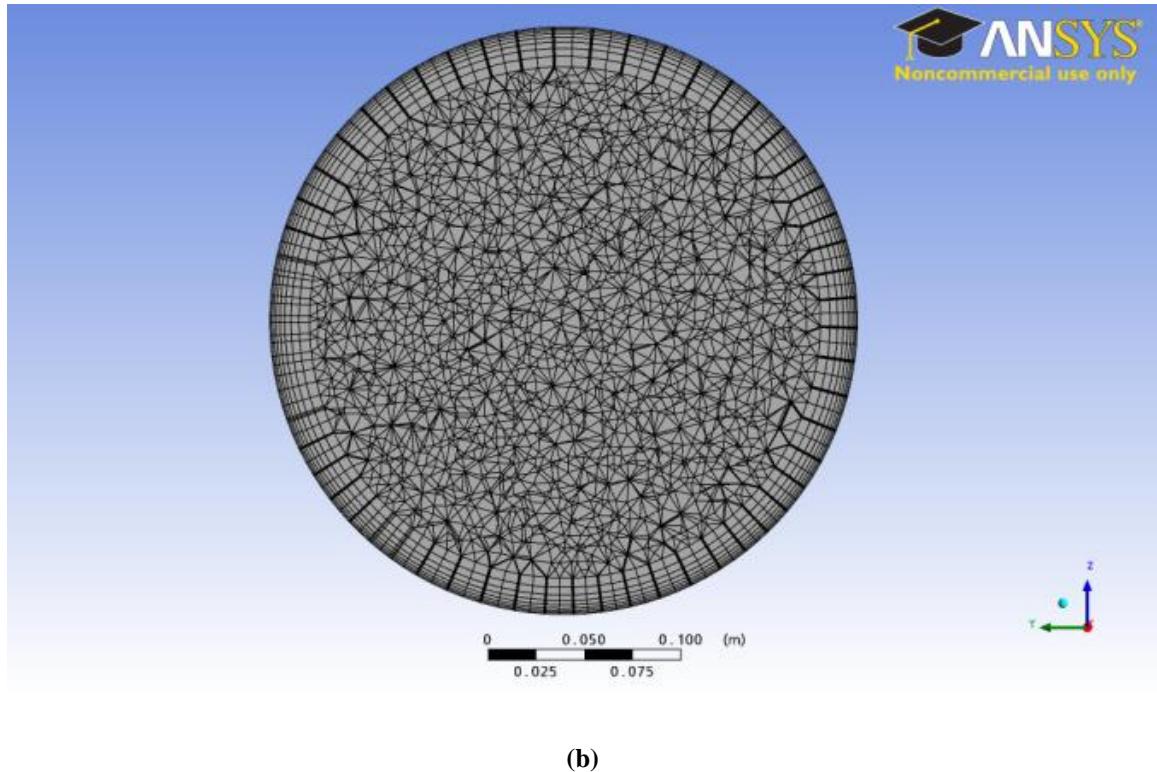
**Tabela 3.7: Síntese do teste de sensibilidade de malha.**

<b>Malha</b>	<b>Número de nós</b>	<b>Número de elementos</b>
1	132.862	546.001
2	278.161	1.230.354
3	388.214	1.799.217
4	670.309	3.194.499
5	787.669	3.118.807
6	1.663.252	6.743.188
7	1.843.037	6.449.286

Contudo, não é somente o número de nós que indica a qualidade de uma malha. É importante também que se observe a transição entre os elementos de controle. O desejável é a transição suave para uma discretização mais precisa. Saltos entre nós agregam erro ao resultado e as iterações fazem com que este erro se propague. Neste trabalho, o refinamento perto das paredes foi utilizado (*inflation*, como chamado em inglês no aplicativo). Esta opção permite que camadas de elementos prismáticos sejam geradas perto da parede, oferecendo menor espaço entre os nós, portanto, melhor reprodução dos fenômenos viscosos ocorrentes nesta região, como exemplificado nas figuras abaixo.

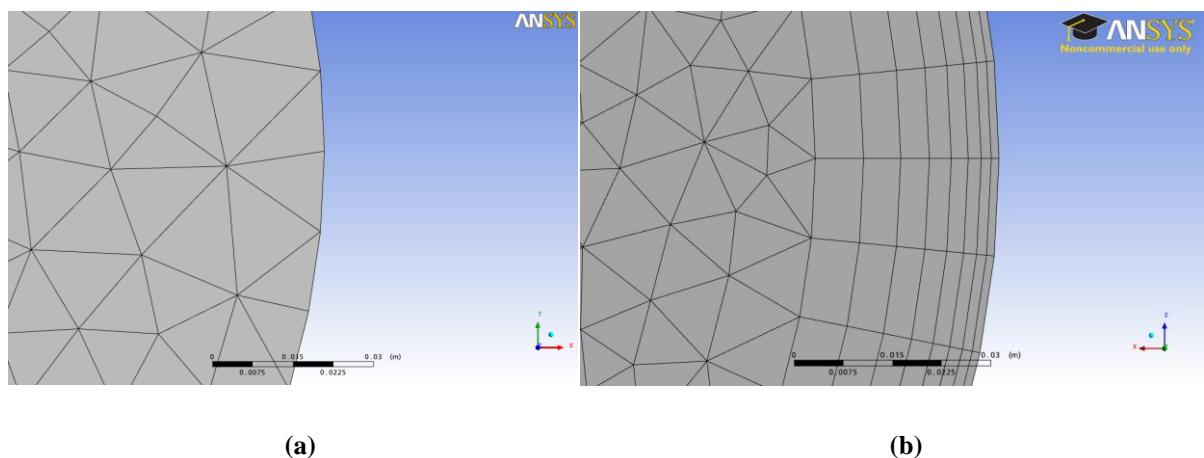


(a)



(b)

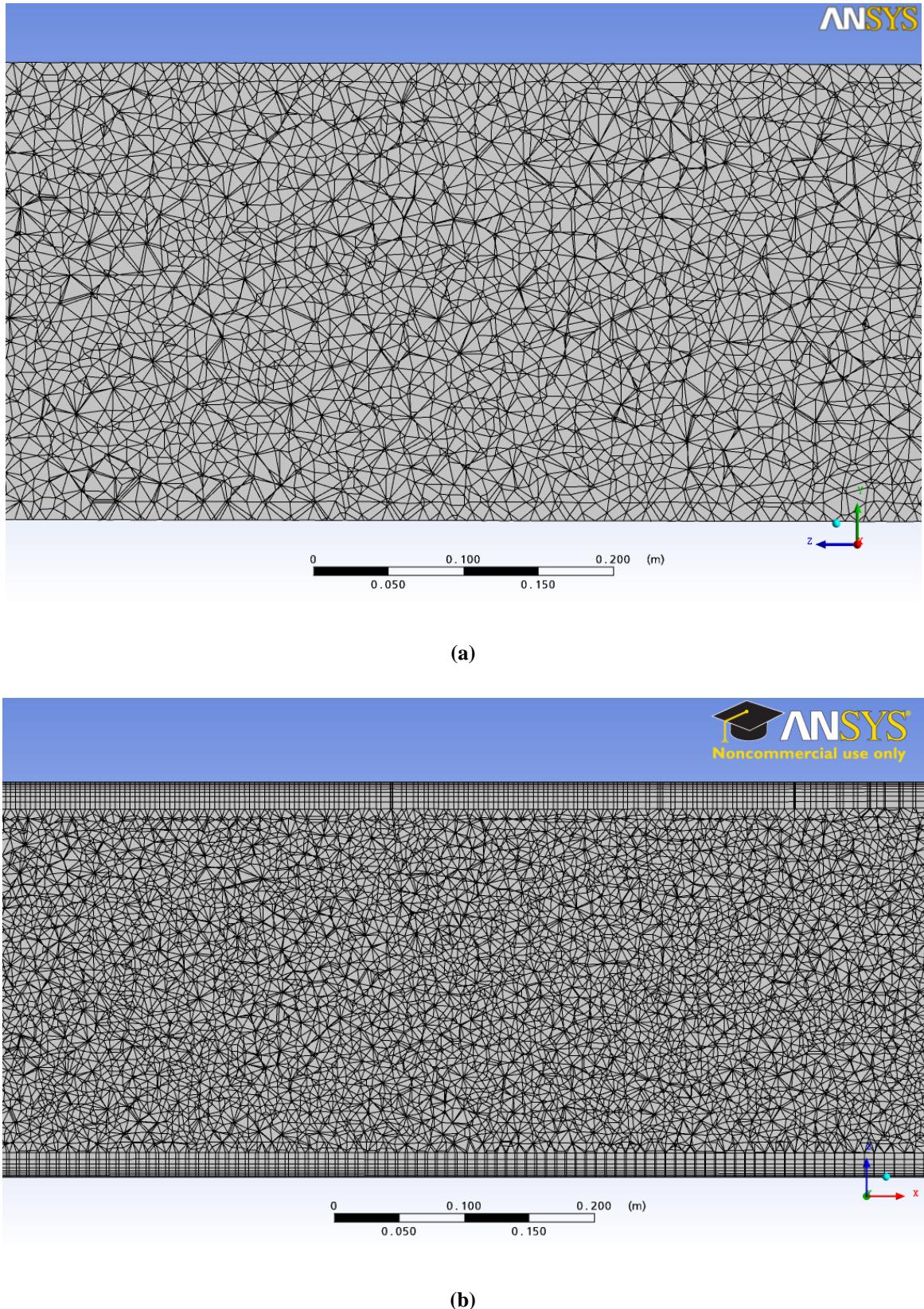
**Figura 3.5:** Malha na seção de saída do domínio: (a) sem *inflation*; (b) com *inflation*.



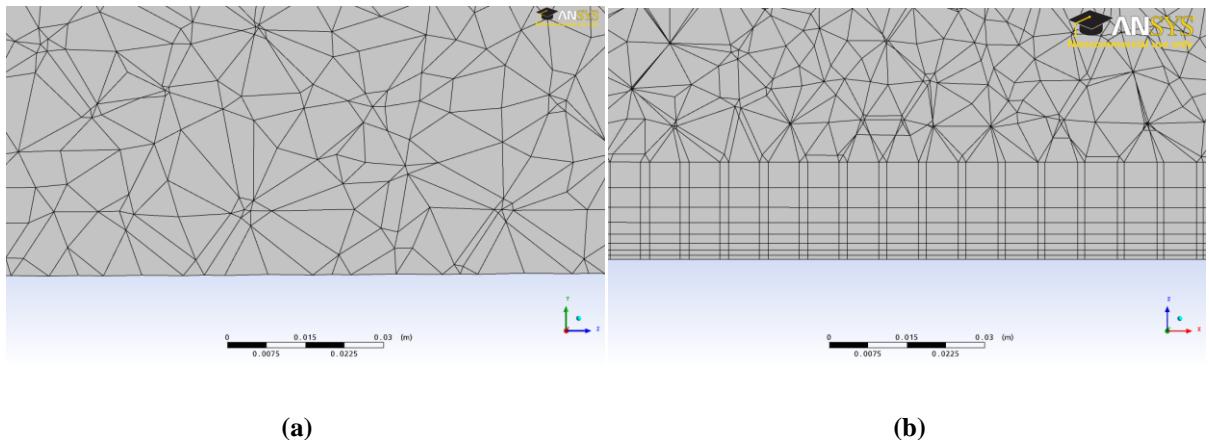
(a)

(b)

**Figura 3.6:** Detalhe da malha perto da parede na seção de saída do domínio: (a) sem *inflation*; (b) com *inflation*.



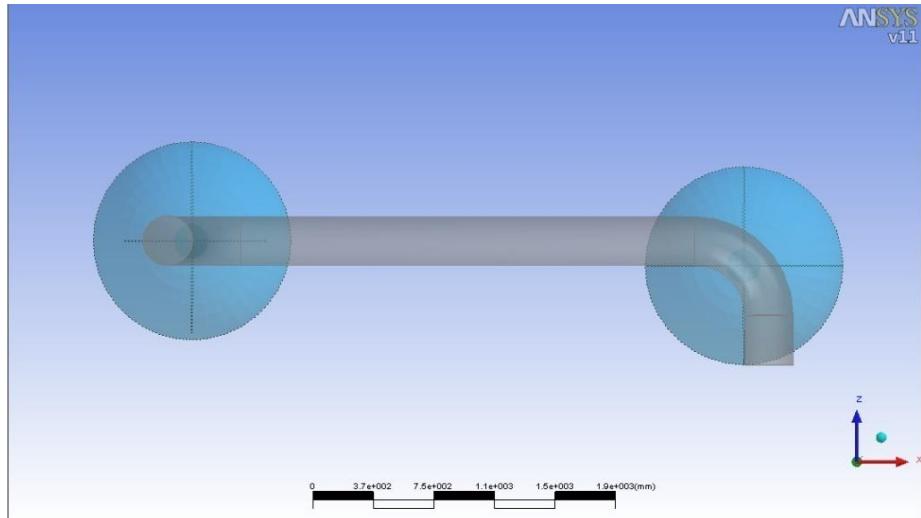
**Figura 3.7:** Malha na seção longitudinal: (a) sem *inflation*; (b) com *inflation*.



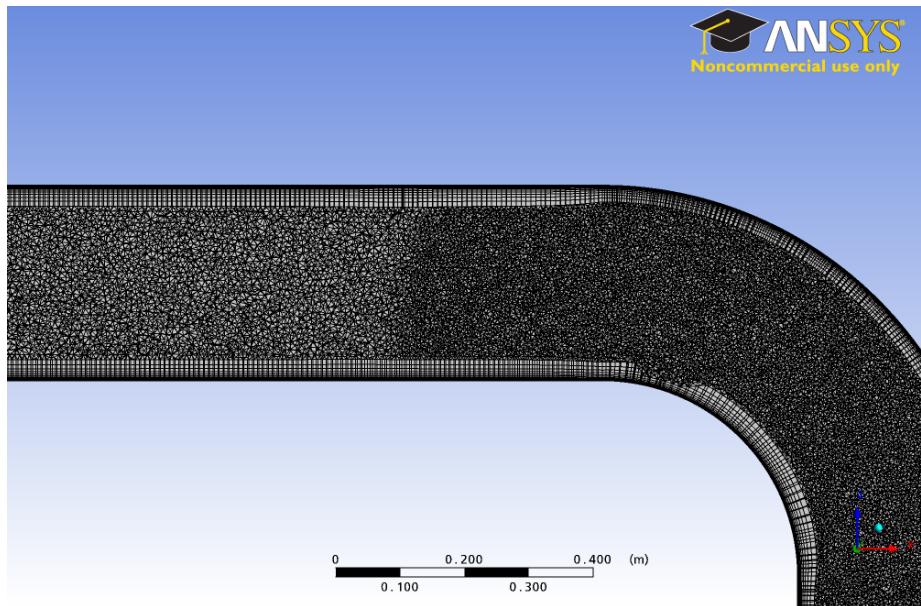
**Figura 3.8:** Detalhe da malha situada perto da parede na seção longitudinal: (a) sem *inflation*; (b) com *inflation*.

É preciso ter cuidado com a transição entre elementos prismáticos da camada com *inflation* e elementos tetraédricos, piramidais ou hexaédricos presentes no núcleo da malha. O interessante é produzir uma malha que tenha o primeiro elemento do núcleo com uma altura semelhante a do último elemento da camada com *inflation*. Este comportamento proporciona passos numéricos mais suaves, por conseguinte, erros menores.

Neste trabalho foi utilizado o controle local do tamanho de elementos nas curvas. Esta ferramenta permite que a malha tenha elementos de tamanho definido dentro de um volume. Foram criadas, então, duas esferas dentro das quais os elementos têm tamanho necessariamente igual aos menores elementos da malha padrão. A Figura 3.9 mostra as esferas usadas e suas respectivas localizações e a Figura 3.10 mostra o resultado com a malha final.



**Figura 3.9:** Identificação das esferas para controle do tamanho dos elementos na região das curvas.

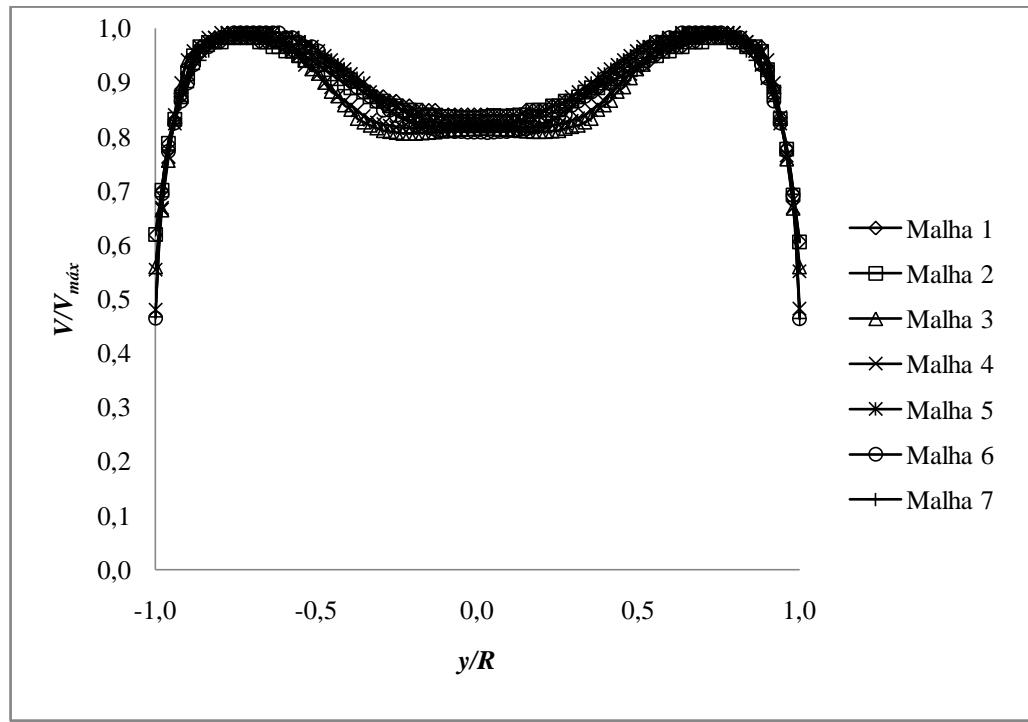


**Figura 3.10:** Parcela de malha com controle de tamanho dos elementos.

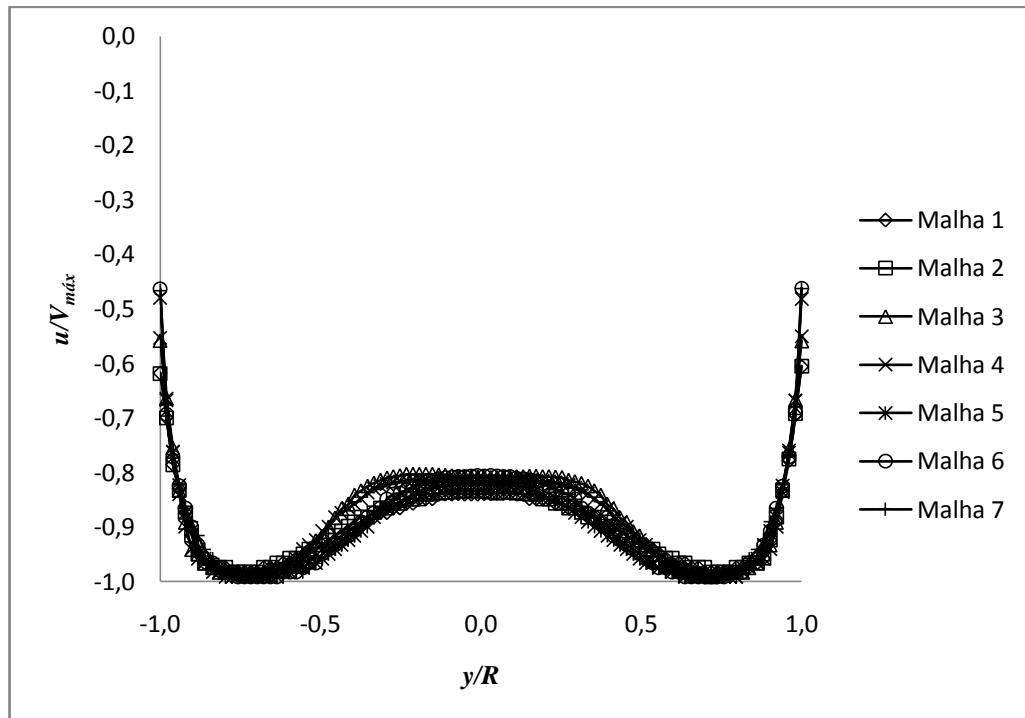
É perceptível o refinamento da malha na região da curva e a transição para o núcleo da malha regular. Este refinamento foi feito para garantir que os efeitos da curva fossem produzidos com maior precisão, uma vez que são essenciais para a análise proposta.

Conforme já comentado, no teste de sensibilidade de malhas, a análise de um ou mais parâmetros faz-se necessária para a comparação entre as malhas. O principal parâmetro de análise deste trabalho é o perfil de velocidades na seção de medição, portanto, foram tomadas

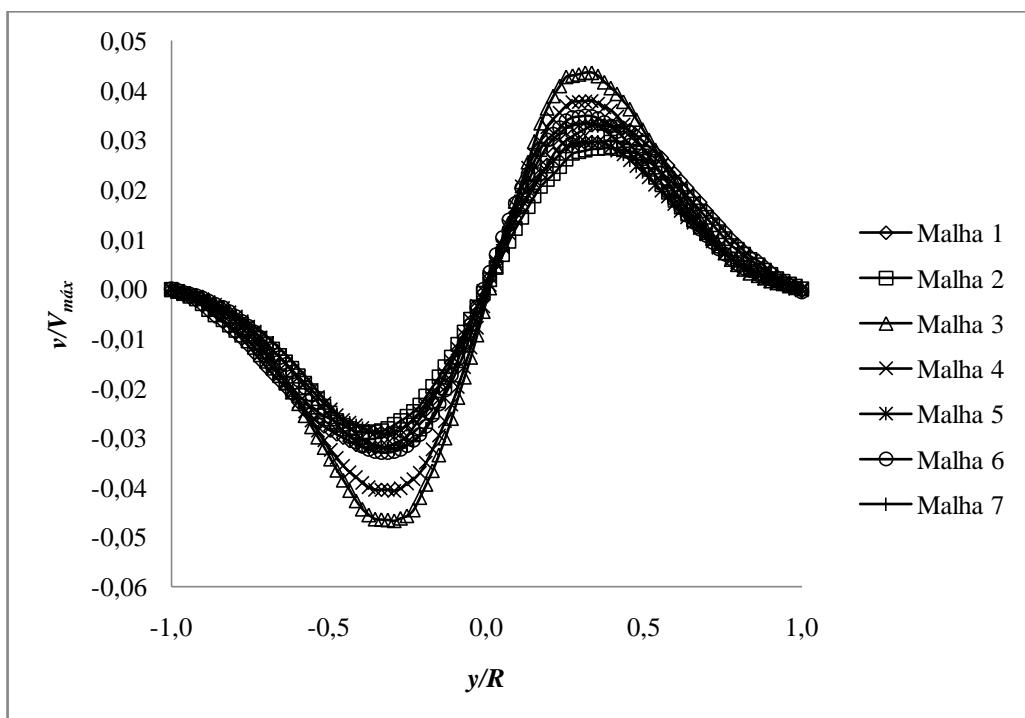
como referências para o teste a velocidade global e os componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  provenientes da projeção nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Esses quatro parâmetros foram analisados ao longo de duas linhas principais que passam pelo centro da seção transversal: a que é paralela ao eixo Y e a que é paralela ao eixo Z. A Figura 3.11 mostra os valores destes parâmetros obtidos ao longo da direção  $y$  com as diferentes malhas testadas. Já a Figura 3.12 mostra os resultados obtidos ao longo da direção  $x$ .



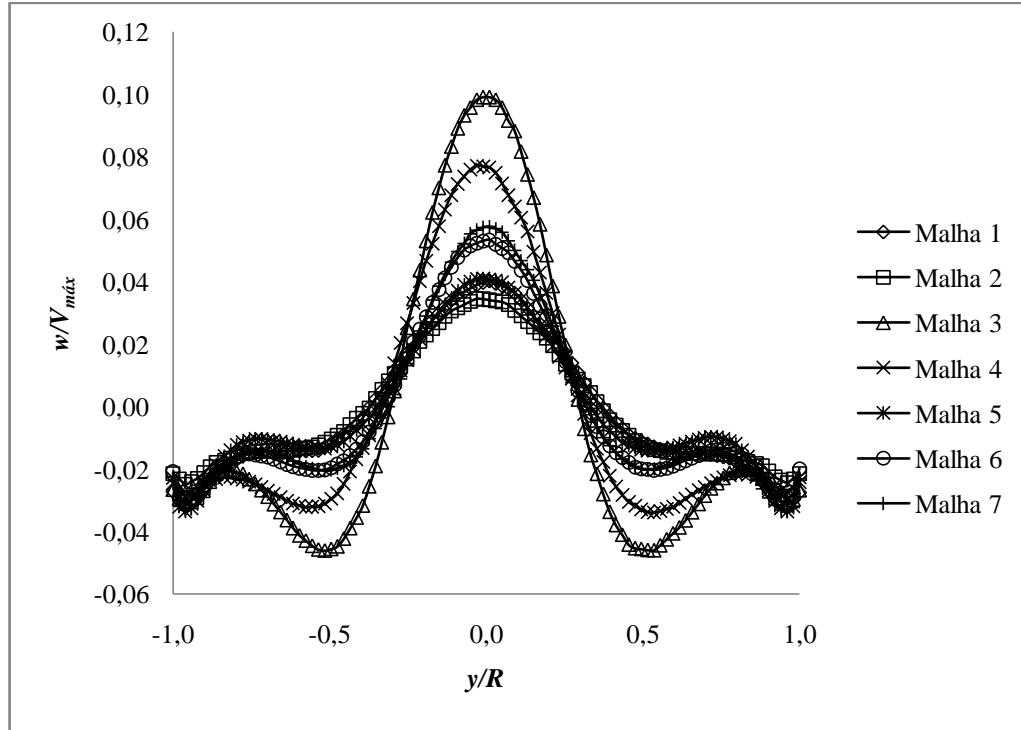
(a)



(b)

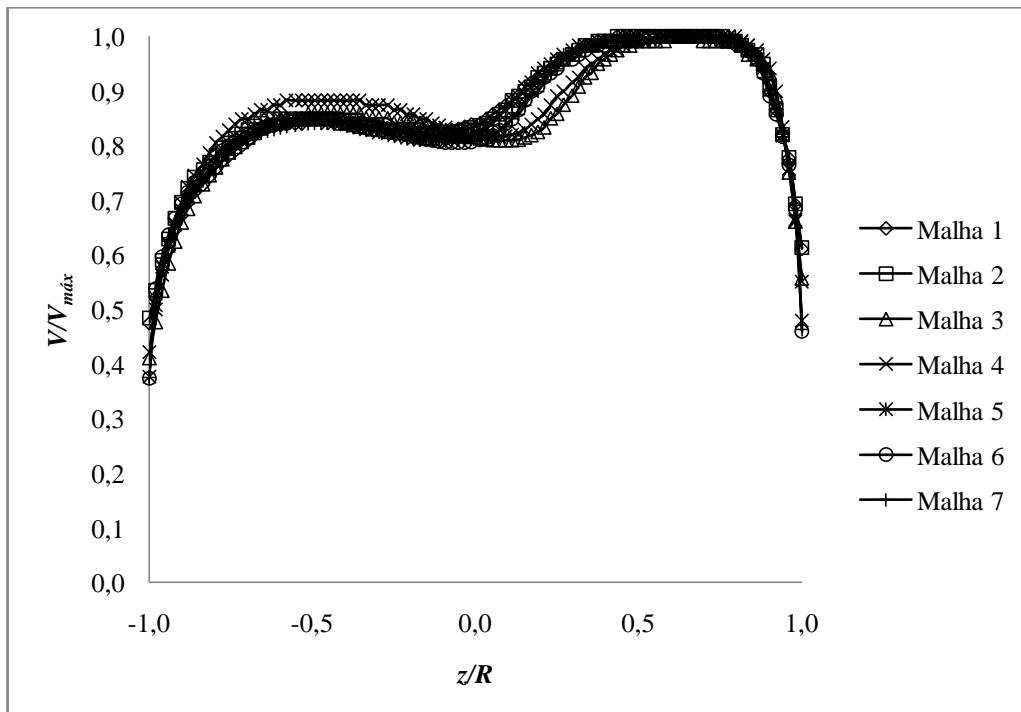


(c)

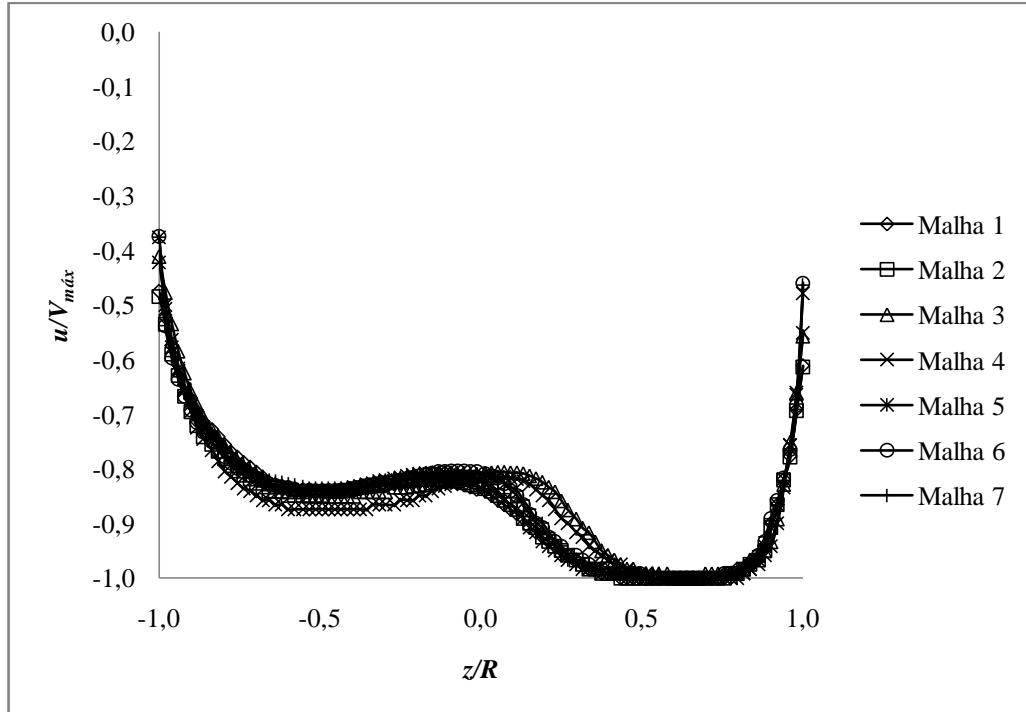


(d)

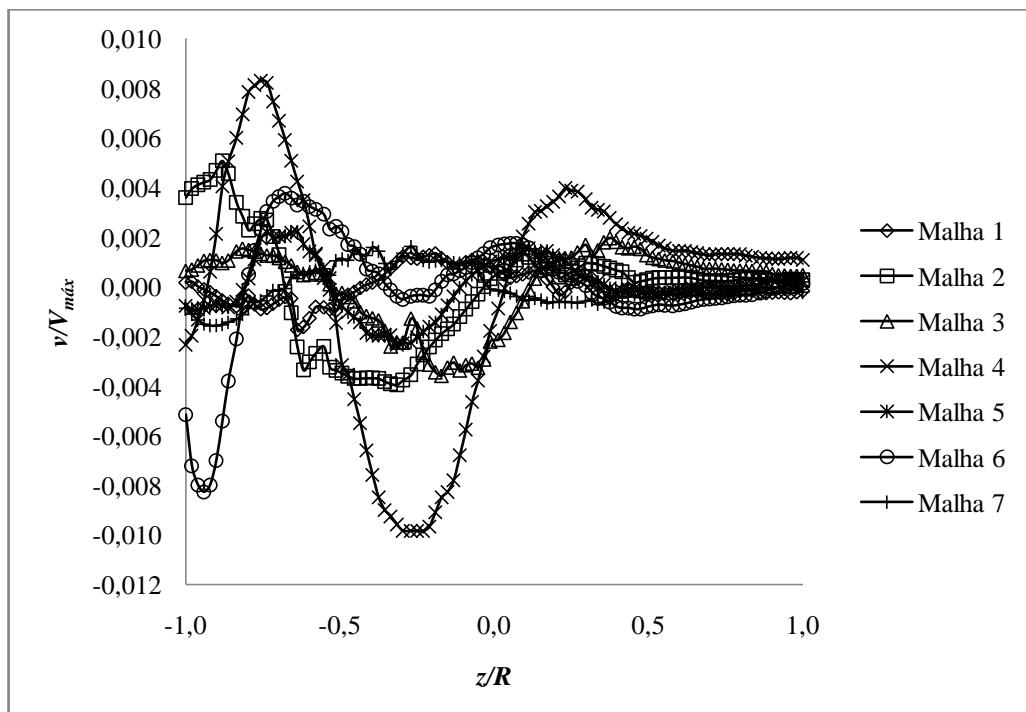
**Figura 3.11:** Resultado do teste de sensibilidade de malha na direção  $y$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente  $u$  adimensional; (c) componente  $v$  adimensional; (d) componente  $w$  adimensional.



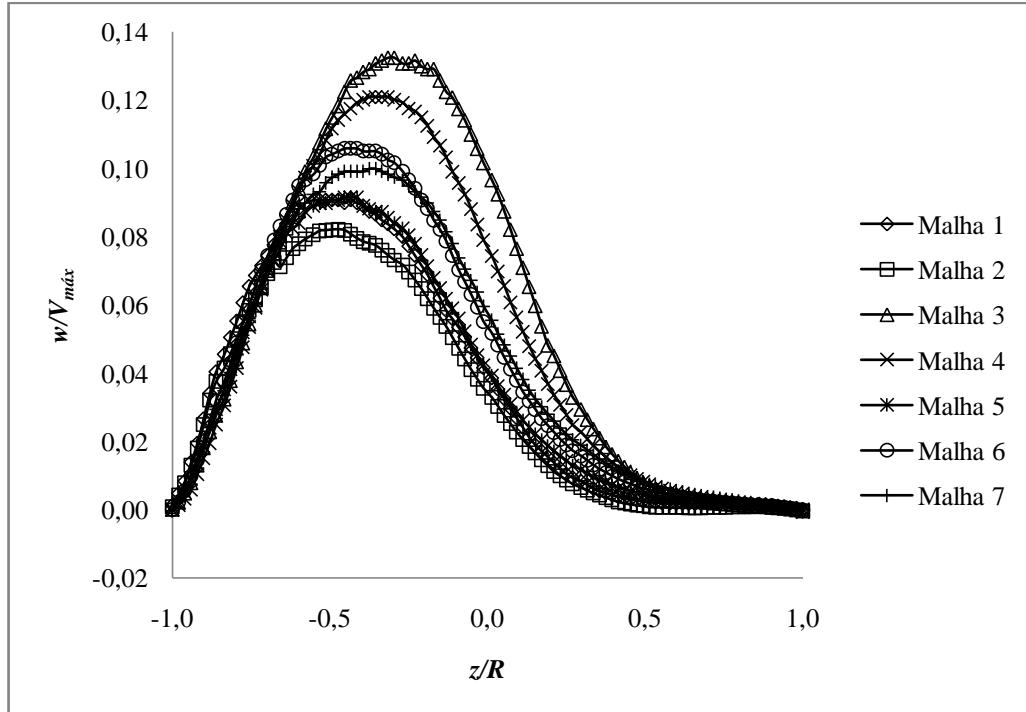
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.12: Resultado do teste de sensibilidade de malha na direção  $z$ :** (a) velocidade global adimensional; (b) componente  $u$  adimensional; (c) componente  $v$  adimensional; (d) componente  $w$  adimensional.

A adimensionalização foi adotada para facilitar a visualização da comparação da dependência dos resultados em relação à malha. Ao se analisar a Figura 3.11, nota-se que as malhas representam o mesmo comportamento. Na Figura 3.12 este resultado se repete, exceto em relação ao componente  $v$ , que não se demonstra tendente a comportamento algum, provavelmente em função do modelo de turbulência adotado ou da dificuldade de se convergir esses componentes, uma vez que a escala em que ocorrem são bem pequenas (da ordem de  $10^{-3}$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]), conforme mostrado na Figura 3.12(c). Como a malha 7 foi a que alcançou o limite da máquina utilizada, a malha 6 foi escolhida, para que se pudesse obter resultados de maneira mais ágil. A Figura 3.13 mostra o erro relativo médio de cada parâmetro em relação à malha 6, que foi a escolhida. Este erro foi calculado por meio da média dos erros relativos dos valores de cada parâmetro (velocidade global e componentes nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) obtidos nos 100 pontos ao longo de cada uma das retas (na direção  $y$  e na direção  $z$ ) que deram origem ao perfil de velocidades, ou seja, conforme a equação (3.27).

$$erro_{rm} = \frac{1}{100} \sum_{n=1}^{100} \frac{P_{ij} - P_{i6}}{P_{i6}}$$

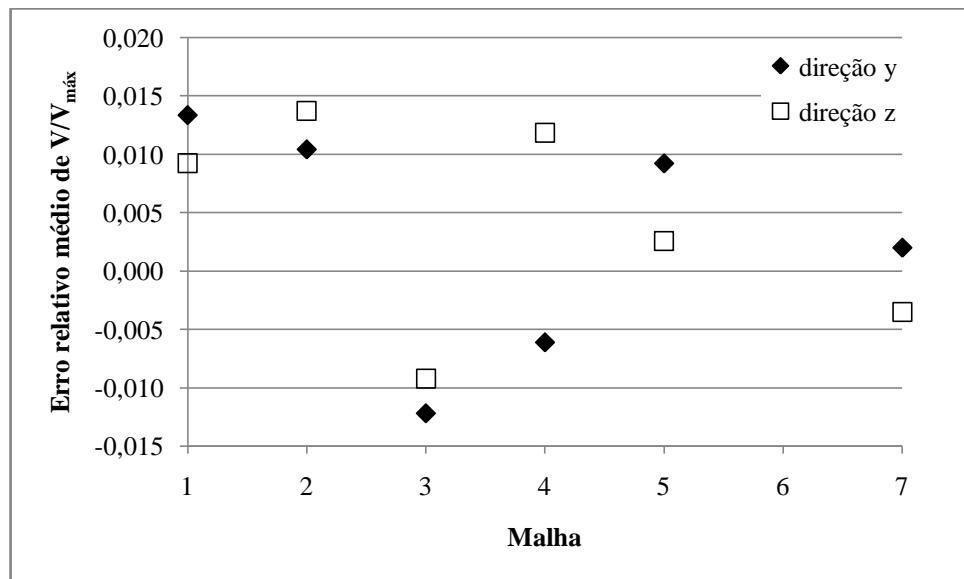
(3.27)

Donde:

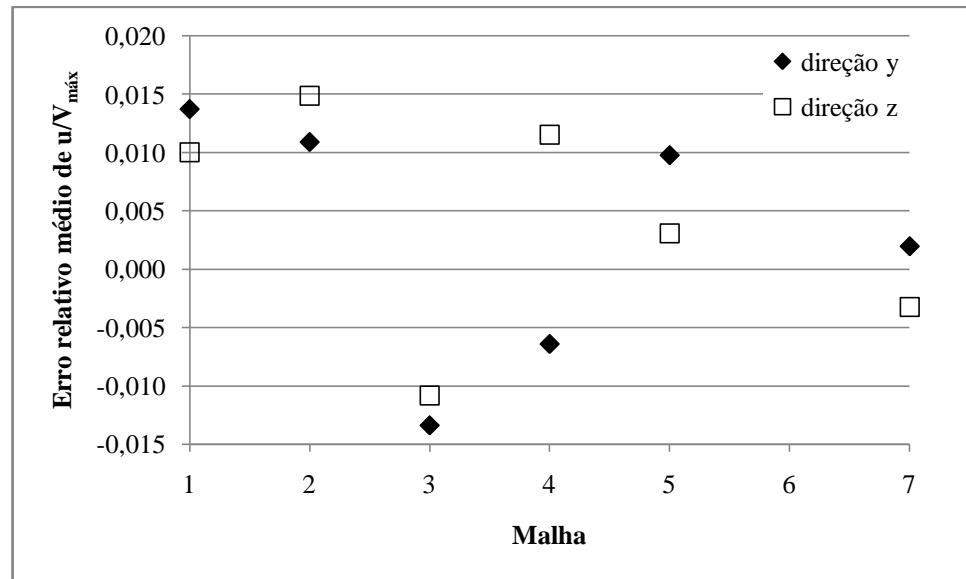
$P_{ij}$  : valor do parâmetro  $i$  medido na malha  $j$ ;

$P_{i6}$  : valor do parâmetro  $i$  medido na malha 6.

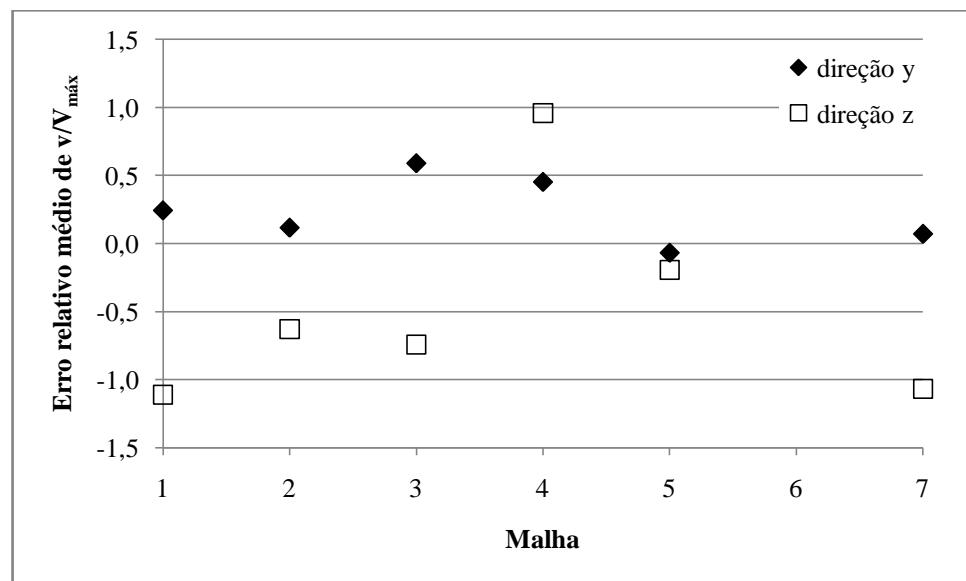
Esta abordagem tem como objetivo quantificar, de certa forma, o erro embutido na escolha da malha 6 em comparação às outras malhas utilizadas no teste.



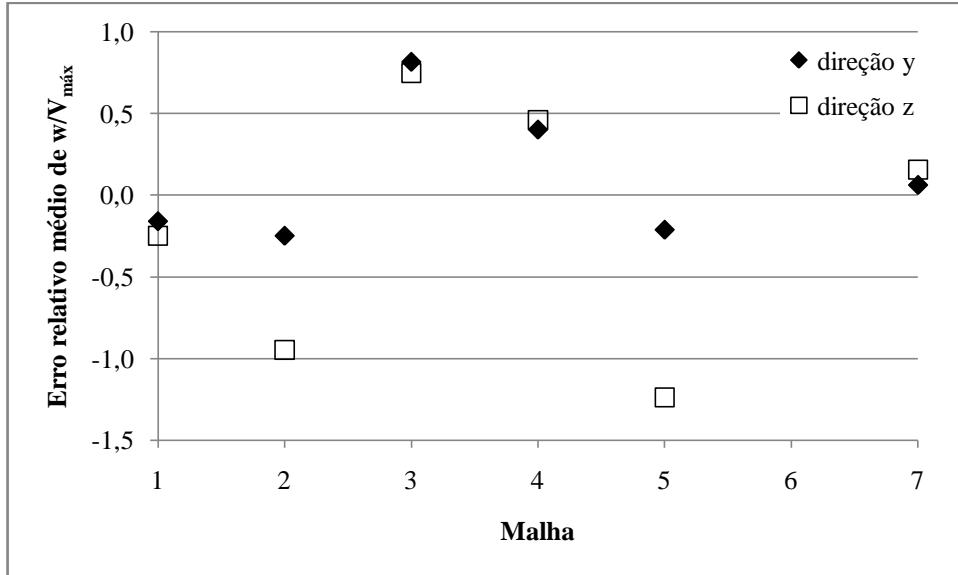
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.13:** Erro relativo médio entre as malhas testadas: (a) velocidade global adimensional; (b) componente  $u$  adimensional; (c) componente  $v$  adimensional; (d) componente  $w$  adimensional.

A análise destes gráficos deixa evidente o que já foi notado na Figura 3.12 em relação ao componente  $v$  da velocidade ao longo da direção do eixo Z. Ao se comparar a malha 6 com a malha 7, este é o único erro cujo valor absoluto ultrapassa 0,5. Outra conclusão importante é que a ordem de grandeza dos erros dos componentes tangenciais ( $v$  e  $w$ ) são cerca de 100 vezes maior que a do componente normal ( $u$ ). Além disso, fica clara a predominância do componente normal da velocidade, uma vez que os erros da velocidade global têm mesmo comportamento e ordem de grandeza dos erros do componente normal e que na Figura 3.12 também apresenta comportamento semelhante ao do componente  $u$ . Como a abordagem proposta neste trabalho leva em consideração o perfil de velocidades, considera-se que a malha 6 proporciona, de fato, resultados aceitáveis.

## 4 Resultados e Discussão

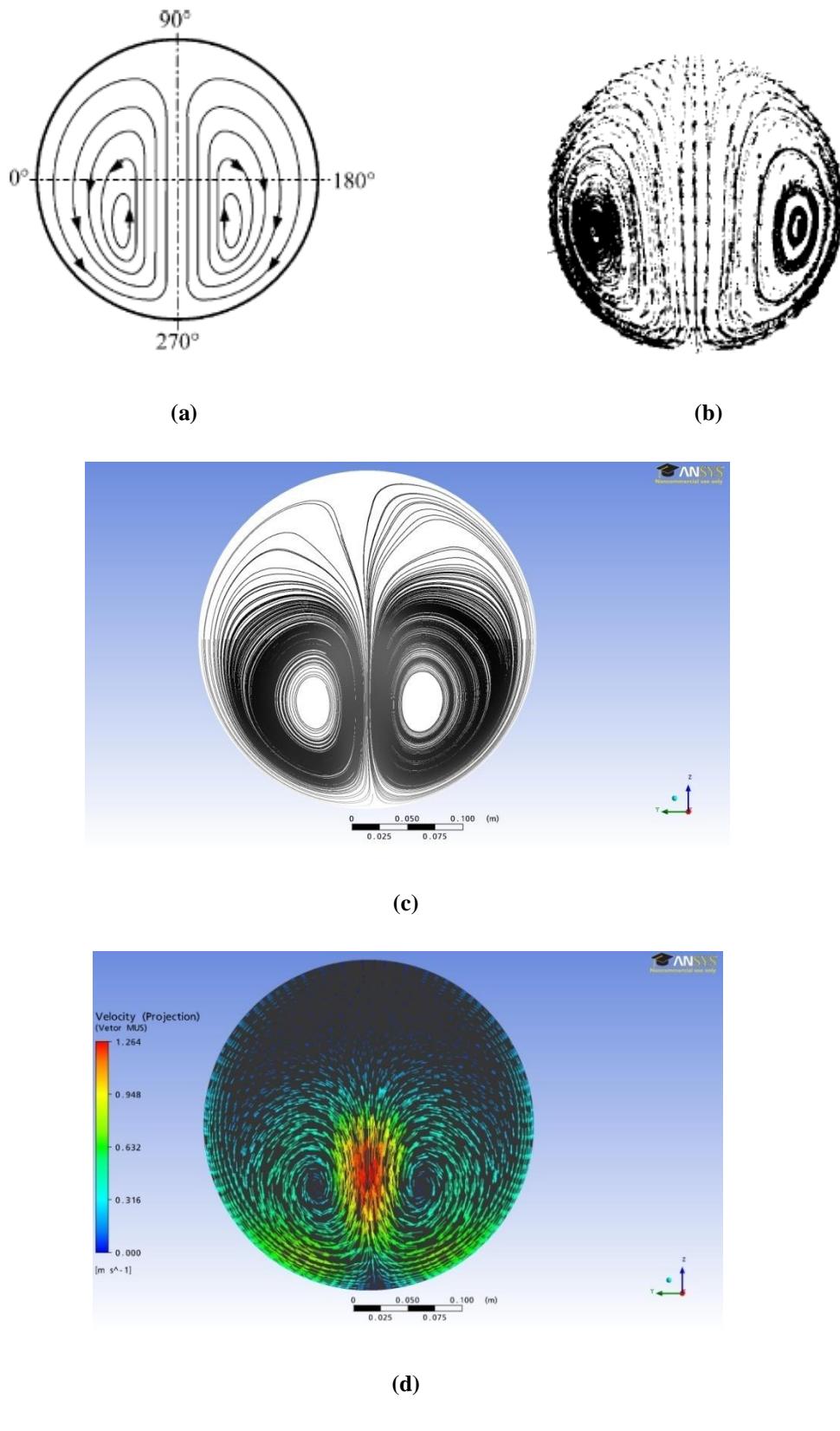
### 4.1 Validação da Modelagem Numérica

Todo problema modelado numericamente precisa ser validado para que se possa usufruir de seus resultados de maneira confiável. A validação é feita por meio da comparação entre os resultados obtidos com o modelo adotado e outros previamente obtidos em experimentos ou outras fontes. Além de checar a confiabilidade dos resultados, esta abordagem também visa observar as limitações da modelagem, ou seja, os erros obtidos em relação à referência de comparação provenientes de ajustes equivocados de parâmetros e condições de contornos.

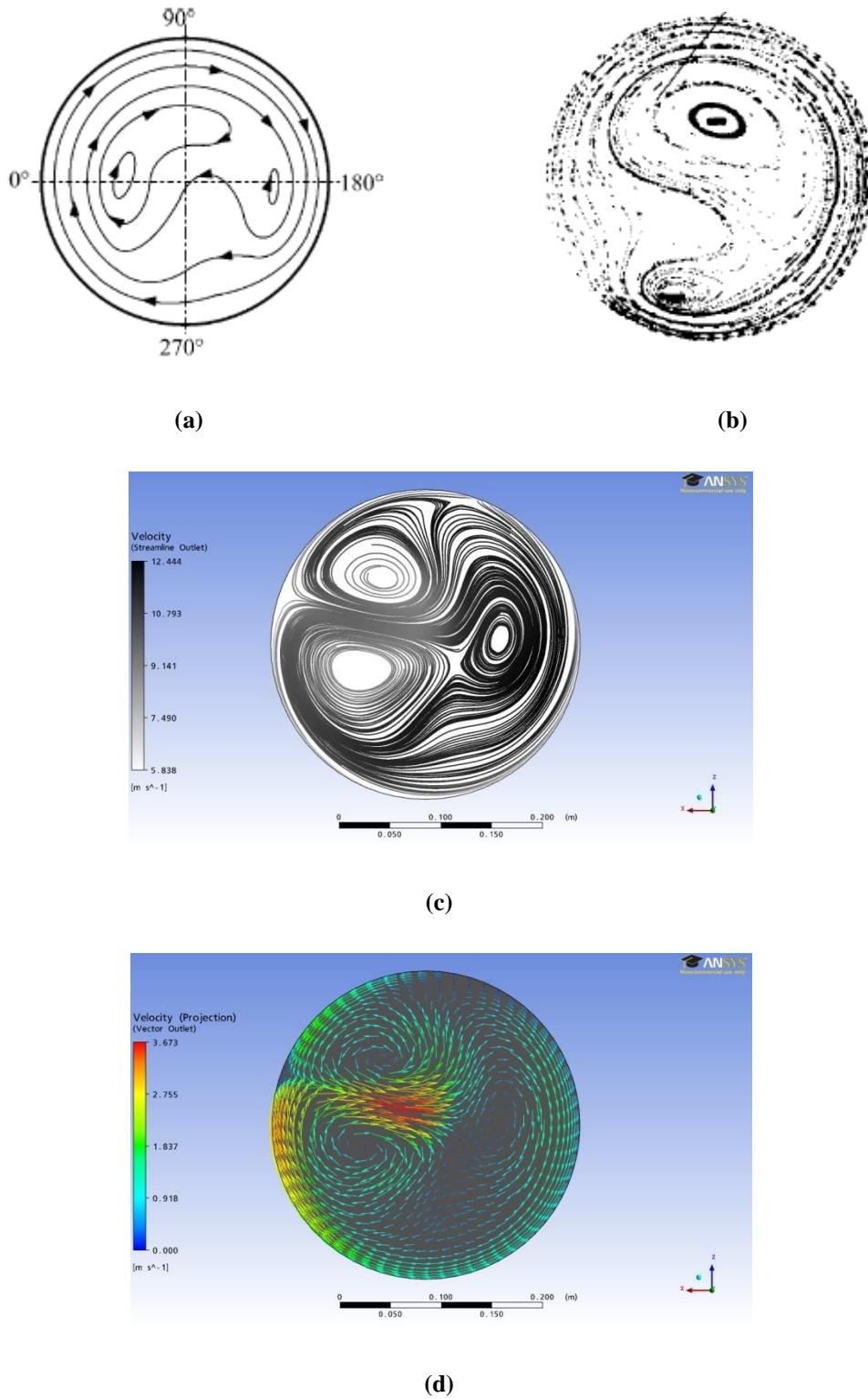
Como não foi possível a realização de testes experimentais que pudessem detalhar o escoamento proposto, foi adotado o critério de comparação com a literatura. Basicamente o que se tem de informações da literatura são os perfis de velocidades normal e tangencial (obtidos experimental e numericamente) para algumas instalações experimentais semelhantes ao caso simulado e o comportamento dos vórtices oriundos do efeito das curvas no escoamento. A seguinte validação é, portanto, qualitativa e não quantitativa, com a qual a intenção é mostrar que foram alcançados comportamentos e tendências típicos do caso abordado.

O comportamento típico de escoamentos analisados em planos à jusante de uma curva é a formação de dois grandes vórtices. Estes vórtices são consequências do chamado *escoamento secundário* provocado pelo efeito da curva. Este escoamento provoca, basicamente, este efeito de giro e deformações no perfil de velocidades, em função da inércia do fluido, portanto da tendência de não curvar e acabar chocando significativamente com a parede da tubulação. A Figura 4.1 compara este comportamento para resultados obtidos na literatura com os alcançados no presente trabalho.

Outra abordagem qualitativa pode ser feita em relação ao escoamento à jusante da segunda curva. A investigação do comportamento do escoamento após duas curvas em planos diferentes é comum na literatura e as comparações são apresentadas na Figura 4.2.



**Figura 4.1:** Comportamento típico do escoamento à jusante de uma curva: (a) Ruppel e Peters [23]; (b) Hilgenstock e Ernst [18]; (c) linhas de corrente obtidas neste trabalho; (d) projeções tangenciais da velocidade obtidas neste trabalho.



**Figura 4.2: Comportamento típico do escoamento à jusante de duas curvas em planos diferentes: (a) Ruppel e Peters [23]; (b) Hilgenstock e Ernst [18]; (c) linhas de corrente obtidas neste trabalho; (d) projeções tangenciais da velocidade obtidas neste trabalho.**

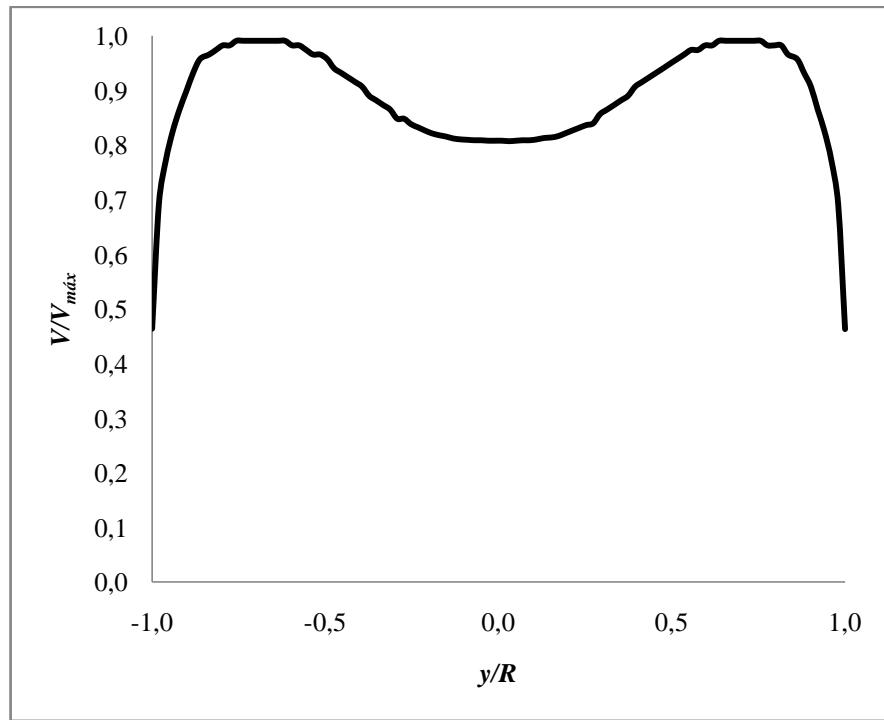
É importante colocar que as linhas de correntes mostradas por Ruppel e Peters [23] são apenas representativas e não resultados de experimentos. Já as imagens de Hilgenstock e Ernst [18] são resultado de simulação numérica para geometria e condições semelhantes. A geometria destes dois casos considera que não há trecho reto entre as duas curvas, o que gera uma diferença considerável no resultado, porém não impossibilita a visualização das mesmas tendências. O comportamento típico neste caso é a formação de dois vórtices, um mais intenso que o outro, com mesmo sentido de rotação. Nos resultados deste trabalho são notados três vórtices e, provavelmente, este terceiro é resultado da diferença da geometria simulada. Os dois vórtices obtidos situados perto do diâmetro ao longo da direção  $x$  mostram comportamento semelhante ao dos dois vórtices encontrados na literatura no que diz respeito a possuem localização e intensidade.

#### 4.2 Velocidades na Seção de Medição

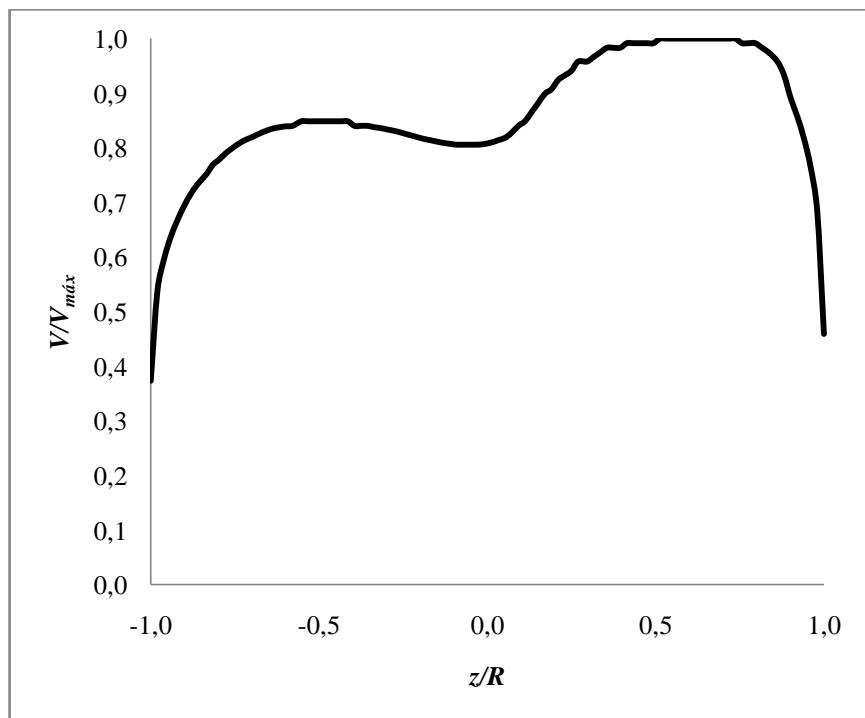
O controle da qualidade da medição de vazão e da calibração dos medidores ultra-sônicos por meio do conhecimento do perfil de velocidades na seção de medição é uma tendência forte, como mostrado pela literatura [10] [11] [17] [18]. Isso faz com que os códigos de DFC ganhem maior importância, pois são capazes de reproduzir com alta confiabilidade os fenômenos do escoamento; certo que somente quando devidamente modelados [18].

Em condições não ideais (normatizadas) de medição de vazão, a investigação do perfil de velocidades é de grande utilidade na análise das incertezas envolvidas nos dados. Uma vez que o medidor processa os dados de vazão baseando-se na correção de um perfil uniforme, o que já é uma hipótese impossível em casos práticos industriais, o perfil de velocidades perturbado por acidentes de linha agrega mais erros e incertezas aos resultados.

A Figura 4.3 mostra os perfis de velocidades obtidos com a malha 6 (escolhida) na seção de medição nas direções principais do escoamento definidas na seção 3.4.3. É importante ressaltar que a Figura 4.3 mostra o perfil da velocidade global adimensional e, embora o componente normal seja o que predomina quando analisada a velocidade global, é mais adequada a análise do perfil do componente  $u$  da velocidade, conforme a Figura 4.4.

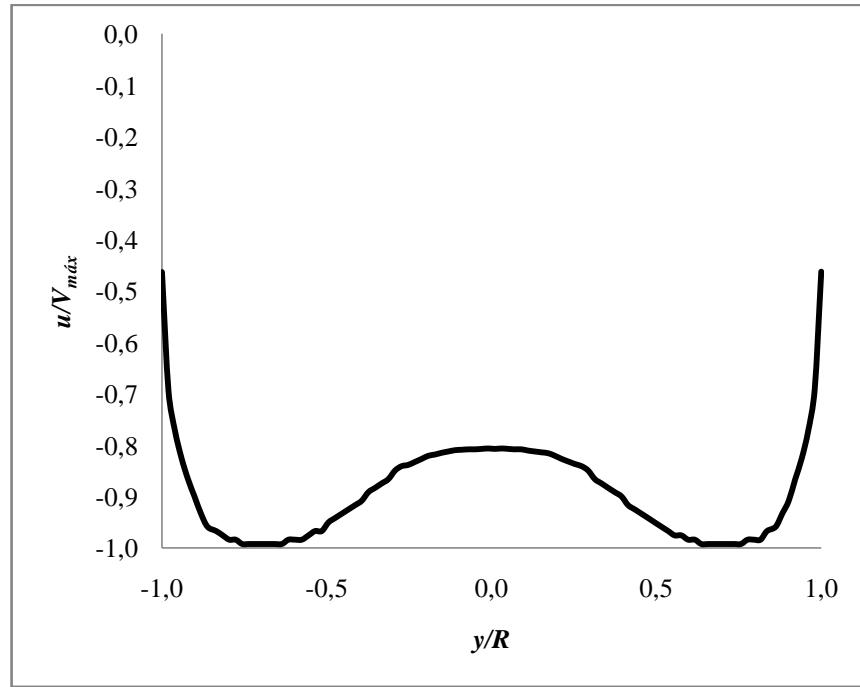


(a)

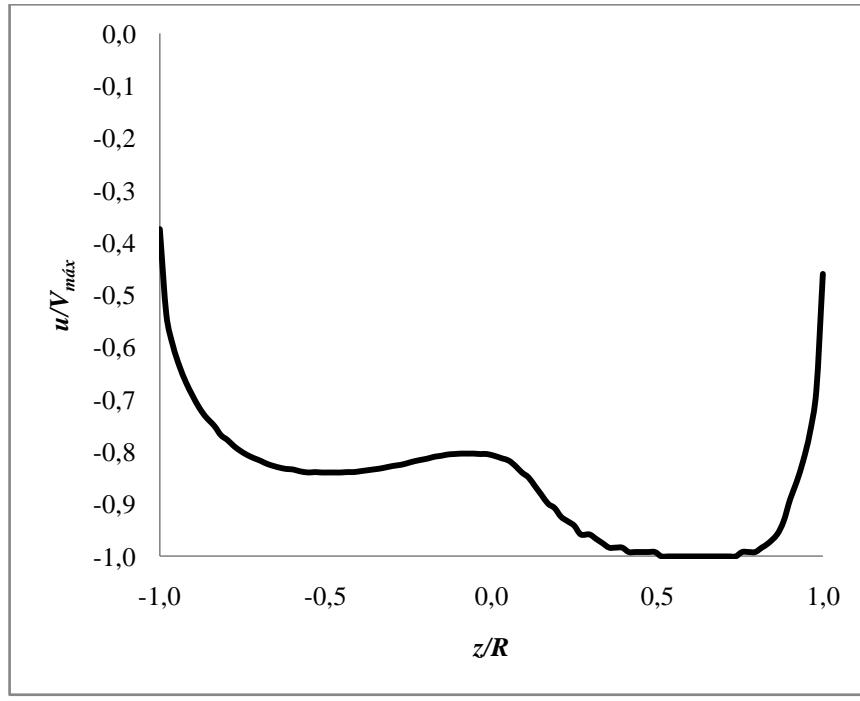


(b)

**Figura 4.3:** Perfis de velocidades globais na seção de medição: (a) direção  $y$ ; (b) direção  $z$ .

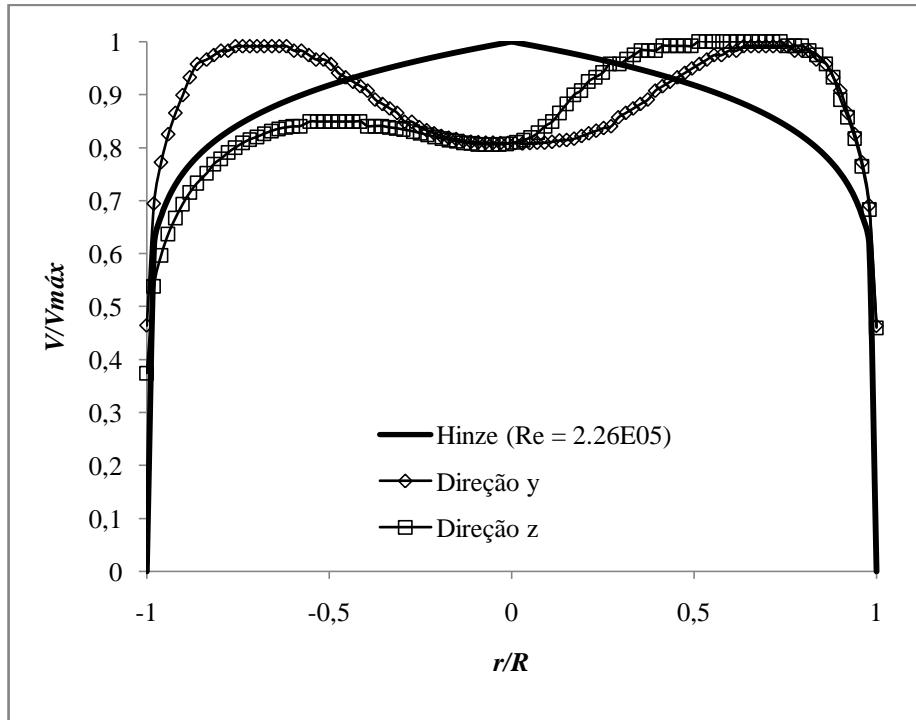


(a)



(b)

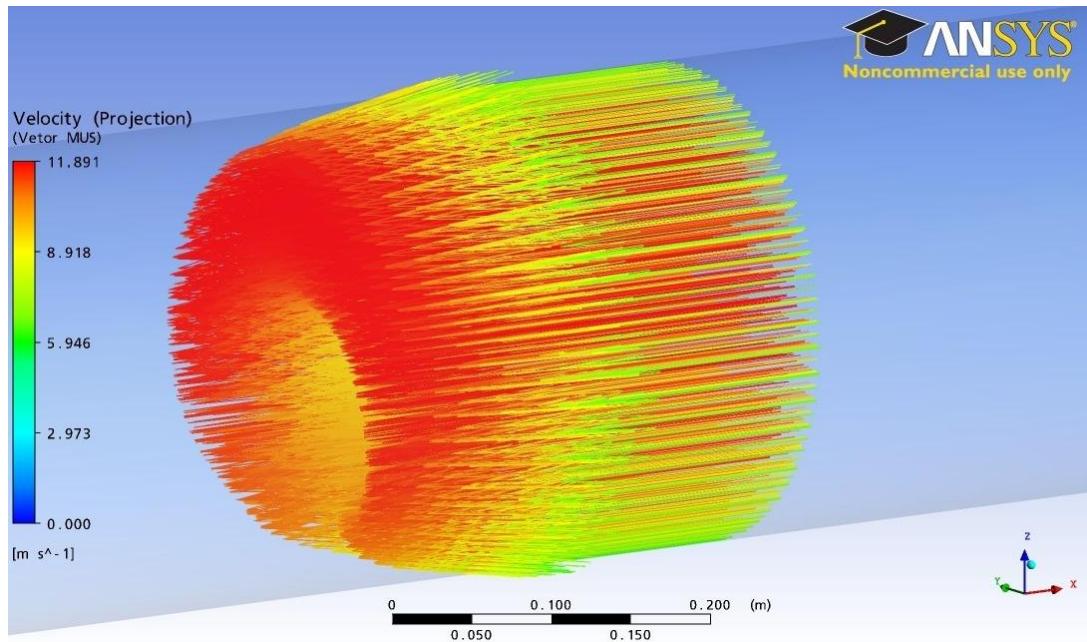
**Figura 4.4:** Perfis do componente  $u$  da velocidade na seção de medição: (a) direção  $y$ ; (b) direção  $z$ .



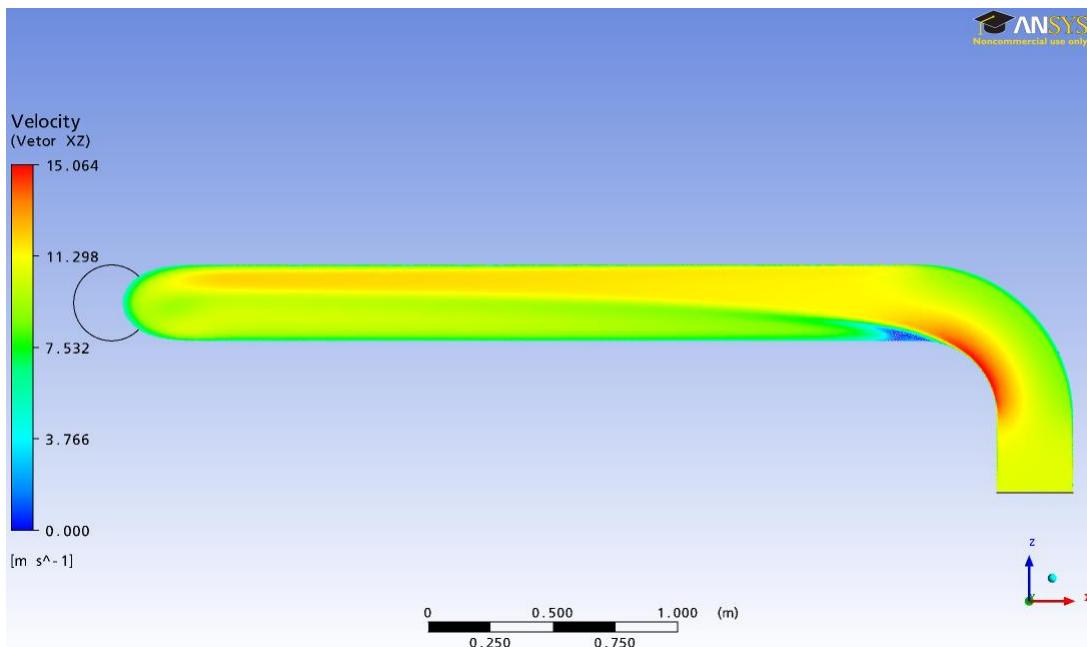
**Figura 4.5: Comparação dos perfis nas direções principais na seção de medição com o perfil de Hinze para  $Re = 2.26 \text{ E}05$ .**

A Figura 4.5 apresenta uma comparação entre os perfis adimensionais de velocidade nas duas direções de análise (y e z) na seção de medição e o perfil turbulento completamente desenvolvido de Hinze esperado para o número de Reynolds referente ao caso simulado ( $Re = 225883$ ).

A Figura 4.6 mostra uma perspectiva do perfil tridimensional de velocidades na seção de medição. A perturbação fica evidente e é possível identificar, agora tridimensionalmente, os perfis de velocidades mostrados na Figura 4.3 ao longo de seus respectivos eixos.



**Figura 4.6:** Vetores normais de velocidade na seção de medição de vazão.



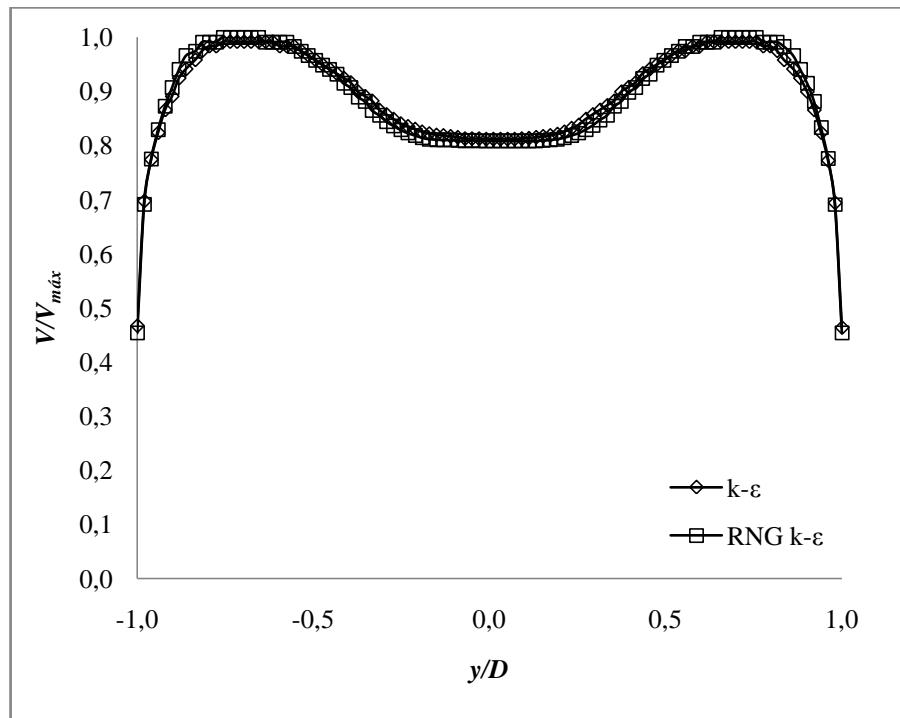
**Figura 4.7:** Vetores de velocidade no plano longitudinal XZ.

A Figura 4.7 mostra os vetores de velocidade no plano XZ, evidenciando o efeito pós-curva que faz com que o fluido mantenha a inércia e fique mais veloz na porção da tubulação que

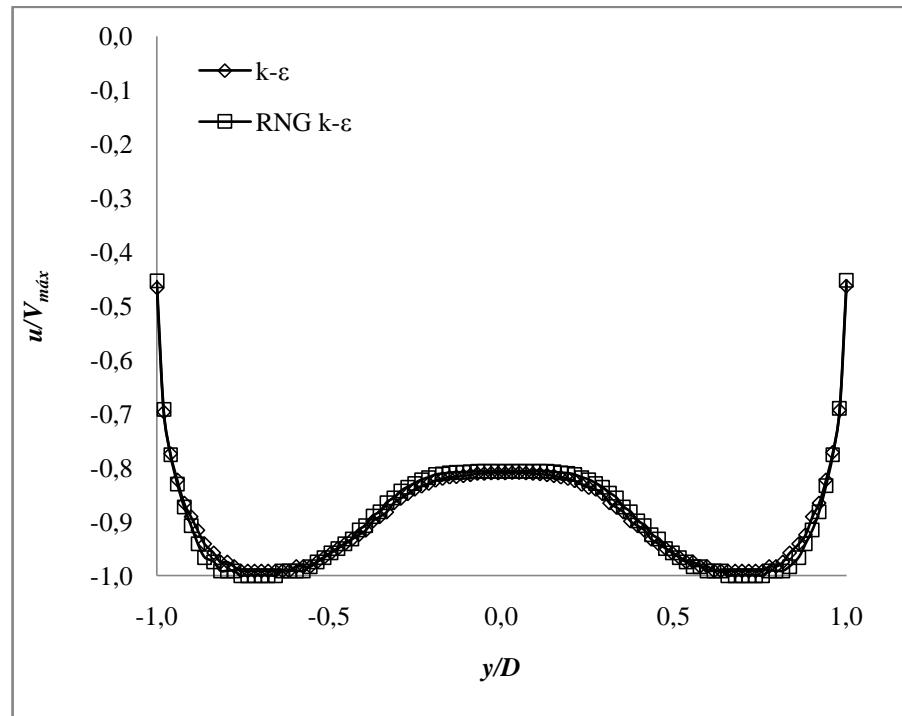
corresponde à parte de fora da curva. É notável uma pequena zona de recirculação logo após a parte interna da curva.

#### 4.3 Teste com Modelo RNG k- $\varepsilon$ de Turbulência

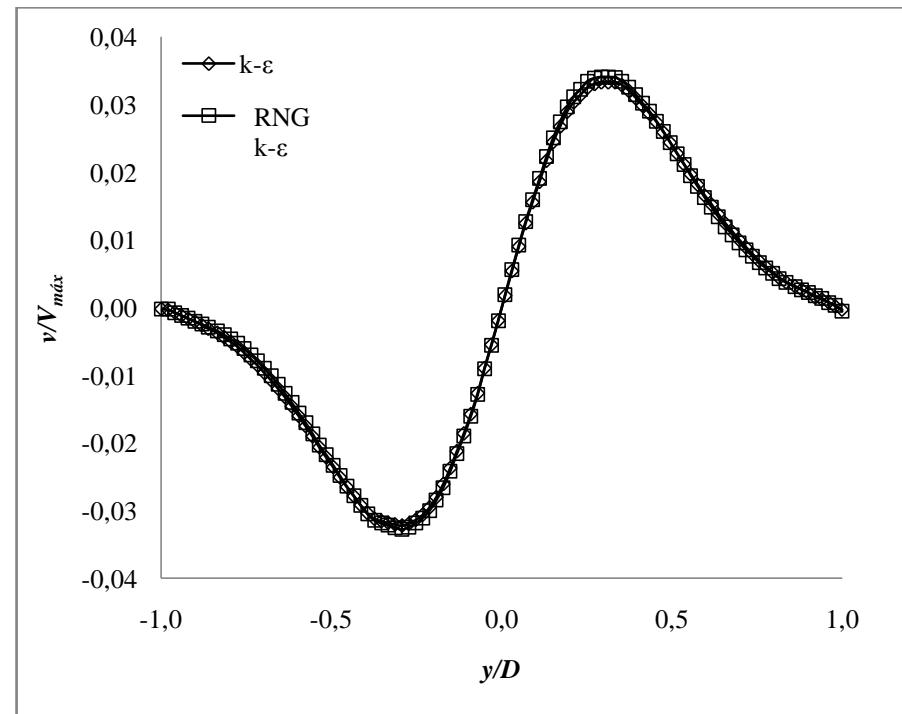
O modelo k- $\varepsilon$  de turbulência foi utilizado para a obtenção de todos os resultados apresentados até então. Sabe-se que a escolha do modelo de turbulência pode ter influência significativa nas características do escoamento. Hilgenstock e Ernst [18] mostraram que os resultados para geometria e condições semelhantes às deste trabalho, o modelo RNG k- $\varepsilon$  mostrou-se capaz de reproduzir perfis de velocidades com maior precisão que o modelo k- $\varepsilon$ . O teste com o modelo RNG k- $\varepsilon$  foi feito com a mesma malha considerada adequada após o teste de sensibilidade e os resultados obtidos são mostrados nas figuras abaixo.



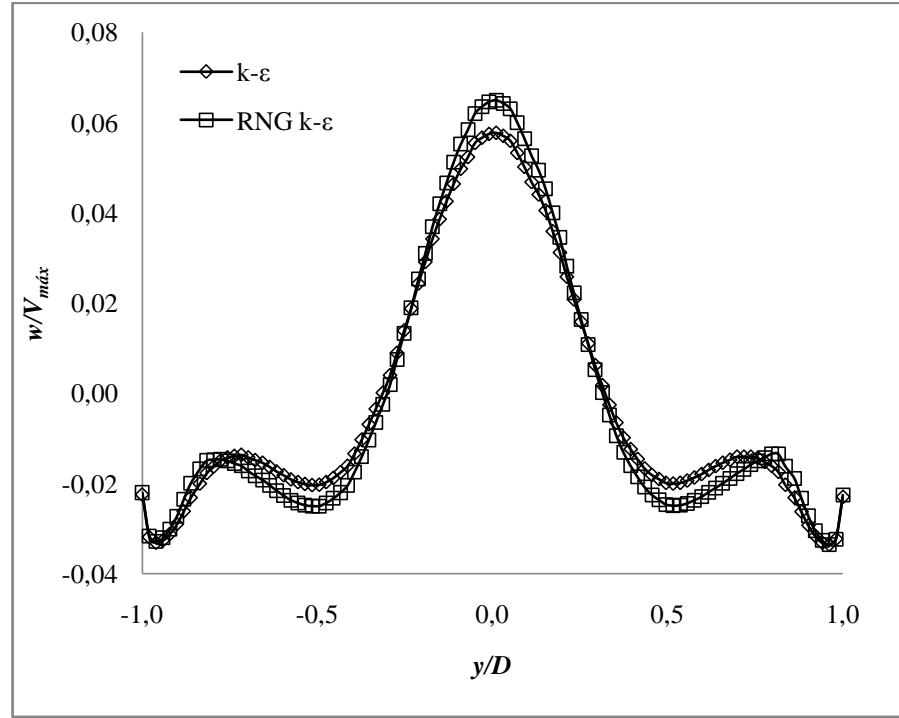
(a)



(b)

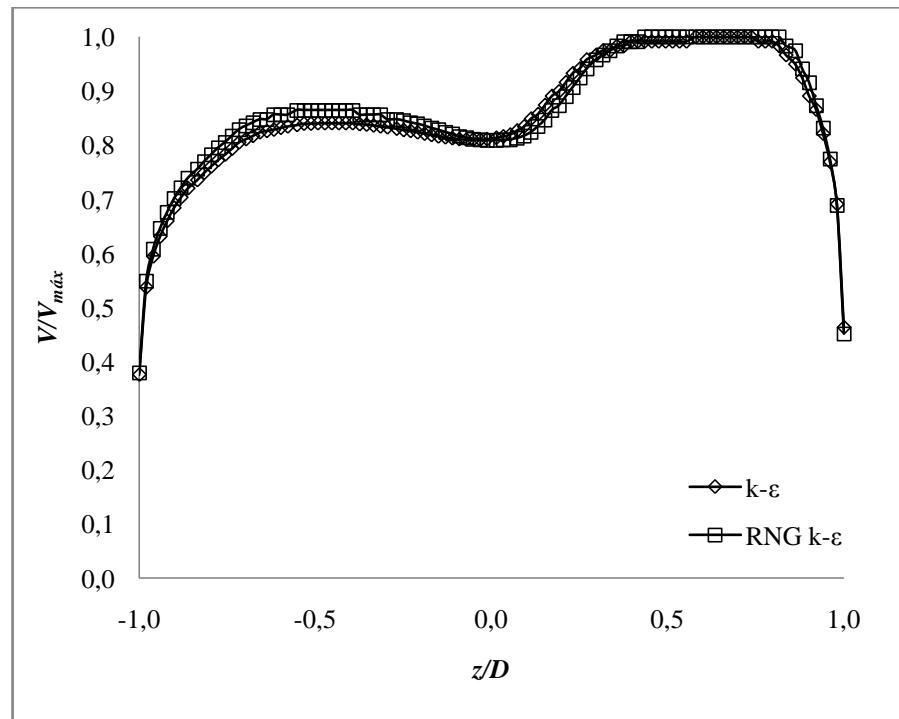


(c)

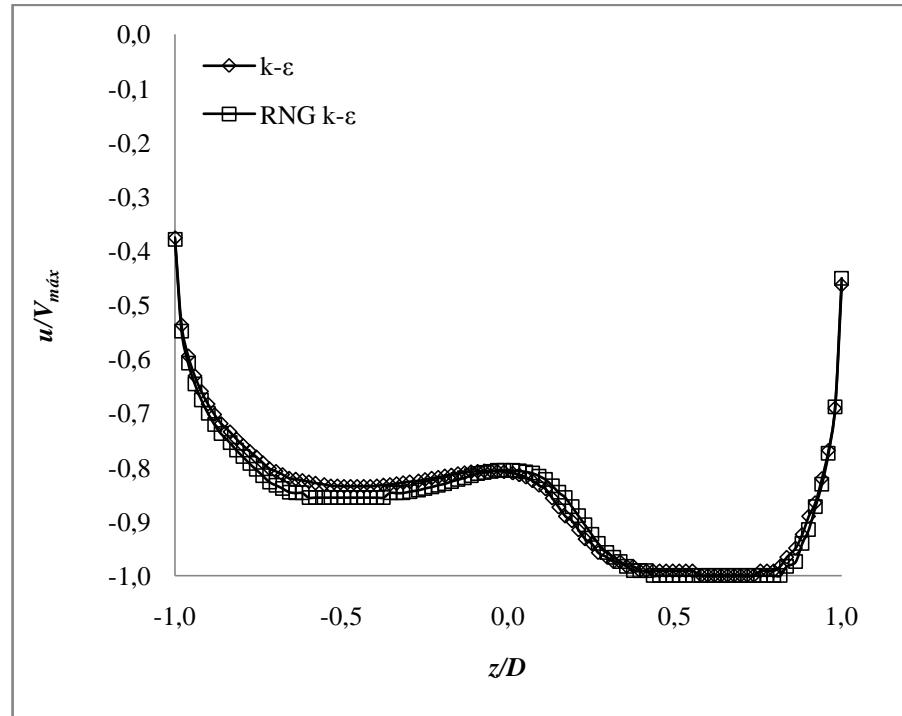


(d)

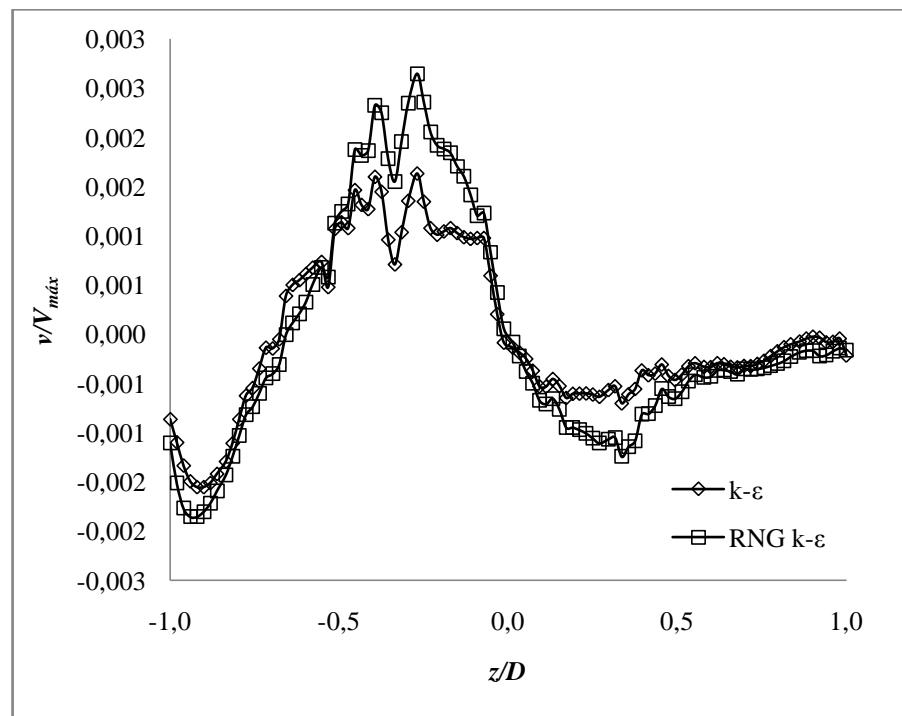
**Figura 4.8:** Resultados na direção  $y$  para os modelos de turbulência  $k-\varepsilon$  e RNG  $k-\varepsilon$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente  $u$  adimensional; (c) componente  $v$  adimensional; (d) componente  $w$  adimensional.



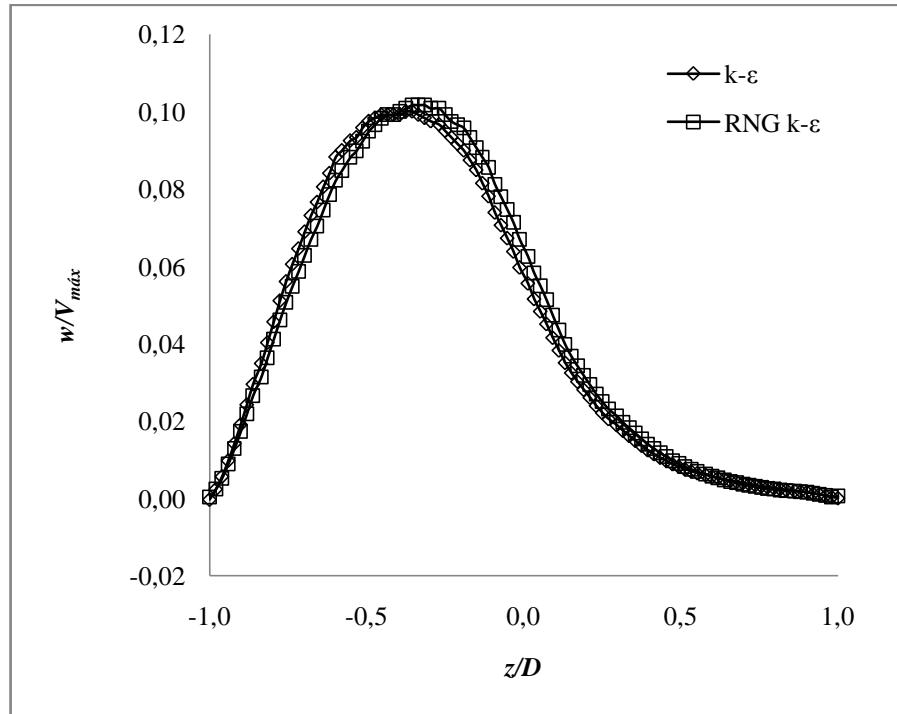
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.9:** Resultados na direção  $z$  para os modelos de turbulência  $k-\varepsilon$  e RNG  $k-\varepsilon$ : (a) velocidade global adimensional; (b) componente  $u$  adimensional; (c) componente  $v$  adimensional; (d) componente  $w$  adimensional.

É notável que a diferença entre os perfis de velocidade obtidos com os dois modelos é razoavelmente pequena e desprezível, *a priori*, para os fins de medição de vazão. O trabalho de Hilgenstock e Ernst [18] apresentou diferenças significativas na comparação entre estes dois modelos. Pode-se atribuir a esta divergência de conclusões o fato de que neste trabalho não foi feito novo teste de malhas para o modelo RNG  $k-\varepsilon$ , ou ainda o fato de que a malha utilizada no presente trabalho é, consideravelmente, mais refinada que a do trabalho em comparação, fazendo com que o modelo  $k-\varepsilon$  já reproduzisse resultados razoáveis.

## 5 Comentários Finais e Recomendações

As conclusões alcançadas com estes resultados e as recomendações para futuros trabalhos que foram percebidas durante a produção do trabalho são retratadas nas seções seguintes.

### 5.1 Conclusões

Para a elaboração deste projeto de graduação foram realizadas simulações numéricas que visavam estudar comportamento de perfis de velocidade à jusante de acidentes de linha típicos da indústria de petróleo e gás natural e a influência de perfis perturbados na qualidade da mediação de vazão por ultra-som. Os principais objetivos foram alcançados e várias recomendações para futuros trabalhos foram percebidas ao longo do desenvolvimento deste projeto. Os dados utilizados nas simulações numéricas foram inspirados em valores típicos e as hipóteses e modelos matemáticos e numéricos adotados foram considerados satisfatórios para esta abordagem prévia.

Notou-se que a escolha de um parâmetro significativo para a análise no teste de sensibilidade de malha não é um assunto simples. O critério adotado, de analisar os perfis de velocidade, não mostrou-se completamente satisfatório e efetivo, em função de não apresentar nenhum resultado assintótico ou, ao menos, que deixasse claro que uma malha já reproduz com suficiente fidelidade outra mais robusta.

Os resultados apresentaram comportamento esperado quando comparados com alguns trabalhos semelhantes da literatura. Além disso, mostraram perfis de velocidade razoavelmente alterados (perturbados) em comparação com o perfil completamente desenvolvido esperado para o número de Reynolds relativo às respectivas condições de escoamento. O modelo de turbulência utilizado, o  $k-\epsilon$ , mostrou, *a priori*, comportamento razoável e o teste básico realizado com outro modelo de turbulência, o RNG  $k-\epsilon$ , não mostrou diferenças significativas nos resultados, o que não era esperado, pois Hilgenstock e Ernst [18] mostraram resultados de simulações com o modelo RNG  $k-\epsilon$  que se ajustavam relativamente melhor que os obtidos com o modelo  $k-\epsilon$  quando comparados com dados obtidos experimentalmente.

A grande dificuldade da indústria de petróleo e gás natural hoje é lidar com acidentes de linha em lugares nos quais não há condições de se ter trechos retos desejáveis para o completo desenvolvimento do escoamento. A determinação das incertezas ocorridas em medições que

fogem dos parâmetros normatizados ainda não é uma ciência dominada e é carente de estudo no Brasil.

## 5.2 Dificuldades Encontradas

Na elaboração deste trabalho, alguns pontos de dificuldade merecem destaque, a saber:

- Dificuldade de obtenção de dados precisos de geometria e condições de trabalho da instalação que serviu de motivação para o trabalho. Como são dados da empresa, muitos deles são sigilosos, o que dificultou a comparação com resultados reais para melhor controle da qualidade da malha e do modelo;
- Dificuldade de reprodução do escoamento estudado no Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo. Para a tubulação de 12 polegadas não é possível instalar curvas no trecho de teste e também não há instrumentação de levantamento de perfil para comparação e validação;
- Dificuldade de garantir a validação do teste de sensibilidade de malha para escoamento não desenvolvido. A escolha de um parâmetro que governa o problema de fato não é trivial e a malha foi levada ao limite do computador utilizado.

## 5.3 Recomendações para Futuros Trabalhos

A abordagem numérica, por si só, requer a análise da influência de muitos parâmetros e a influência dos acidentes de linha na medição de vazão é algo que ainda deve ser mais estudado pela ciência. A união destas duas ferramentas já foi percebida como algo promissor e eficaz, mas ainda não é uma realidade. O desenvolvimento deste trabalho trouxe algumas percepções de possíveis continuações e complementações úteis a estas ciências, tais como as sugestões listadas a seguir.

- *Abordagem mais criteriosa dos diferentes modelos de turbulência e da influência dos mesmos no perfil de velocidades para diferentes acidentes de linha.* Sabe-se que os modelos de turbulência tendem a ser mais bem sucedidos, isto é, apresentar resultados melhores e mais confiáveis, em certas situações de escoamento. A presença de vórtices e o aumento do número de Reynolds podem ser características que não sejam tão favoráveis à utilização de modelos mais simples como o k- $\varepsilon$ , e é necessário, então, um estudo mais incisivo sobre a influência dos diferentes modelos de turbulência aplicados às simulações de situações típicas de medição de vazão.

- *Comparação de resultados experimentais com resultados obtidos numericamente.* Seria interessante um trabalho que apresentasse um aparato experimental bem definido e com tecnologia suficiente para extrair parâmetros precisos do escoamento (como as tecnologias LDA e PIV citadas no texto) para que se pudesse criticar a qualidade dos resultados numéricos para diversos arranjos da tubulação.
- *Análise do comportamento do fator de calibração  $k$  para diferentes arranjos da tubulação à montante e dos transdutores do medidor por ultra-som.* Seria de grande utilidade a obtenção de uma espécie de tabela na qual se entrasse com as informações de disposição e quantidade dos transdutores, acidentes à montante do medidor, número de Reynolds do escoamento e pudessem ser obtidos os erros envolvidos na medição para tal. Pode ser que haja algum parâmetro adimensional em relação ao qual o erro não varie para um mesmo conjunto de arranjo da tubulação e dos transdutores, por exemplo.
- *Análise da influência do ângulo de instalação dos transdutores na medição de vazão de perfis perturbados.* Esta abordagem já foi feita em artigos, contudo merece maior estudo. Como muitas vezes o trecho reto necessário para desenvolver completamente o escoamento é algo fora da realidade, é importante procurar medidas que amenizem a incerteza envolvida em função dos acidentes de linha. Uma solução para isso pode ser a rotação dos transdutores em torno do eixo longitudinal da tubulação. Já se sabe que isso influencia na medição e que há até mesmo posições indesejáveis em função de condições operacionais, tais como a presença de bolhas. Enfim, é interessante que um estudo mais profundo sobre isso seja feito.
- *Investigação do comportamento de condicionadores de fluxo em série para diferentes acidentes de linha.* A literatura mostra que cada modelo de condicionador de fluxo é mais eficaz em relação à correção de alguma perturbação. Assim, pode ser que, mesmo causando maior perda de carga, seja interessante, para algumas situações, o uso de dois condicionadores de fluxo de modelos diferentes ou não em série após um acidente de linha.
- *Estudo da influência dos parâmetros de simulação e das condições de contorno.* Uma vez que a geometria proposta neste trabalho é inspirada em um caso real, no qual à montante do início da tubulação considerada há um tanque, é interessante que se estude a variação das condições na seção de medição ao se eliminar a simplificação de perfil de velocidades uniforme na entrada, considerando parte do

tanque do qual o gás de *flare* é ejetado como parte do domínio. Essa consideração faria com que a simulação representasse mais fielmente as condições de entrada na tubulação de 12 polegadas.

- *Teste com fluidos diversos e diferentes condições de escoamento.* Tendo em vista que a indústria de petróleo e gás compreende gás natural e outros hidrocarbonetos de diferentes propriedades, é natural a busca por mais simulações numéricas que abranjam o gás natural (modelado como gás natural ou como gás ideal, conforme proposta de Salgado e Ramos [33]), os óleos produzidos em plataformas em seus diferentes graus e ainda os escoamentos multifásicos que acontecem nesta indústria.
- *Verificação da influência do raio de curvatura de curvas à montante de medidores de vazão.* É possível e provável que a variação do raio de curvatura das curvas que causam os efeitos de perturbação na seção de medição possa atenuar as faixas de erro e incertezas obtidas na medição de vazão. Esta análise pode ser feita de maneira independente e, em seguida, em conjunto com a investigação da influência do ângulo de instalação dos transdutores ultra-sônicos.
- *Proposta de critério de convergência de malha para escoamentos não desenvolvidos.* Uma das dificuldades encontradas neste trabalho foi adotar um critério que fosse razoável para a escolha da malha a ser utilizada. Em escoamentos não desenvolvidos o critério a ser utilizado não é trivial e é importante que se escolha um parâmetro que seja significativo ao problema.

## 6 Referências

1. **DELMÉE, Gérard Jean.** *Manual de Medição de Vazão.* 3. ed. São Paulo : Edgard Blücher, 2003.
2. **RAMOS, R.** *Desenvolvimento de medidor de vazão de gás por ultra-som: modelagem, protótipo e testes.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória : s.n., 2006. Dissertação de Mestrado.
3. *Wikipedia.* [Acessado em: 20 de out. de 2006.] <http://www.wikipedia.com>.
4. **ANP/INMETRO.** Portaria Conjunta Nº 1, de 19.06.2000 - DOU 20.6.2000. [Acessado em: 21 de out. de 2009.] <http://www.anp.gov.br/>.
5. **LYNNWORHT, L. C. e LIU, Y.** Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report. *Ultrasonics.* 2006, Vol. 44, pp. 1371-1378.
6. *Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters – Transmission Measurement Committee Report No. 9.* American Gas Association. Arlington, Virginia : s.n., 1998.
7. *Tricon.* [Acessado em: 21 de dezembro de 2009.] <http://www.tricongeophysics.com/>.
8. **RAIŠUTIS, R.** Investigation of flow velocity profile in a metering section of an invasive ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation.* 2006, Vol. 17, pp. 201-206.
9. **CALOGIROU, A., BOEKHOVEN, J. e HENKES, R. A. W. M.** Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation.* 2001, Vol. 12, pp. 219-229.
10. **YEH, T. T. e MATTINGLY, G. E.** Computer Simulations of Ultrasonic Flow Meter Performance in Ideal and Non-ideal Pipeflows. *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting.* 1997.
11. *An Intelligent Ulstrasonic Flow Meter for Improved Flow Measurement and Flow Calibration Facility.* **YEH, T. T., ESPINA, P. I. e OSELLA, S.A.** Budapest : s.n., 2001. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. pp. 1741-1746.

12. **LANSING, J.** *Ultrasonic Meter Station Design Considerations*. Design Considerations for USMs, AGA. 2004.
13. **SANDERSON, M.L. e YEUNG, H.** Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2002, Vol. 13, pp. 125-142.
14. **MATTINGLY, G. E. e YEH, T. T.** *NBS' Industry-Government Consortium Research Program on Flowmeter Installation Effects: Summary Report with Emphasis on Research Period July - December 1987*. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. 1988. pp. 1-82.
15. —. Effects of pipe elbows and tube bundles on selected types of flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1991, Vol. 2, pp. 4-13.
16. **BRANCH, J. C.** The effects of an upstream short radius elbow and pressure tap location on orifice discharge coefficients. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1995, Vol. 6, pp. 157-162.
17. **HOLM, M., STANG, J. e DELSING, J.** Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects. *Measurement*. 1995, Vol. 15, pp. 235-244.
18. **HILGENSTOCK, A. e ERNST, R.** Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics - CFD vs experiments? *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996, Vol. 7, pp. 161-171.
19. **WENDT, G., et al.** Systematic investigation of pipe flows and installation effects using laser Doppler anemometry - Part I. Profile measurements downstream of several pipe configurations and flow conditioners. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996, Vol. 7, pp. 141-149.
20. **MICKAN, B., et al.** Systematic investigation of pipe flows and installation effects using laser Doppler anemometry - Part II. The effect of disturbed flow profiles on turbine gas meters- a describing empirical model. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996, Vol. 7, pp. 151-160.
21. **MICKAN, B., et al.** Systematic investigation of flow profiles in pipes and their effects on gas meter behaviour. *Measurement*. 1997, Vol. 22, pp. 1-14.

22. **FLETCHER, S. I., NICHOLSON, I. G. e SMITH, D. J. M.** An investigation into the effects of installation on the performance of insertion flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2000, Vol. 11, pp. 19-39.
23. **RUPPEL, C. e PETERS, F.** Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2004, Vol. 15, pp. 167-177.
24. *Emerson Process Management*. [Acessado em: 21 de dezembro de 2009.]  
<http://www.emersonprocess.com/>.
25. **SCHLÜTER, Th. e MERZKIRCH, W.** PIV measurements of the time-averaged flow velocity downstream of flow conditioners in a pipeline. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996, Vol. 7, pp. 173-179.
26. **FRATTOLILLO, A. e MASSAROTTI, N.** Flow conditioners efficiency a comparison based on numerical approach. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2002, Vol. 13, pp. 1-11.
27. **XIONG, W., KALKÜHLER, K. e MERZKIRCH, W.** Velocity and turbulence measurements downstream of flow conditioners. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2003, Vol. 14, pp. 249-260.
28. **ULTRAFLUX.** Ultrasonic transit time flowmeter. [Didatic Handbook]. 2004.
29. **OBAYASHI, H., et al.** Velocity vector profile measurement using multiple ultrasonic transducers. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2008, Vol. 19, pp. 189-195.
30. **MARTINS, R. S. e RAMOS, R.** COB09-0820 Numerical investigation of flare gas flow conditions at metering section. *Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering*. Gramado, RS : s.n., 2009.
31. **CEZANA, F. C.** *Simulação numérica da dispersão de poluentes ao redor de um obstáculo isolado sob diferentes condições de estabilidade*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. 2007. Dissertação de Mestrado.
32. **ANSYS Europe Ltd.** CFX Version 11.0. 2007.

33. **SALGADO, A. L. e RAMOS, R.** COB09-1510 Perfect gas approach validation aiming estimation of thermophysical properties in flare flows considering operational data. *Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering*. Gramado, RS : s.n., 2009.
34. **FOX, R. W., MCDONALD, A.T. e PRITCHARD, P. J.** *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2006.