

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Lucas Zampirole Brandão

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE ARRASTE POR ADIÇÃO DE
POLÍMEROS RÍGIDOS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS**

VITÓRIA

2021

LUCAS ZAMPIROLE BRANDÃO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE ARRASTE POR ADIÇÃO DE
POLÍMEROS RÍGIDOS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira

Co-orientador: Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro

VITÓRIA

2021



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE ARRASTE POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS RÍGIDOS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS

LUCAS ZAMPIROLE BRANDÃO

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Orientador (PPGEM/UFES)

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro
Coorientador (DEM/UFES)

Profa. Dra. Jane Meri Santos
Examinadora Externa (PPGEA/UFES)

Prof. Dr. Luís Fernando Alzuguir Azevedo
Examinador Externo (PGMEC/PUC-Rio)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Vitória (ES), 10 de fevereiro de 2021.

ASSINATURAS (4)

Documento original assinado eletronicamente, conforme MP 2200-2/2001, art. 10, § 2º, por:

LUIS FERNANDO ALZUGUIR AZEVEDO

CIDADÃO

assinado em 11/02/2021 16:41:19 -03:00

JANE MERI SANTOS

CIDADÃO

assinado em 10/02/2021 11:08:31 -03:00

BRUNO VENTURINI LOUREIRO

CIDADÃO

assinado em 10/02/2021 11:15:28 -03:00

RENATO DO NASCIMENTO SIQUEIRA

CIDADÃO

assinado em 10/02/2021 14:16:37 -03:00



INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 11/02/2021 16:41:19 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3)

por ANDRÉIA GUZI EYNG (CIDADÃO)

Valor Legal: ORIGINAL | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

A disponibilidade do documento pode ser conferida pelo link: <https://e-docs.es.gov.br/d/2021-4BV3HM>

“A persistência é o caminho do êxito”
Charles Chaplin

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço à minha família por todo o apoio que me deram em todas as etapas da minha vida. Aos meus pais, Domingos Sávio Gonçalves Brandão e Elizabeth Aparecida Zampirole Brandão, minhas maiores referências, e aos meus irmãos, Carmen Zampirole Brandão e Bernardo Zampirole Brandão, por sempre estarem presentes. À minha esposa, Renata Alves de Moura Boy Brandão, que me incentivou a cada momento e não permitiu que eu desistisse.

Agradeço ao professor e orientador, Renato do Nascimento Siqueira, pelas discussões acerca do assunto deste trabalho, discussões essas que permitiram o desenvolvimento e finalização desta dissertação de mestrado.

Agradeço ao professor e co-orientador, Bruno Venturini Loureiro, por todo suporte e parceria desde a minha graduação. Esses que foram fundamentais para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Agradeço aos meus amigos, Michell Luiz Costalonga e Gabriel Gomes Vargas, pelo companheirismo, apoio e por sempre torcerem por mim.

Agradeço aos amigos que convivi diariamente no LAMEFT, especialmente ao Ciro Neto, Felipe Romão, Guilherme Braggio, Guilherme Novelli, Juliana Roberti, Letícia Ferrari e Rodrigo Gilles por estarem sempre presentes desde o início.

Resumo

O fenômeno de redução de arraste (DR) por adição polimérica, surfactantes e fibras em escoamento turbulentos possui estudos e registros que ultrapassam sessenta anos e aplicações diversas como combate à incêndio, transporte de líquidos e até mesmo na área da medicina. Este trabalho tem o objetivo de aprofundar os estudos sobre os mecanismos de funcionamento deste fenômeno, adquirindo informações detalhadas de um escoamento turbulento de água com aditivo polimérico através de tubos lisos. Para tal, foram necessários adquirir os campos instantâneos de velocidade para cada teste experimental com o auxílio da técnica Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) bidimensional. Assim, é possível obter as propriedades turbulentas de cada experimento e avaliar a influência polimérica. Os testes foram conduzidos para um faixa de número de Reynolds de 17.000 a 50.000 para água e de 19.500 a 40.000 para a solução polimérica. Foram utilizados 200 ppm de Goma Guar em água. O escoamento com este aditivo apresentou uma redução de arraste máxima por volta de 30%, alterações na camada de amortecimento no perfil de velocidade próximo à parede, incremento no perfil RMS das flutuações axiais e redução nas radiais. A tensão de Reynolds mostrou-se reduzir com a adição polimérica.

Palavras-chave: Redução de arraste, soluções poliméricas, velocimetria a laser, escoamento turbulento.

Abstract

The drag reduction phenomenon (DR) by polymeric injection, surfactants and fibers in turbulent flow has studies and records that exceed sixty years and diverse applications such as firefighting, liquid transportation and even in the field of medicine. This work aims to deepen the studies on the mechanisms of operation of this phenomenon, acquiring information about a turbulent flow of water with polymer additive through smooth pipes. To and this, it was necessary to acquire the instantaneous velocity fields for each experimental test with the aid of the two-dimensional Particle Image Velocimetry (PIV) technique. Thus, it is possible to obtain the turbulent properties of each experiment and evaluate the polymeric influence. The tests were conducted for a Reynolds number range from 17.000 to 50.000 for water and from 19.500 to 40.000 for the polymeric solution. 200 ppm of Guar Gum were used in water. Flow with this additive shows a maximum drag reduction of around 30%, changes in the damping layer on the velocity profile close to the wall, increase in the RMS profile of axial fluctuations and reduction in radial. The Reynolds stress was shown to reduce with the polymeric addition.

Keywords: Drag reduction, polymers solution, laser velocimetry, turbulent flow.

Lista de Figuras

1.1	Teste experimental realizado por bombeiros em Nova Iorque. Fonte: F. E. Bailey [1].	10
1.2	Interação das macromoléculas com os vórtices próximos à parede. Fonte: Dubief et al. [2].	13
1.3	Perfis médios de velocidade experimentais e teóricos. Fonte: Adaptado de Procaccia [3]	15
1.4	Superfície com riblet (a) longitudinal e (b) contrafluxo. Fonte: Adaptado de Bacher [40]	16
2.1	Representação do fator de atrito em função do número de Reynolds (1) escoamento laminar; (2) escoamento turbulento em tubos lisos; (3) assíntota de máxima redução de atrito de Virk; (4), (5) e (6) três típicos comportamentos de solução polimérica. Fonte: A. Gyr. [4]	19
2.2	Representação do perfil de velocidade para um fluido newtoniano. Fonte: H. Tennekes [5].	21
3.1	Representação da técnica de velocimetria por imagem de partículas. Fonte: Adaptado de Raffel et. al. [6].	26
3.2	Esquemático do sincronismo para a aquisição das imagens. Fonte: Adaptado de Insight 4G [7].	29
3.3	Esquemático da correlação cruzada entre janelas de interrogação. Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics [8]	31
4.1	Esquema da montagem experimental. Fonte: Próprio autor.	34
4.2	Bancada montada no LAMEFT - UFES.	34

4.3	Projeto da peça para a união dos tubos com tomada de pressão. Fonte: Próprio autor.	35
4.4	Medidor de vazão eletromagnético. Fonte:Yokogawa Electric Corporation [9]. .	36
4.5	Relação entre a câmera e o laser. Fonte: Próprio autor.	37
4.6	Estrutura química da Goma Guar. Fonte: Abdulbari, 2014 [10].	38
4.7	Características redutoras de arraste para diferentes tipos de Goma Guar. Fonte: Abdulbari [10].	39
4.8	Relação da queda de pressão com o tempo de teste, para $Re_{\tau} \approx 1744$ com 200 ppm de Goma Guar.	42
4.9	Imagem utilizada para calibração. O diâmetro interno é delimitado pela região com partículas entre as linhas vermelhas.	43
4.10	Reômetro HAAKE MARS III. Fonte: Thermo Fisher Scientific.	44
4.11	Resultado reológico para a solução polimérica (água com 200 ppm de Goma Guar).	45
5.1	Resultado para o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução polimérica com 200 ppm em massa de Goma Guar.	48
5.2	Resultados do fator de atrito hidrodinâmico dos experimentos de água e solução polimérica com 200 ppm em massa de Goma Guar em coordenadas de Prandtl - von Karman.	49
5.3	Campo bidimensional instantâneo de magnitude da velocidade para água com $Re = 3,2 \times 10^4$	51
5.4	Campo de velocidade média de um escoamento de água com $Re = 3,2 \times 10^4$. .	52
5.5	Perfis adimensionais de velocidade axial u^+ , em função de r/D para escoamento de água.	53
5.6	Perfis adimensionais de velocidade axial u^+ , em função de r/D para escoamento de água, do centro do tubo à parede.	54
5.7	Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede para diferentes números de Reynolds.	54
5.8	Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações axiais para o escoamento de água.	56
5.9	Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações radiais para o escoamento de água.	57

5.10	Perfis da tensão de Reynolds adimensional em função de y^+ para escoamento de água.	58
5.11	Tensão de Reynolds adimensionalizada em função de r/D para escoamento de água.	59
5.12	Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$	60
5.13	Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$	61
5.14	Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$	61
5.15	Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$	62
5.16	Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$	63
5.17	Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$	63
5.18	Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$	64
5.19	Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$	64
5.20	Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e soluções poliméricas.	65
5.21	Perfis de velocidade turbulenta axial u'_{RMS} para, $Re_\tau \approx 1744$. (a) água. (b) solução polimérica 200 ppm Goma Guar.	67
5.22	Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$	68
5.23	Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$	69
5.24	Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$	69
5.25	Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$	70

5.26	Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$	71
5.27	Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$	71
5.28	Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$	72
5.29	Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$	72
5.30	Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$	73
5.31	Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$	74
5.32	Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$	74
5.33	Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$	75
5.34	Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de r/D , para água com $Re_\tau \approx 1744$ e as soluções polimérica.	76
B.1	Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1042$	86
B.2	Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1427$	87
B.3	Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1584$	87
B.4	Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1744$	88

Lista de Tabelas

5.1	Testes experimentais para água.	47
5.2	Testes experimentais para 200ppm de Goma Guar.	47
5.3	Comparação das vazões medidas.	50

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Motivação	9
1.2 Objetivo	11
1.3 Estado da arte	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Revisão conceitual	17
2.2 Equações básicas	21
3 Velocimetria por imagem de partículas - PIV	25
3.1 Princípio de funcionamento	25
3.2 Fluido de trabalho	27
3.3 Partículas traçadoras	27
3.4 Iluminação por laser	28
3.5 Aquisição das imagens	29
3.6 Processamento das imagens	30
3.7 Pós-processamento das imagens	31
4 ABORDAGEM EXPERIMENTAL	33
4.1 Montagem experimental	33
4.1.1 Bomba Centrífuga	35
4.1.2 Medidor de diferencial de pressão	35

4.1.3	Medidor de vazão	35
4.1.4	Tubulação	36
4.1.5	Seção de teste	36
4.2	Sistema PIV	37
4.3	Polímero redutor de arraste	38
4.4	Procedimento experimental	39
4.4.1	Preparo da bancada experimental	40
4.4.2	Preparação do fluido	40
4.4.3	Ajuste do PIV e queda de pressão	41
4.4.4	Calibração	42
4.4.5	Processamento das imagens	43
4.4.6	Medição da viscosidade e massa específica	44
5	RESULTADOS	46
5.1	Validação da bancada experimental	47
5.1.1	Resultados para o fator de atrito hidrodinâmico	48
5.1.2	Resultados da vazão volumétrica	49
5.1.3	Perfis de velocidade média	50
5.1.4	Flutuações da velocidade	55
5.1.5	Tensão de Reynolds	57
5.2	Resultados para a solução polimérica	59
5.2.1	Perfis de velocidade média	60
5.2.2	Flutuações da velocidade	65
5.2.3	Tensão de Reynolds	73
6	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
A	ANÁLISE DE INCERTEZAS	84
B	REPLICAÇÕES	86

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nesta seção será apresentada uma revisão, em ordem cronológica, sobre o estudo em redução de arraste pela adição polimérica. Citando também os trabalhos que possuem certa relevância e contribuíram para o crescimento desta área. Assim, o leitor compreenderá os conceitos fundamentais para o entendimento do fenômeno mesmo sem formação no assunto.

1.1 Motivação

O primeiro registro do fenômeno de redução de arraste veio com Toms [11], nele constatou-se uma considerável diminuição do fator de atrito em escoamentos turbulentos através de adição de polímeros que possuíam alto peso molecular. A partir daí, observou-se o grande potencial desta descoberta. Houve então um crescimento no número de estudos deste fenômeno com intuito de conhecer e entender seus princípios de funcionamento.

Ao longo do transporte de qualquer fluido, principalmente com elevado número de Reynolds, há uma significativa perda de carga. Com o incremento do número de Reynolds ocorre, conseqüentemente, aumento da energia necessária para promover o escoamento. A utilização de redutores de arraste pode ser uma alternativa para a diminuição da perda de carga. Uma aplicação bastante conhecida é o oleoduto “Trans-Alaska Pipe Line” onde, segundo Burger e Chorn [12], através de 12 estações diferentes de bombeamento houve redução de 40% do fator de atrito ao longo de uma linha de 1300 km de extensão.

Diferentes localidades como no estreito de Bass na Austrália, em Mumbai e no oleoduto Iraque-Turquia também são exemplos de utilização de redutores de arraste poliméricos em dutos de óleo bruto [13]. Uma outra aplicação bem conhecida deste fenômeno é a utilização de soluções poliméricas para combate em incêndio como citado por Fabula [14] e Figueredo e Sabadini [15]. Neste caso, com a redução do atrito, houve um maior alcance do jato e vazão nos esguichos, como mostra a Figura 1.1.



Figura 1.1: Teste experimental realizado por bombeiros em Nova Iorque. Fonte: F. E. Bailey [1].

Há também registros do emprego da redução de arraste por injeção de polímeros em outros contextos como, aumentar a velocidade de embarcações [16], em sistemas de transporte de água, suspensões e lama [17], prevenção de cavitação e diminuição de ruídos em turbobombas [18].

Como visto anteriormente, nas últimas décadas, esse fenômeno vem ganhando espaço e despertando interesse da comunidade acadêmica de variadas áreas. Porém, ainda há muito a ser respondido, principalmente em relação à compreensão da interação entre as moléculas poliméricas e as estruturas turbulentas do escoamento. Essa interação é fundamental para que ocorra a redução de arraste, porém também é responsável pela quebra das macromoléculas, gerando degradação polimérica e aumentando o arraste. O entendimento desse mecanismo se torna fundamental para elaboração de teorias mais consistentes e que se tenha garantia do benefício de sua aplicação.

O fenômeno de redução de arraste, além das aplicações citadas anteriormente, é significativo para o estudos da dinâmica de fluidos, principalmente, para o conhecimento da estrutura do escoamento turbulento.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é analisar a influência da adição polimérica na redução de atrito em escoamentos turbulentos em tubo liso, verificando a queda de pressão, e com a técnica de PIV (velocimetria por imagens de partículas), o perfil de velocidade média, tensão de Reynolds, flutuações e alterações próximas à parede. Com esses, é possível verificar as alterações nas estruturas turbulentas.

1.3 Estado da arte

O trabalho realizado por Savins [19] foi o pioneiro em apresentar uma definição para este fenômeno, usando como base a comparação da queda de pressão na linha da solução e do solvente puro. Então, para uma mesma vazão e mesmo tubo, como mostra a Equação 1.1, a razão de arraste será a queda de pressão da solução (Δp) sobre a queda de pressão do solvente (Δp_o) da solvente. Assim se houver realmente redução teremos um valor de $DR < 1$.

$$D_R = \frac{\Delta p}{\Delta p_o} \quad (1.1)$$

E a definição de redução de arraste é dada conforme a Equação 1.2.

$$D_R(\%) = (1 - D_R) \times 100 \quad (1.2)$$

Já Lumley [20] usou o fator de atrito no regime turbulento como parâmetro para definir a redução de arraste, comparando o valor deste para solução com a do solvente puro para um mesmo número de Reynolds. A Equação 1.3 mostra algebricamente a definição onde f_o é o fator de atrito do solvente puro e f o fator de atrito da solução. Essa é a definição utilizada para quantificar o DR neste trabalho.

$$D_R(\%) = \left(1 - \frac{f}{f_o}\right) \times 100 \quad (1.3)$$

O trabalho de Lumley [21] também diz que a redução de arraste está ligada com as alterações nas escalas turbulentas, isso devido à presença destes aditivos. Comenta também que a extensão das moléculas poliméricas tem efeito fora da subcamada laminar, gerando um acréscimo da viscosidade efetiva nessa região.

Virk [22, 23, 24] realizou grandes trabalhos sobre este assunto. Mostrando que o começo da redução de arraste por adição de polímeros se dá de maneira bem definida. Verificou-se também a eficiência da mesma através da modificação de algumas variáveis como número de Reynolds, peso molecular, concentração e vazão. Nos estudos foi constatado que a redução de arraste é diretamente proporcional ao incremento do número de Reynolds, concentração e peso molecular do polímero, sendo que a eficiência depende bastante da qualidade do solvente e que os bons solventes são aqueles que permitem que as moléculas dos polímeros fiquem menos enovelados.

Virk percebeu que o efeito de redução de arraste crescia até certo ponto, limitada por uma assíntota. Assim propôs a assíntota de máxima redução de arraste (MDR), ou simplesmente assíntota de Virk. Essa se mostrou independente do diâmetro da tubulação e do tipo do polímero [23].

Há maneiras diferentes de se alcançar a máxima redução de arraste, uma delas é fixando a concentração polimérica e aumentando o número de Reynolds. Outra se dá fixando o número de Reynolds e aumentando a concentração. Além dessas, é possível chegar ao MDR com o aumento do peso molecular do polímero [22]. Porém quando a máxima redução de arraste é atingida pelo acréscimo da concentração, qualquer incremento da mesma causará um aumento do arraste [25].

Ainda que existam muitos estudos sobre o tema de redução de arraste, até então não há um consenso sobre o mecanismo físico deste fenômeno. As hipóteses se dividem em duas linhas; uma baseada nos efeitos viscosos [26, 21, 27, 28, 29, 30] e outra nos efeitos elásticos [31, 32, 33, 34].

O primeiro trabalho a sugerir a teoria elástica foi Tabor e De Gennes [31], nele é proposto que os polímeros atuam como pequenas molas absorvendo a energia de vórtices menores, modificando-as em energia elástica, e assim devolvem ao escoamento, caso o tempo de relaxação do polímero seja suficiente. Esse tempo de relaxação é o tempo que o polímero leva para voltar a seu estado de equilíbrio e isso está diretamente ligado às propriedades reológicas [35]. Nessa teoria

a redução está ligada ao aumento do módulo de elasticidade da solução, onde a cascata de turbulência é interrompida prematuramente pela ação dos polímeros que impedem a formação dos pequenos vórtices.

Em 2004, Dubief et al. [2] propôs uma maneira de descrever a interação do escoamento turbulento com as moléculas de polímeros flexíveis. De acordo com os autores, as macromoléculas interagem com o escoamento de forma ordenada e cíclica, ora armazenando energia dos vórtices e ora cedendo essa energia acumulada (veja a Figura 1.2). O polímero, que inicialmente está enrolado, quando próximo à parede, interage com o vórtice armazenando a energia cinética ($E_\alpha < 0$). Quando enviado outra vez para às regiões próximas das paredes o polímero estica e devolve a energia cinética na direção principal do escoamento.

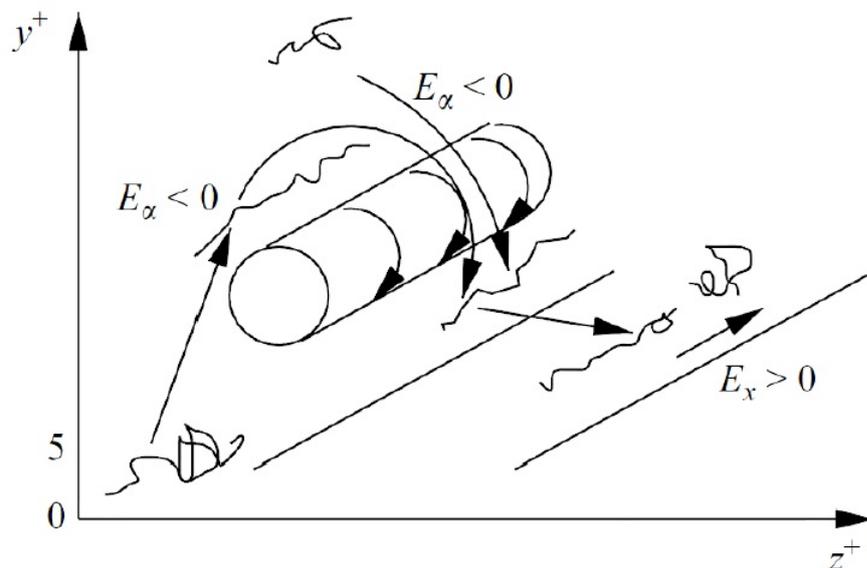


Figura 1.2: Interação das macromoléculas com os vórtices próximos à parede. Fonte: Dubief et al. [2].

Vale salientar ainda que a teoria elástica propõe uma nova explicação do mecanismo de redução de arraste, isso não implica que a teoria viscosa esteja incorreta [33]. Como, por exemplo, no caso de polímeros rígidos onde a teoria elástica não se aplica, pois, as moléculas não se enrolam nem esticam. Neste contexto, a teoria viscosa se encaixa melhor.

A teoria viscosa considera que o polímero, quando esticado, tem um aumento da viscosidade efetiva da ordem de dez mil [27]. Isso faz com que as tensões de Reynolds sejam suprimidas,

com isso a velocidade média do escoamento é aumentada [30]. Nesses casos o aumento de viscosidade provoca um crescimento da dissipação de energia, porém este incremento é pequeno se comparado com o efeito da redução de arraste [30].

Como descrito, é fundamental o entendimento das interações que ocorrem próximo às paredes. Procaccia [3] comenta que para entender o fenômeno de redução de arraste é necessário compreender que o fluxo de momento na parte central para a parede está relacionado ao atrito. Não é natural dizer que a adição de polímeros, que aumentam a viscosidade da solução, tragam alguma vantagem ao escoamento, a menos que se compreenda que a diminuição da tensão de Reynolds próximos da parede é fundamental para que ocorra a redução de arraste. Esta afirmação é verificada por Warholic [36], onde, utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partícula, encontrou tensões de Reynolds próximas a zero em condições de MDR.

Toonder [26] com dados experimentais de polímeros redutores de arraste, mostrou que há um deslocamento da região logarítmica para cima de maneira paralela quando se comparado a um fluido newtoniano por efeito do aumento da *buffer layer*.

White [37] também diz que a alteração no perfil de velocidade médio se dá principalmente na *buffer layer* quando há redução de arraste na parede. Este fenômeno faz com que a natureza e, até mesmo, a intensidade dos vórtices se modifiquem, causando uma alteração na estrutura da camada turbulenta perto da parede. Para exemplificar essa alteração no perfil de velocidade médio, Procaccia [3] compilou dados experimentais e teóricos comparando com a lei da parede para fluidos newtonianos. A Figura 1.3 também apresenta sua própria MDR.

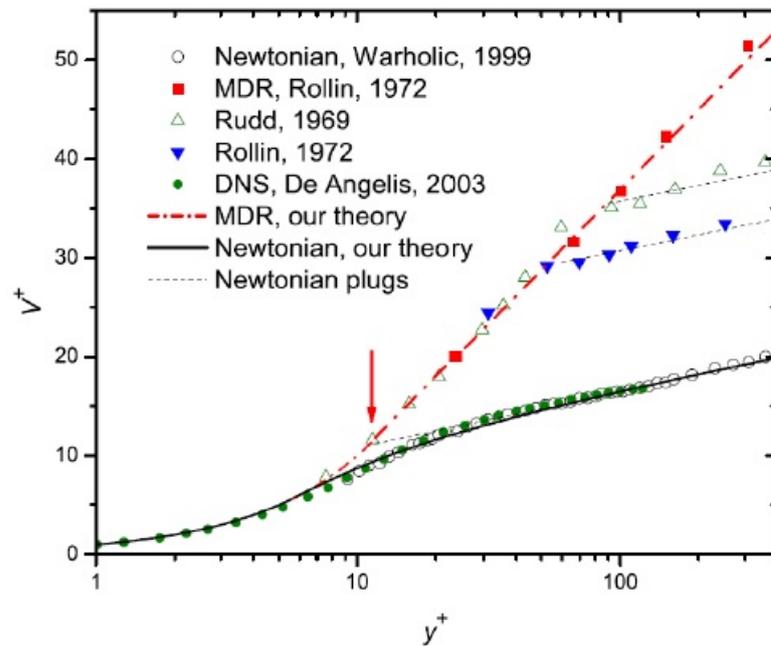


Figura 1.3: Perfis médios de velocidade experimentais e teóricos. Fonte: Adaptado de Procaccia [3]

É sabido que a adição de polímeros redutores de arraste faz com que o escoamento sofra alterações na turbulência e, conseqüentemente, nas flutuações quando se compara ao solvente puro. Ptasiński [38] notou que há aumento das flutuações de velocidade axiais, para pequenas concentrações poliméricas. Já as flutuações na direção normal ao escoamento, para concentrações elevadas, diminuía, contribuindo para a redução de atrito.

Todos os estudos apresentados se tratam de métodos ativos de promover a redução de arraste. Em 2015, Abdulbari [39] evidenciou algumas técnicas, inspiradas na própria natureza como a pele de golfinhos, que podem ser empregadas de maneira que ocorra uma redução passiva de arraste. Isso se dá pela reformulação da parede interna da tubulação, os *Riblets*. Dessa maneira, é possível orientar o escoamento evitando a formação de vórtices, o que implica em gasto energético. A Figura 1.4 apresenta um esquemático do funcionamento dos *Riblets*.

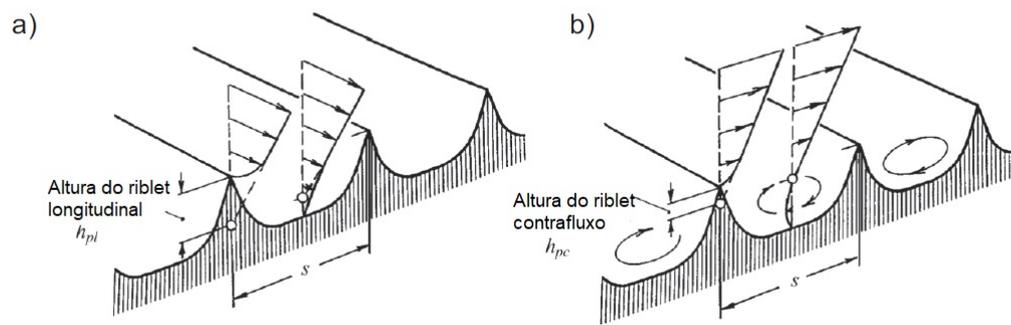


Figura 1.4: Superfície com riblet (a) longitudinal e (b) contrafluxo. Fonte: Adaptado de Bacher [40]

Com o estudo apresentado, é notável a relevância e a quantidade de estudos que abordam o tema de redução de arraste. Porém, este efeito ainda possui lacunas a serem respondidas. Neste trabalho, com o auxílio da técnica de PIV, busca-se um melhor entendimento deste assunto.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão mostradas algumas equações importantes para o problema em questão. Bem como, o princípio de funcionamento da técnica de medição que foi utilizada neste trabalho (Velocimetria por Imagem de Partícula).

2.1 Revisão conceitual

Quando o fenômeno de redução de arraste está presente no escoamento é observado uma diminuição na queda de pressão, se comparado a um escoamento com mesma configuração para água. Para o cálculo da redução de arraste (DR) foi utilizado a Equação 1.3 proposta por Lumley [20], que utiliza a razão entre o fator de atrito da solução polimérica e a de solvente puro.

Para se conhecer o real valor do fator de atrito de cada teste, serão necessários alguns parâmetros experimentais. Como primeira etapa temos o cálculo da tensão de cisalhamento na parede (τ_w). Considerando um balanço de forças em um tubo de diâmetro D com um escoamento turbulento completamente desenvolvido, é possível calcular a tensão de cisalhamento na parede pela Equação 2.1 [41]. Essa é válida para fluidos newtonianos e não-newtonianos.

$$\tau_w = \frac{D}{4} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Onde $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ é o gradiente de pressão axial. O fator de atrito de Darcy pode ser obtido através da tensão de cisalhamento na parede a partir da Equação 2.2 [41].

$$f = \frac{4\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_b^2} \quad (2.2)$$

Onde U_b é a velocidade média do escoamento e ρ é a massa específica do fluido.

Como dito anteriormente, a redução de arraste ocorre exclusivamente em escoamentos turbulentos. Então para valores pequenos do número de Reynolds, escoamento laminar, a lei de Poiseuille é válida, Equação 2.3.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.3)$$

Com o número de Reynolds (Re), definida pelo Equação 2.4.

$$Re = \frac{\rho U_b D}{\mu_\infty} \quad (2.4)$$

Onde μ_∞ é a viscosidade no patamar newtoniano inferior do fluido e D o diâmetro do tubo.

Com o aumento do número de Reynolds temos a região de transição e posteriormente o regime turbulento. Assim, para o regime turbulento com o número de Reynolds menor que 10^5 , tubo liso e fluido newtoniano o estudo empírico de Blasius, Equação 2.5, fornece uma boa representação para o fator de atrito.

$$f = 0,316 Re^{-0,25} \quad (2.5)$$

Como descrito no capítulo anterior, Virk desenvolveu vários trabalhos sobre o fenômeno da redução de arraste [23]. Em um destes estudos, foi equacionado a assíntota de máxima redução

de arraste (MDR), também conhecida como assíntota de Virk. O equacionamento da assíntota de Virk é apresentado na Equação 2.6.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 9,5 \log_{10} (Re \sqrt{f}) - 19,06 \quad (2.6)$$

Como visto nas equações anteriores, o fator de atrito pode ser representado em função do número de Reynolds, como apresentado na Figura 2.1. Nela, as curvas representam alguns comportamentos característicos para escoamento em tubo liso, a curva 1 o escoamento laminar (Equação 2.3), a curva 2 o fator de atrito para escoamento turbulento liso (Equação 2.5), a curva 3 representa a máxima redução de arraste com adição polimérica (Equação 2.6). Entre as curvas 2 e 3 estão qualquer escoamento com polímero redutor de arraste.

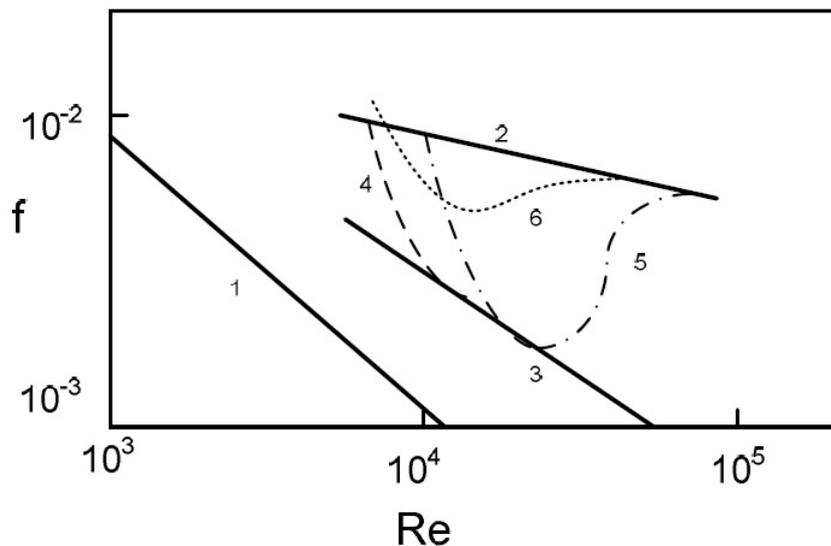


Figura 2.1: Representação do fator de atrito em função do número de Reynolds (1) escoamento laminar; (2) escoamento turbulento em tubos lisos; (3) assíntota de máxima redução de atrito de Virk; (4), (5) e (6) três típicos comportamentos de solução polimérica. Fonte: A. Gyr. [4]

Como o fenômeno de redução de arraste é um fenômeno de parede, se faz necessário adotar um método eficiente para a comparação dos resultados de um escoamento com e sem polímero redutor. Para isso, foi utilizado o número de Reynolds baseado na velocidade cisalhante, como mostra a Equação 2.7.

$$Re_{\tau} = \frac{\rho D u_{\tau}}{\mu_{\infty}} \quad (2.7)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, D o diâmetro da tubulação, μ_{∞} viscosidade no patamar newtoniano inferior do fluido e u_{τ} a velocidade cisalhante calculada pela Equação 2.8.

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.8)$$

Para escoamentos turbulentos de fluidos newtonianos em um duto, uma análise adimensional pode apresentar uma ideia clara sobre a forma do perfil de velocidade média na região perto da parede [5]. Para isso, é conveniente representar o perfil médio adimensional de velocidades em coordenadas de parede y^+ e com velocidades normalizadas pela velocidade de cisalhante, u_{τ} .

As coordenadas de parede são definidas como:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_{\tau}} \quad (2.9)$$

$$y^+ = \frac{y u_{\tau}}{\nu} \quad (2.10)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática do fluido e \bar{u} é a velocidade média de um ponto.

Na Figura 2.2 é apresentada a lei da parede, para fluido newtoniano. Para a subcamada viscosa:

$$u^+ = y^+ \quad \text{se } 0 < y^+ < 5, \quad (2.11)$$

e para camada logarítmica:

$$u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5 \quad \text{se } 30 < y^+, \quad (2.12)$$

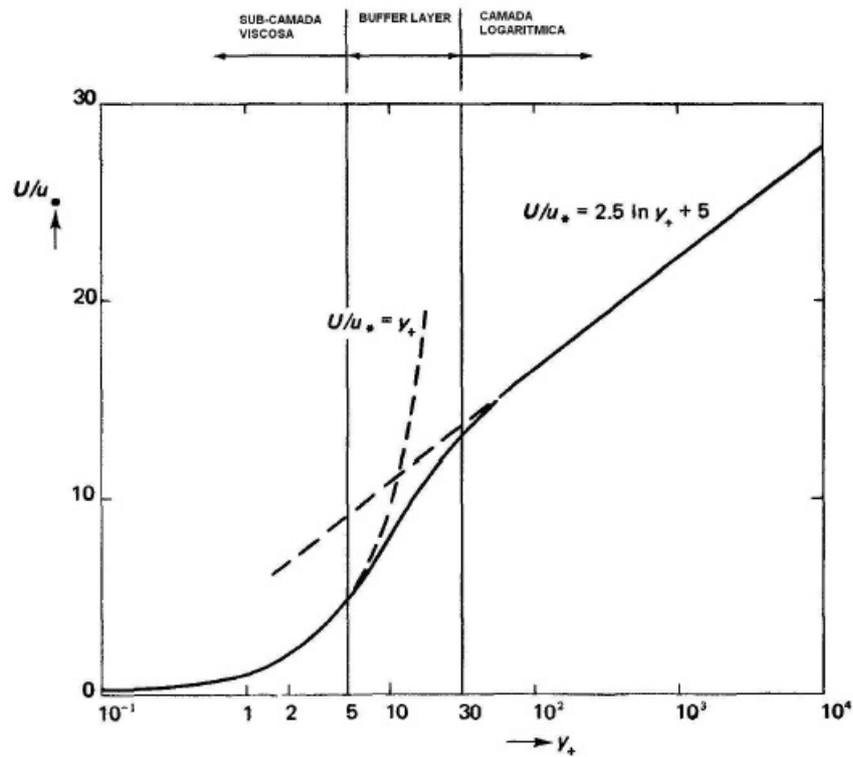


Figura 2.2: Representação do perfil de velocidade para um fluido newtoniano. Fonte: H. Tennekes [5].

2.2 Equações básicas

Como o polímero é bem diluído e com uma massa bem menor que o solvente, adota-se a condição de fluido newtoniano. Assim, a equação da continuidade, Equação 2.13, e a equação da quantidade de movimento, Equação 2.14, podem ser utilizadas para descrever este escoamento incompressível e em regime permanente.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.13)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (2.14)$$

Onde U é a velocidade instantânea, ν a viscosidade cinemática, ρ a massa específica e P a pressão.

A velocidade e a pressão instantâneas podem ser expressas em função de uma média e uma flutuação, Equação 2.15.

$$U = \bar{u} + u'(t); \quad P = \bar{p} + p'(t) \quad (2.15)$$

Com isso, é possível realizar a decomposição de Reynolds como descrito por Tennekes e Lumley [5]. Com a decomposição, encontra-se a Equação 2.16.

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 \bar{u}_i \quad (2.16)$$

Nota-se que há, na Equação 2.16, quatro termos formados. O primeiro é o termo de aceleração convectiva do movimento médio, o segundo é o termo de aceleração convectiva das flutuações turbulentas, o terceiro é o termo de pressão do escoamento médio e o quarto é o termo de viscosidade do escoamento médio.

Usando regras de derivação e rearranjando os termos temos a Equação 2.17.

$$\underbrace{\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_1 = \underbrace{-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}}_2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\underbrace{\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_3 - \underbrace{\overline{\rho u'_i u'_j}}_4 \right) \quad (2.17)$$

Observa-se novamente quatro termos, a interpretação física de cada um é descrita abaixo:

1. Termo de convecção de quantidade de movimento pelo escoamento médio;
2. Termo de gradiente de pressão do escoamento médio;
3. Termo de variação do escoamento médio pelas tensões viscosas;
4. Termo de variação média das flutuações turbulentas;

Os termos 3 e 4 são, respectivamente, tensões viscosas de acordo com a Lei de Newton da viscosidade e tensões turbulentas, conhecida também como tensões de Reynolds. O aparecimento das tensões de Reynolds quando resolvemos a equação da quantidade de movimento (para um escoamento turbulento, permanente e incompressível) faz com que surjam seis novos termos

adicionais, causando um problema de fechamento. Para solucionar esse problema foram elaborados modelos de turbulência que possuem o objetivo de simplificar e, finalmente, resolver a equação. Com o uso da técnica de PIV neste tipo de escoamento, pelo fato de adquirir os campos instantâneos de velocidade, é possível calcular esse termo possibilitando a análise e estudo do mesmo.

Como o escoamento turbulento estudado se dá em um tubo, é apropriado utilizar a Equação 2.17 em coordenadas cilíndricas. Assim, usa-se x , r , θ para as coordenadas axial, radial e angular respectivamente. Considerando o escoamento completamente desenvolvido e que a única componente da velocidade não nula é a componente axial e que todas as estatísticas são função apenas de r , obtemos a Equação 2.18.

$$0 = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\overline{\rho u'_x u'_r} - \mu \frac{d\bar{u}_x}{dr} \right) \right) \quad (2.18)$$

Multiplicando a equação por r e integrando de 0 a r , obtemos a Equação 2.19.

$$-\frac{r}{2} \frac{d\bar{p}}{dx} = \overline{\rho u'_x u'_r} - \mu \frac{d\bar{u}_x}{dr} \quad (2.19)$$

Sabendo que $r = D/2$ e substituindo na Equação 2.19, temos a Equação 2.20.

$$-\frac{D}{4} \frac{d\bar{p}}{dx} = \overline{\rho u'_x u'_r} - \mu \frac{d\bar{u}_x}{dr} \equiv \tau_w \quad (2.20)$$

Onde τ_w é a tensão de cisalhamento média total na parede, como mostrado na Equação 2.1. Como evidenciado pela Equação 2.8, $u_\tau^2 = \tau_w/\rho$, então pode-se reescrever a Equação 2.19 com a Equação 2.20.

$$\rho u_\tau^2 \frac{2r}{D} = \overline{\rho u'_x u'_r} - \mu \frac{d\bar{u}_x}{dr} \quad (2.21)$$

A Equação 2.21 evidencia que a tensão de cisalhamento média total na parede varia linearmente

ao longo do raio do tubo. Para fins comparativos dos resultados experimentais as tensões são adimensionalizadas. Assim, divide-se a Equação 2.21 por ρu_τ^2 .

$$\underbrace{\frac{2r}{D}}_{\tau^+} = \frac{1}{u_\tau^2} \underbrace{(\overline{u'_x u'_r})}_{\tau_r^+} - \frac{1}{\rho u_\tau^2} \underbrace{\mu \frac{d\bar{u}_x}{dr}}_{\tau_s^+} \quad (2.22)$$

Onde τ^+ é a tensão cisalhante total, τ_r^+ é a tensão de Reynolds adimensionalizada e τ_s^+ é a tensão de cisalhamento viscosa adimensionalizada. A Equação 2.22 também foi desenvolvida por Toonder [26] e Pumisacho [42].

Como evidenciado anteriormente pela Equação 2.15, as velocidades instantâneas de cada ponto podem ser expressas pela soma da velocidade média e a flutuação daquele instante. Para a análise do comportamento das flutuações para solvente puro e solução polimérica é calculado a velocidade turbulenta adimensionalizada a partir da Equação 2.23 e 2.24, essa é a média RMS *root mean square* das flutuações sobre a velocidade cisalhante.

$$u_{RMS}^+ = \frac{1}{u_\tau} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (u'_i)^2} \quad (2.23)$$

$$v_{RMS}^+ = \frac{1}{u_\tau} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (v'_i)^2} \quad (2.24)$$

Onde N é o número de campos instantâneos adquiridos.

Capítulo 3

Velocimetria por imagem de partículas - PIV

Neste capítulo será discutido e apresentado uma descrição dos princípios de funcionamento da técnica de medição que foi utilizada neste trabalho. A velocimetria por imagem de partícula, ou PIV, do inglês Particle Image Velocimetry, é uma técnica que, com o avanço tecnológico, vem ganhando espaço e ambientes laboratoriais de pesquisa. Nela, pode-se adquirir campos instantâneos de velocidade em um escoamento de maneira não intrusiva, uma vantagem quando comparado a métodos como anemometria de fio/filme quente e laser Doppler que são pontuais [43]. Nos próximos tópicos serão abordados as informações fundamentais para a aplicação da técnica de velocimetria por imagem de partículas, uma abordagem mais completa pode ser verificada no trabalho de Raffel et. al.[6].

3.1 Princípio de funcionamento

A técnica de PIV permite a aquisição de campos instantâneos de velocidade em um plano projetado pelo laser sobre o escoamento. O princípio básico se dá por meio do deslocamento das partículas traçadoras, que estão dispersas no fluido, em um dado intervalo de tempo, como indicado na Equação 3.1.

$$velocidade = \frac{deslocamento}{tempo} \quad (3.1)$$

A Figura 3.1, retirada de Raffel et. al.[6], auxilia na compreensão da técnica PIV. Nela, o laser gera a luz pulsada que, através de um conjunto de lentes, forma um plano de luz dentro do escoamento. Assim, partículas traçadoras distribuídas no fluido são iluminadas na seção desejada. A câmera fotográfica deverá estar posicionada ortogonalmente ao plano formado. A aquisição das imagens necessitará de sincronismo com o pulso do laser, esse intervalo entre as imagens deve ser definido em função da velocidade do escoamento e da concentração de partículas. Dessa maneira, adquire-se duas imagens das partículas dentro do plano do laser. As imagens obtidas são processadas por um programa de computador que divide a imagem em diversas partes menores conhecidas como janelas de interrogação. Por meio de correlação cruzada as janelas de ambas as fotos são comparadas. Assim, com a calibração das imagens, o intervalo de tempo entre as fotos e o processamento do par de imagens, o campo de velocidade é determinado.

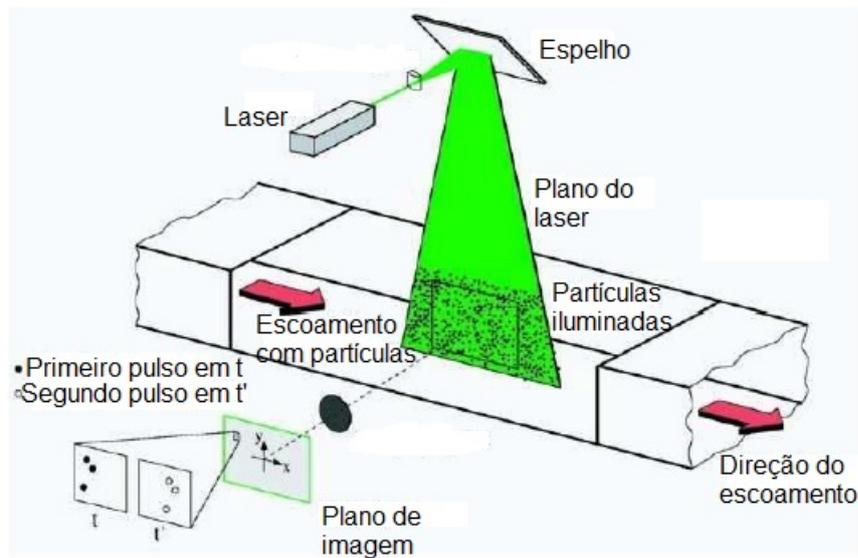


Figura 3.1: Representação da técnica de velocimetria por imagem de partículas. Fonte: Adaptado de Raffel et. al. [6].

3.2 Fluido de trabalho

O fluido possui a exigência de ser translúcido ao comprimento de onda da luz utilizada no processo. Essa, talvez, seja uma das maiores restrições da técnica PIV e de outras técnicas óticas como anemometria laser-Doppler.

Para garantir que as partículas traçadoras acompanhem o fluido, busca-se idealmente que a massa específica dessas seja a mesma do fluido. Os materiais que são utilizados na confecção de partículas apresentam valores de massa específica próximos ao de líquidos, por isso a utilização de líquido como fluido de trabalho facilita a seleção de partículas.

Quando o estudo é realizado em gases, a diferença da massa específica do fluido em relação às partículas traçadoras obrigam a utilização de partículas com dimensões menores para garantir um melhor acompanhamento do fluido. Porém, o registro de imagem é dificultado quando há partículas pequenas, forçando o uso de equipamentos mais sensíveis para captação e mais potentes para emissão luminosa, o que torna o processo mais caro.

É sempre recomendado que o fluido seja corretamente filtrado, antes de ser usado, visando remover as impurezas que possam atrapalhar a obtenção dos resultados.

3.3 Partículas traçadoras

Como o PIV é uma técnica de medição indireta, já que as velocidades calculadas são das partículas, essas são fundamentais nesse sistema de medição, pois são responsáveis pelo espalhamento da luz analisada, devendo então produzir imagens de boa qualidade e seguir o escoamento de forma fiel.

Para que a seleção das partículas seja eficiente, deve-se balancear duas variáveis opostas. Visando minimizar efeitos indesejados, como afetar o escoamento, é recomendado optar por partículas pequenas de modo que fiquem suficientemente dispersas. Porém, é necessário utilizar um volume ótimo para que o campo de velocidade seja completamente preenchido, mas partículas pequenas podem comprometer o espalhamento de luz no escoamento por necessitarem de maior potência de laser. Foi mostrado por Adrian e Yao [44] que, para água, é recomen-

dado partículas de tamanho $d_p \approx 10 \mu\text{m}$ para partículas de poliestireno. Então deve-se conciliar estes fatores: tamanho de partícula grande o suficiente para o espalhamento da luz e o menor possível para acompanhar fielmente o escoamento. As partículas utilizadas neste trabalho foram esferas de vidro ocas providas pela TSI inc., com diâmetro entre 8 a 12 μm na concentração de 15 ppm, condizente com Adrian [45] que recomenda 10^{10} a 10^{12} partículas por metro cúbico de fluido.

3.4 Iluminação por laser

O Sistema de iluminação, na técnica de velocimetria por imagem de partículas, tem como objetivo funcionar como um veículo de transporte de informação ao sistema de velocidades e restringir a região que será estudada. Em princípio, qualquer fonte de luz poderia ser empregada na técnica de PIV. Porém, os lasers são indicados por sua emissão com alta densidade de energia, necessário para que haja o espalhamento das pequenas partículas o suficiente para sensibilizar as câmeras.

Historicamente, os lasers contínuos foram os primeiros a serem utilizados na técnica de PIV, principalmente pelo fato de que esses já eram utilizados nos anemômetros a laser-Doppler. Porém, a técnica de PIV, como discutido anteriormente, requer maior energia em cada pulso de iluminação, então foi necessário a utilização de lasers pulsados de estado sólido.

O laser mais comum empregado no PIV é o Nd-YAG, esse produz feixes de alta energia e curta duração no comprimento de onda de 1064 nm e, ainda assim, sua frequência pode ser dobrada por um cristal, produzindo feixes visíveis na cor verde, com o comprimento de onda de 532 nm.

A desvantagem desse laser é a baixa, para estudos acadêmicos e industriais, taxa de repetição por volta de 10 Hz. Para contornar o problema, na maior parte dos casos, são usadas duas fontes sincronizadas fazendo com que o tempo entre elas seja livremente ajustado.

3.5 Aquisição das imagens

Com os avanços nas câmeras fotográficas, as imagens digitais substituíram as imagens que são geradas por filme químico. Como as imagens digitais eram geradas mais rapidamente, elas possibilitam a visualização do escoamento quase que em tempo real, viabilizando possíveis correções no experimento.

Os sensores das câmeras utilizadas na técnica de PIV podem ser do tipo CCD (*charged coupled device*) ou CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*). A diferença entre esses dois tipos está ligada à relação entre tempo na aquisição das imagens e a qualidade, onde a CCD possui uma melhor qualidade, porém são mais lentas ao contrário da CMOS.

Geralmente, as câmeras com sensores CCD possuem um padrão de 30 Hz, o que causa um tempo relativamente alto entre as fotos, mesmo para escoamentos de baixas velocidades. Então criou-se uma maneira para contornar esse problema, de modo que, mesmo escoamento com altas velocidades as câmeras de 30 Hz podem ser usadas. A Figura 3.2 mostra o sincronismo que é realizado pela técnica *Frame straddling*, onde o primeiro pulso se dá logo antes do fim a primeira exposição e logo após o início da segunda exposição.

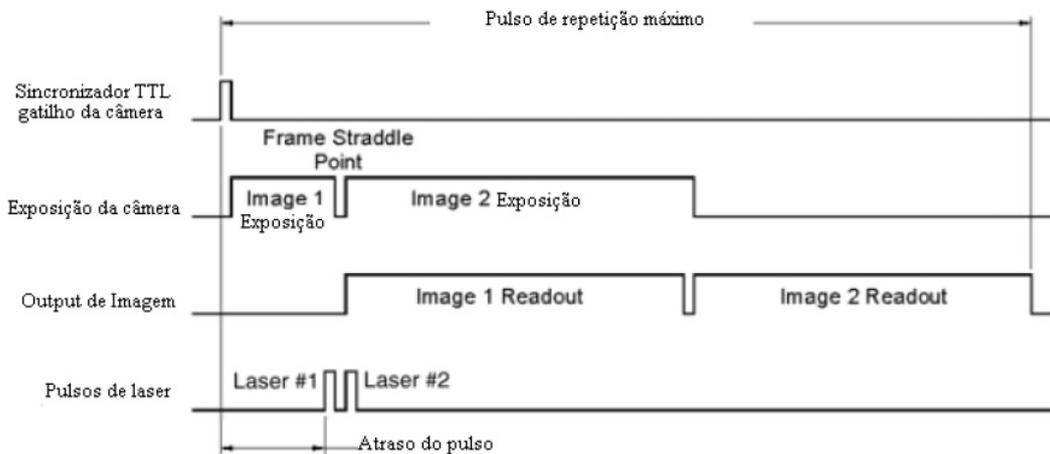


Figura 3.2: Esquemático do sincronismo para a aquisição das imagens. Fonte: Adaptado de Insight 4G [7].

3.6 Processamento das imagens

Com a aquisição dos dois frames consecutivos, o próximo passo é a determinação dos deslocamentos das partículas traçadoras no intervalo de tempo ajustado. A técnica de processamento vai depender da maneira como as fotos foram adquiridas. Caso as duas imagens compartilhem o mesmo quadro, o processamento utiliza o método de auto-correlação de imagens. Porém, se as imagens estão em quadros separados, utiliza-se a técnica de correlação cruzada.

A Correlação cruzada de imagens utiliza uma técnica estatística para definir padrões de semelhança entre as funções, com isso, o deslocamento é calculado a partir de pequenas regiões contendo uma determinada quantidade de partículas, recomendável de no mínimo nove [7].

Cada região, chamada de janela de interrogação, representará um ponto de medição no campo de velocidades. Por isso, admite-se a hipótese de que elas sejam suficientemente pequenas para que o gradiente de velocidade, nesta região, seja desprezível. Então, espera-se que o padrão das partículas dentro da janela de interrogação da imagem 1, região de base, seja deslocado para a imagem 2, região de busca, sem muita alteração. O principal objetivo do algoritmo é justamente encontrar a localização do padrão na imagem 2.

A Figura 3.3 exibe as etapas da correlação cruzada. Nela, duas imagens são adquiridas entre um intervalo de tempo conhecido. Com isso, uma janela de interrogação é delimitada de maneira que tenha no mínimo 9 partículas. Da imagem dessa janela de interrogação é gerada uma função bidimensional, $I_1(i, j)$, representando a intensidade da imagem em cada ponto, em uma imagem binária, onde as partículas possuem o valor 1 e o fundo o valor 0. Essa é utilizada para comparação com todas posições possíveis na segunda imagem. Assim, para cada posição, é calculada o valor da correlação cruzada dada pela Equação 3.2, onde $I_2(i + \Delta x, j + \Delta y)$ é a região na segunda imagem que sofreu um deslocamento e que está sendo comparada com I_1 . Como apresentado na Figura 3.3, representação tridimensional, todas as posições têm seu valor de correlação cruzada calculada. A posição do valor máximo encontrado é o local mais provável onde o padrão de partículas dentro da janela de interrogação se deslocou naquele intervalo de tempo, e assim é feito para todas as janelas de interrogação presentes na Imagem 1.

Na Equação 3.2, os valores de M e N são, respectivamente, os tamanhos das janelas de interrogação da primeira e segunda imagem. As variáveis i e j representam as coordenadas x e y .

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I_1(i, j) I_2(i + \Delta x, j + \Delta y) \quad (3.2)$$

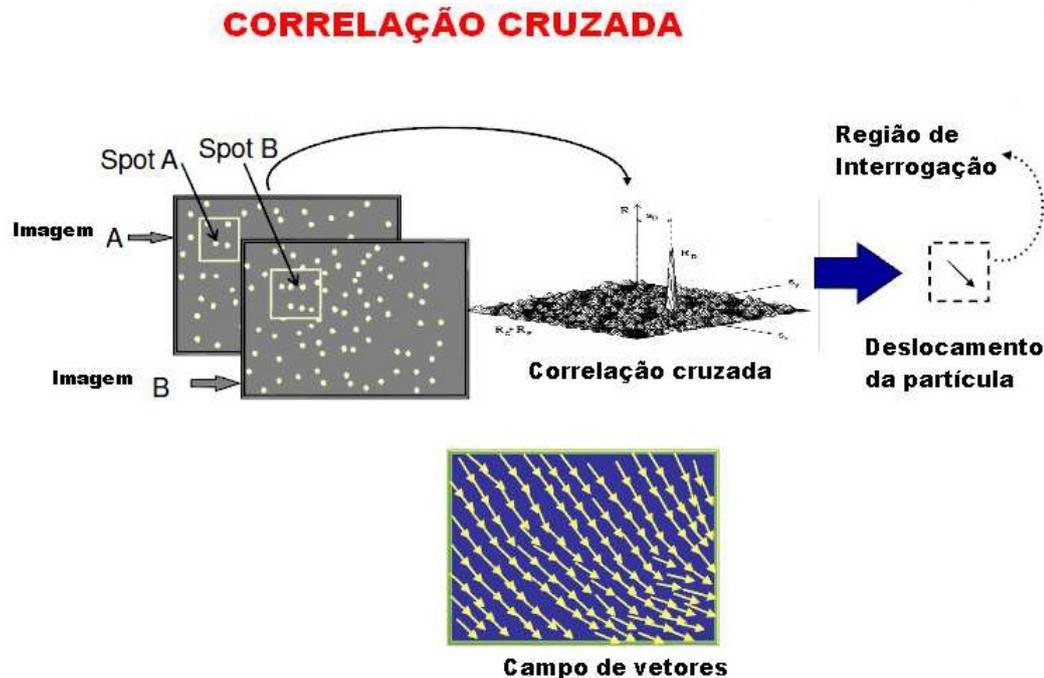


Figura 3.3: Esquemático da correlação cruzada entre janelas de interrogação. Fonte: Adaptado de Dantec Dynamics [8]

Dessa maneira, o estudo do deslocamento das partículas utilizando a posição dos picos das funções de correlação estaria restringido a uma resolução por volta de 1 pixel. Como melhoria propõe-se um ajuste do pico por formulações contínuas, utilizando, por exemplo, uma função parabólica ou Gaussiana. Neste trabalho, o método utilizado foi o Gaussiano pelo programa INSIGHT4G da TSI inc.

3.7 Pós-processamento das imagens

A grande vantagem da técnica de PIV é a determinação de campos instantâneos de velocidades em grandes regiões do escoamento. Assim, permite-se o cálculo de grandezas relacionadas por derivada ou integral, como vorticidade, taxa de deformação, circulação entre outros.

Com a técnica corretamente empregada, tem-se uma grande quantidade de vetores. Porém ainda assim, pode haver alguns vetores considerados irrealis. Esses são devidamente localizados quando se comparados aos seus vizinhos, sendo removidos e substituídos por valores interpolados. Essa substituição pode ser baseada em critérios de desvio máximo em comparação aos vizinhos ou, por exemplo, na verificação da conservação de massa em células próximas. Neste trabalho utilizou-se algoritmos de remoção e interpolação de vetores irrealis disponíveis pelo programa INSIGHT4G da TSI inc.

Capítulo 4

ABORDAGEM EXPERIMENTAL

4.1 Montagem experimental

A Figura 4.1 mostra a bancada experimental utilizada nos testes deste trabalho. O experimento consiste em um circuito fechado com componentes que serão descritos a seguir. A bomba centrífuga (I) admite o fluido com rotação controlada por um inversor de frequência (II), o fluido passa então pelo medidor de vazão eletromagnético (III) e entra na tubulação de borossilicato onde as fotos são adquiridas pela câmera CCD (IV) na região da caixa de acrílico (V). A queda de pressão, no trecho do tubo de vidro borossilicato, é adquirida por um medidor diferencial de pressão (VI), a primeira tomada de pressão possui, à montante, 500 mm de trecho reto para garantir o desenvolvimento do escoamento. Então, o fluido volta para o misturador (VII) completando o circuito.

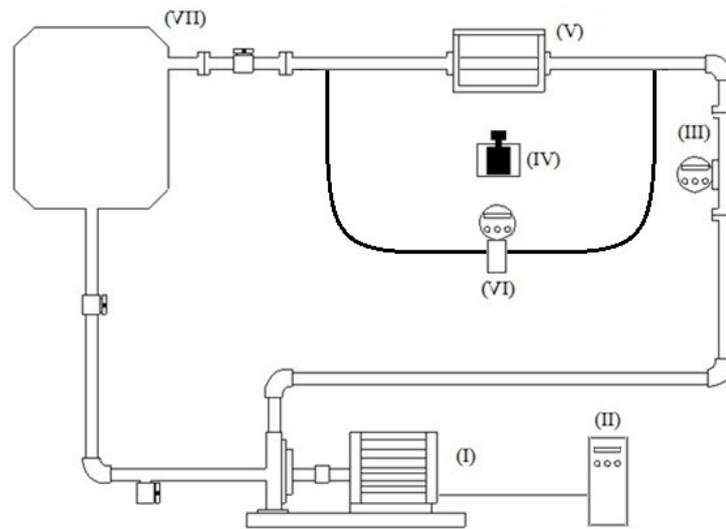


Figura 4.1: Esquema da montagem experimental. Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.2 evidencia a montagem realizada no Laboratório de Métodos Experimentais em Fenômenos de Transporte (LAMEFT) no departamento de engenharia mecânica, UFES. Os componentes serão descritos nos próximos tópicos.



Figura 4.2: Bancada montada no LAMEFT - UFES.

4.1.1 Bomba Centrífuga

Uma bomba centrífuga (Hydrobloc C2000N T) utilizada na bancada possui um motor elétrico de 2 CV de potência e 3450 rpm de rotação. Um inversor CFW500 da WEG foi utilizado para controlar a rotação do motor da bomba.

4.1.2 Medidor de diferencial de pressão

O instrumento utilizado foi o medidor diferencial SMAR LD300 de 4 a 20 mA, possui um range de -200 a 200 polegadas de água. Esse possui comunicação com o supervisório onde a taxa de aquisição é de 2 Hz. A peça apresentada na Figura 4.3 tem o objetivo de unir os tubos de borossilicato e realizar a tomada de pressão. Essa foi projetada e impressa na impressora STRATASYS OBJET30 PRO.

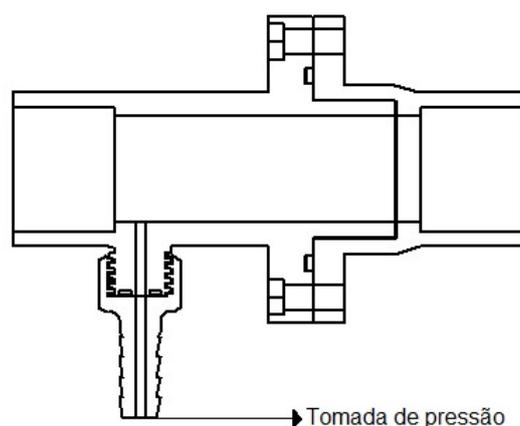


Figura 4.3: Projeto da peça para a união dos tubos com tomada de pressão. Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Medidor de vazão

O medidor de vazão, Figura 4.4, utilizado no experimento foi medidor eletromagnético Yokogawa AXR025G que possui uma exatidão de no máximo 0,5% F.E.



Figura 4.4: Medidor de vazão eletromagnético. Fonte: Yokogawa Electric Corporation [9].

4.1.4 Tubulação

A seção de teste foi montada com tubos de vidro borossilicato que possuem 21,5 mm de diâmetro interno e uma espessura de 1,4 mm. Esses tubos suportam uma pressão de aproximadamente 7 bar, segundo o fornecedor. Uma primeira montagem experimental utilizou acrílico como material da tubulação, porém devido à espessura da parede, essa apresentava grande reflexão, a utilização do tubo de vidro borossilicato solucionou esse problema.

4.1.5 Seção de teste

A técnica de PIV, quando aplicada em tubos, apresenta restrições técnicas para analisar escoamentos próximos à parede devido à refração ótica causada pela curvatura do tubo. Além disso, a diferença entre os índices de refração do fluido e do tubo pode dificultar medidas locais.

Para contornar o problema, é posicionado na seção do tubo, onde as medições do PIV são realizadas, uma caixa de acrílico, veja a Figura 4.5. Uma vez preenchida com água, o laser entra na parte frontal e a câmera retira as fotos pela parte inferior. A Figura também mostra

uma placa com um rasgo central, que é posicionada entre o tubo e a caixa de acrílico, utilizada para garantir que o laser entre no centro do tubo.

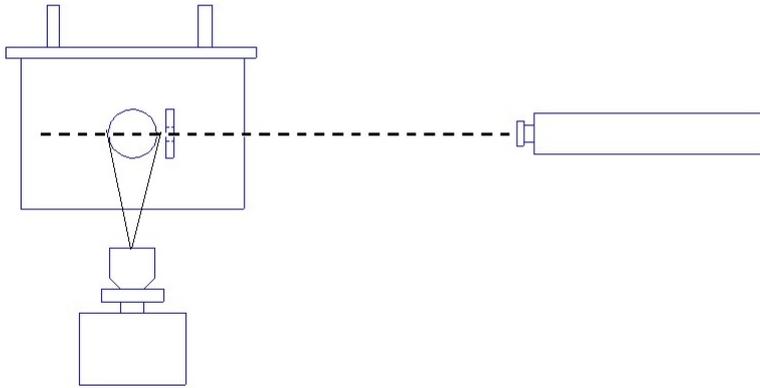


Figura 4.5: Relação entre a câmera e o laser. Fonte: Próprio autor.

4.2 Sistema PIV

Para obter o campo de velocidade foi utilizado a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV) bidimensional. O laser utilizado é da marca Evergreen modelo EVG00145, esse emite um laser pulsado Nd:YAG de 140mJ por pulso a uma frequência de 15 Hz. O comprimento da onda do laser é de 532 nm.

As partículas utilizadas neste trabalho foram esferas de vidro ocas providas pela TSI inc. com diâmetro entre 8 a 12 μm com concentração de 15 ppm, o que condiz com Adrian [45] que recomenda 10^{10} a 10^{12} partículas por metro cúbico de fluido.

Para realizar a sincronia entre o laser e a câmera digital, foi utilizado um sincronizador fabricado pela TSI, modelo 610036. O software Insight 4G, também desenvolvido pela TSI, comanda o sincronizador.

A câmera, na técnica de velocimetria a laser bi-dimensional, precisa ser posicionada ortogonalmente ao plano criado pelo laser. O modelo utilizado nas capturas possui 8MP e uma resolução

de 3320 X 2496 Pixels, esta é uma câmera CCD fornecida pela TSI.

Essa câmera pode chegar a uma taxa de captura de 16 quadros/seg e o seu sensor possui um tamanho de pixel de $5,5\mu\text{m} \times 5,5\mu\text{m}$. Foi adicionado uma lente, Teleconverter AF Teleplus PRO 300 DGX 1.4x da Kenko, ampliando em 1,4 as imagens.

4.3 Polímero redutor de arraste

O polímero utilizado para a redução de arraste foi a Goma Guar adquirido da Labersynter que possui 200 MESH. Essa é obtida do endosperma da *Cyamopsis tetragonolobus*, conhecida como planta Guar. Possui alto peso molecular e é formada por uma cadeia linear de manose ($\beta - 1, 4$) com resíduos de galactose como cadeias laterais (Figura 4.6), na proporção média de uma unidade de galactose para duas de manose. Quanto maior a relação molar galactose/manose, maior a solubilidade em água fria. Seu peso molecular é da ordem de 15×10^5 a 25×10^5 [46]. A Goma Guar utilizada é de mesmo lote do trabalho de Novelli, onde pela viscosidade intrínseca chegou-se a um peso molecular de $16,4 \times 10^5$ [47].

A Goma Guar é amplamente utilizada na indústria alimentícia como agente espessante e estabilizante. Suas soluções apresentam propriedades pseudoplásticas (não newtonianas) [48].

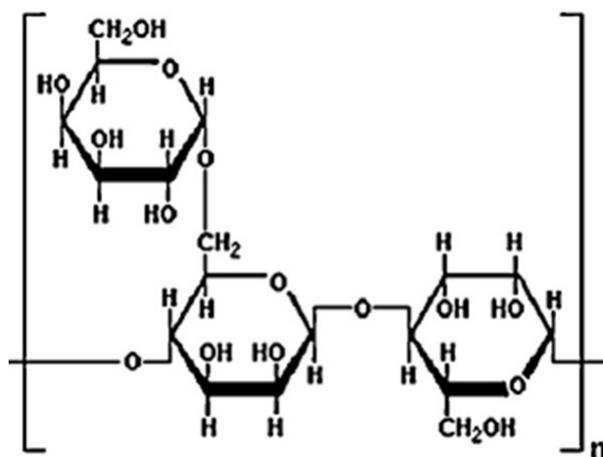


Figura 4.6: Estrutura química da Goma Guar. Fonte: Abdulbari, 2014 [10].

No uso como redutor de arraste, a Goma guar é considerada um polímero rígido que apresenta

bons resultados, esse pode chegar a atingir 65% de redução de atrito quando purificada ou com enxerto com ramos de PAM sintético nas cadeias principais do polissacarídeo [10].

A Figura 4.7 mostra as curvas de redução de arraste por concentração. Isso para Goma Guar comercial, purificada e enxertada [10].

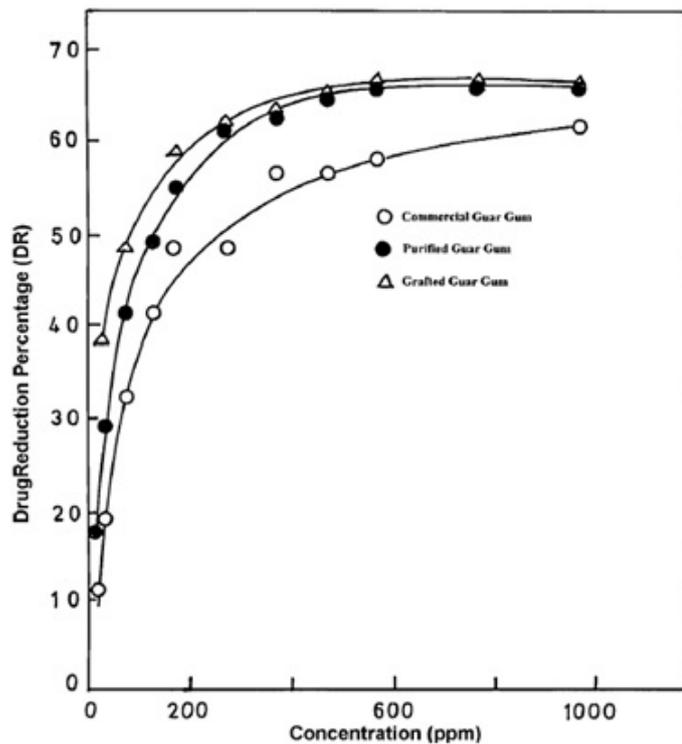


Figura 4.7: Características redutoras de arraste para diferentes tipos de Goma Guar. Fonte: Abdulbari [10].

4.4 Procedimento experimental

Nas próximas seções serão abordados os processos para a realizados dos testes, tanto para solvente puro quanto para a solução.

4.4.1 Preparo da bancada experimental

Inicialmente há o preenchimento do reservatório com água bifiltrada, bombeia-se essa água por toda a bancada fazendo com que apenas água limpa passe pelos tubos. Após essa lavagem passa-se, principalmente na seção de teste, um pano úmido para remover possíveis depósitos de partículas ou polímero. Com isso, fecha-se novamente o circuito e o experimento está pronto para ser executado.

4.4.2 Preparação do fluido

Com a bancada pronta, a próxima etapa é a preparação do fluido. Porém, a preparação é diferente para o solvente puro e para a solução polimérica.

No caso do solvente puro, preenche-se o reservatório com todas as válvulas fechadas até a marca pré-determinada de 50 kg. Então, liga-se a bomba, já para a vazão do teste e adiciona-se a solução com partículas. A solução de água e partículas de vidro são previamente feitas e agitadas por um agitador eletromagnético a fim de produzir uma suspensão de partículas o mais dissolvidas possível.

Para a solução polimérica, a preparação se dá em 2 etapas. Primeiramente preenche-se metade do misturador com solvente puro e adiciona-se partículas de vidro (15 ppm para 25 kg), também previamente misturadas. Com isso, pode-se verificar, e se necessário, ajustar os parâmetros do PIV, como o foco, por exemplo, sem que haja degradação do polímero. Após esse ajuste, a bomba é desligada e a bombona é esvaziada. Com a retirada de todo o líquido do misturador, inicia-se a preparação da solução polimérica. Para isso, o reservatório é preenchido com a água bifiltrada com uma vazão bem baixa, enquanto isso, o polímero é tamizado (10g para 200 ppm de Goma Guar) de maneira que a solução fique a mais homogênea possível. Posteriormente, são adicionadas as partículas de vidro (15 ppm para 50 kg).

4.4.3 Ajuste do PIV e queda de pressão

No supervisor do experimento há a aquisição dos dados de queda de pressão e vazão volumétrica, respectivamente, pelo medidor diferencial de pressão e o medidor de vazão eletromagnético. Com a bomba acionada, adquire-se por cinco minutos os dados de vazão e queda de pressão. Com isso, esses dois medidores são validados utilizando a equação de Blasius.

Para a aquisição das fotos deve-se, inicialmente, garantir o alinhamento do laser com o tubo. Para isso, utiliza-se um dispositivo com uma placa que possui um rasgo central (placa entre o tubo e a caixa de acrílico, Figura 4.5). Esse dispositivo é fixado no tubo e alinhado no centro. Aciona-se então o laser. Caso o feixe passe exatamente no rasgo é garantido o alinhamento, caso contrário, a movimentação do braço robótico do laser é necessário para a correção de posição.

Com o alinhamento realizado, deve-se observar o foco da câmera e o tempo entre fotos. Ajustadas essas duas variáveis, a aquisição das 2500 fotos inicia-se. A duração da sessão de fotos dura por volta de 30 minutos. Como o tempo de teste é relativamente baixo, não são observadas variações significativas da temperatura e nem degradação polimérica, como mostra a Figura 4.8. Cabe ressaltar que a Goma Guar, como polímero rígido, é muito resistente à degradação mecânica.

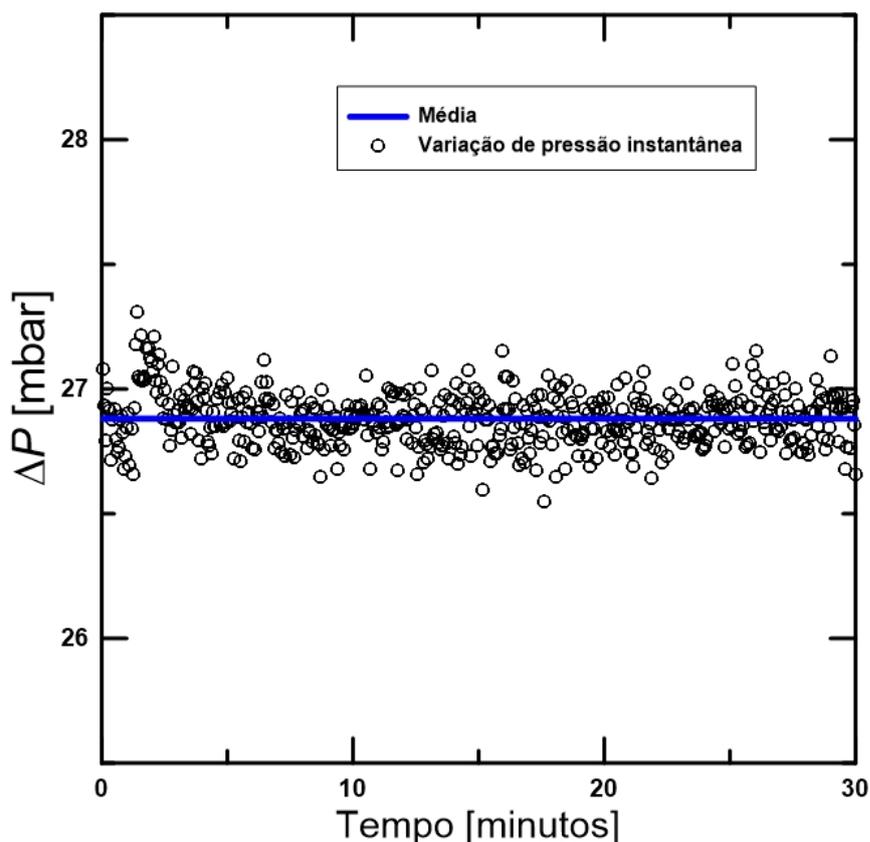


Figura 4.8: Relação da queda de pressão com o tempo de teste, para $Re_{\tau} \approx 1744$ com 200 ppm de Goma Guar.

4.4.4 Calibração

O processo de calibração se faz necessário a partir do momento em que, pela técnica de correlação cruzada, os resultados se dão em unidades de pixels. Com a distância medida em pixel e a velocidade em pixels por segundo, deverá se estabelecer uma referência para que a conversão, para metros ou metros por segundo, seja apropriada.

A calibração é aplicada pelo programa INSIGHT 4G da TSI inc., como mostra a Figura 4.9, essa teve a clareza aumentada para facilitar na visualização nessa dissertação. A calibração é feita por meio do diâmetro interno do tubo, que é igual a 21,5 mm. Com a alternância dos frames é possível determinar o diâmetro interno em pixels.

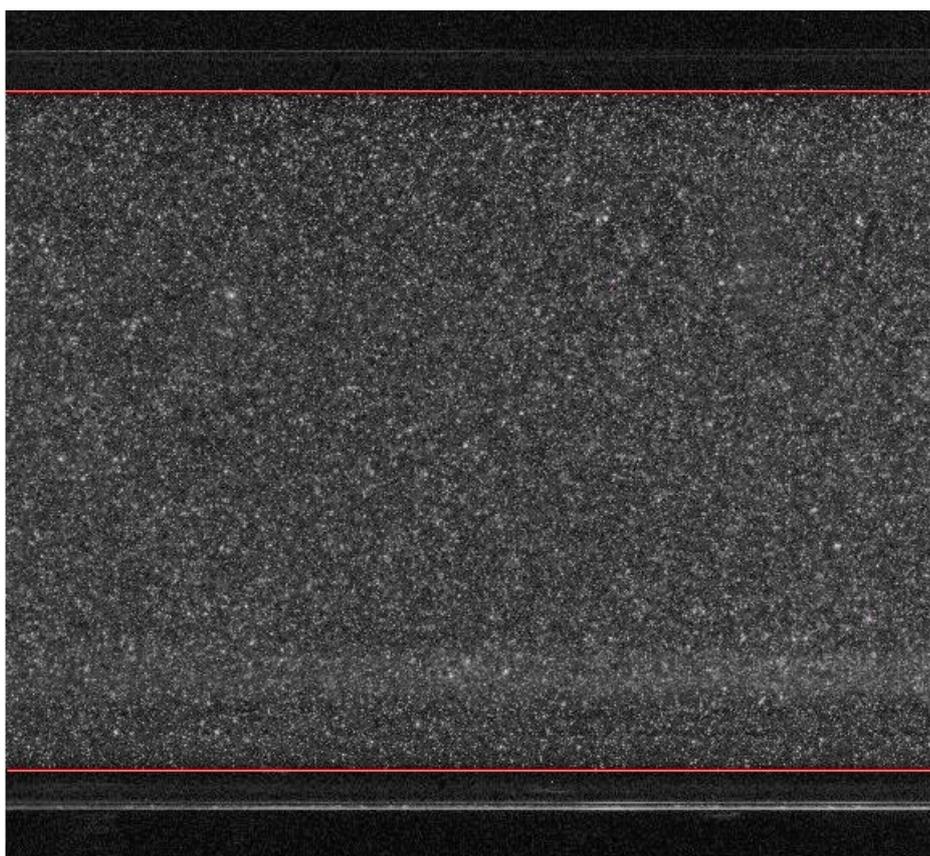


Figura 4.9: Imagem utilizada para calibração. O diâmetro interno é delimitado pela região com partículas entre as linhas vermelhas.

4.4.5 Processamento das imagens

O processamento foi realizado pelo programa INSIGHT 4G, que apresenta vários tipos e configurações para processar as imagens. O algoritmo utilizado foi o Nyquist Recursivo, com esse recurso o primeiro passo do processamento se dá com uma janela de interrogação de maior dimensão, com isso é gerado uma aproximação inicial dos valores. Logo após, o processamento acontece com janelas progressivamente menores, com as posições orientadas de acordo com os resultados do passo anterior. Assim, é possível obter uma boa resolução espacial, devido aos bons níveis de correlação com janelas pequenas.

Neste trabalho, a janela de interrogação inicial utilizada foi 32×20 pixels, com 25% de sobreposição entre as janelas vizinhas. No último passo, foi empregada uma janela de interrogação de 16×10 pixels. Ambas as janelas retangulares possuem o lado de maior dimensão orientado

no sentido do escoamento, isso faz com que sejam obtidos melhores resultados pelo deslocamento das partículas ser majoritariamente na direção axial.

Utilizou-se a mediana para a validação local e como condição de remoção e substituição dos vetores espúrios, quando detectados. Para o processamento de todas as fotos para cada experimento foram necessárias, aproximadamente, 9 horas de trabalho computacional utilizando um computador de alto desempenho.

4.4.6 Medição da viscosidade e massa específica

Logo após o início da captura das fotos, é retirada uma amostra do fluido de teste. Essa amostra é levada para o Reômetro HAAKE MARS III, Figura 4.10, para determinação da *flowcurve* e aquisição da viscosidade, (η_{∞}) no patamar newtoniano inferior. A massa específica é determinada com auxílio de um picnômetro calibrado.



Figura 4.10: Reômetro HAAKE MARS III. Fonte: Thermo Fisher Scientific.

A Figura 4.11 exibe o resultado obtido pelo reômetro da solução polimérica com 200 ppm de Goma Guar, onde a ordenada é a viscosidade (η) e a abscissa a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). A viscosidade adquirida é a assintótica no final do regime laminar, no caso da Figura 4.11, em $\dot{\gamma} \approx 5000$.

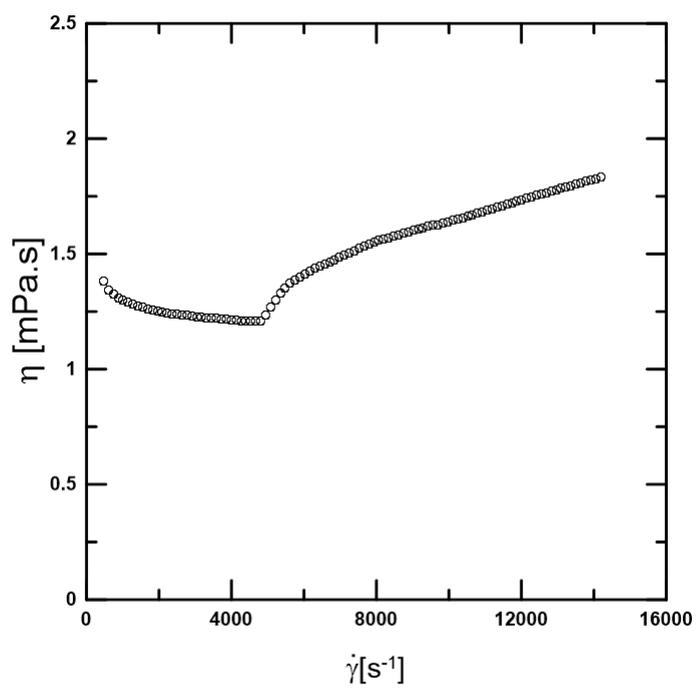


Figura 4.11: Resultado reológico para a solução polimérica (água com 200 ppm de Goma Guar).

Capítulo 5

RESULTADOS

Neste capítulo serão primeiramente abordados os resultados com solvente puro, para validar a bancada e a metodologia experimental adotada. Posteriormente, serão apresentados os resultados para a solução polimérica. Foram avaliados diferentes valores do número de Reynolds, isso tanto para os escoamentos de solvente puro, quanto para a solução polimérica com 200 ppm em massa de Goma Guar.

As Tabelas 5.1 e 5.2 resumem as informações adquiridas e calculadas de cada experimento realizado. A primeira coluna de cada tabela exibe os símbolos que serão utilizados durante o capítulo.

Tabela 5.1: Testes experimentais para água.

Símbolo	V [m/s]	ρ [kg/m]	$\mu \times 10^{-4}$ [Pa.s]	Re	Re_{τ}	ΔP [Pa]	u_{τ} [mm/s]	$\frac{\nu}{u_{\tau}}$ [mm]
●	0,897	997,33	9,66	19896	1159	759,9	52,2	0,0185
■	1,356	997,37	9,65	30085	1648	1535,7	74,3	0,0130
▲	1,798	997,29	9,63	39905	2103	2499,4	94,8	0,0102
×	2,263	997,32	9,66	50207	2567	3726,3	115,7	0,0084
▼	0,796	997,37	9,67	17653	1040	612,8	46,9	0,0207
◆	1,147	997,35	9,64	25444	1428	1152,6	64,4	0,0151
★	1,291	997,33	9,65	28648	1580	1410,6	71,2	0,0136
✱	1,451	997,35	9,64	32205	1744	1718,9	78,6	0,0123

Tabela 5.2: Testes experimentais para 200ppm de Goma Guar.

Símbolo	V [m/s]	ρ [kg/m ³]	$\mu \times 10^{-4}$ [Pa.s]	Re	Re_{τ}	ΔP [Pa]	u_{τ} [mm/s]	$\frac{\nu}{u_{\tau}}$ [mm]	DR [%]
▽	1,147	997,30	12,61	19504	1043	1047	61,3	0,0206	14,5
◇	1,696	997,37	12,08	30112	1427	1799	80,4	0,0151	25,1
☆	1,980	997,33	12,10	35087	1584	2224	89,4	0,0136	29,4
✱	2,242	997,37	12,06	39858	1747	2688	98,3	0,0123	31,3

5.1 Validação da bancada experimental

Para validação da bancada e da metodologia aplicada, os resultados do fator de atrito, o perfil de velocidade média, valores RMS das flutuações turbulentas da velocidade e perfis de tensão turbulenta de água para um escoamento em um tubo circular hidrodinamicamente desenvolvido foram comparados com o já estabelecido na literatura [49]. Todos os testes realizados contemplam o regime turbulento, uma vez que, somente nesse regime, ocorre a redução de arrasto por adição de polímeros.

5.1.1 Resultados para o fator de atrito hidrodinâmico

A primeira etapa da validação se deu pela análise da queda de pressão no trecho a ser estudado. A Figura 5.1 mostra os resultados adquiridos do fator de atrito em função do número de Reynolds baseado na velocidade média do escoamento, tanto para água quanto para a solução de 200 ppm de Goma Guar. A figura também exibe a curva que representa o fator de atrito de Blasius para um tubo de parede lisa com escoamento desenvolvido e fluido newtoniano. Além disso, apresenta a assíntota de máxima redução de arraste fornecida por Virk [23].

Com os resultados gerados observou-se que, para a faixa do número de Reynolds onde serão executados os testes, os valores possuem boa confiabilidade. Então considerou-se a montagem e metodologia satisfatória. Para o fator de atrito, como apresentado no Apêndice A, a incerteza experimental foi de 1,2%.

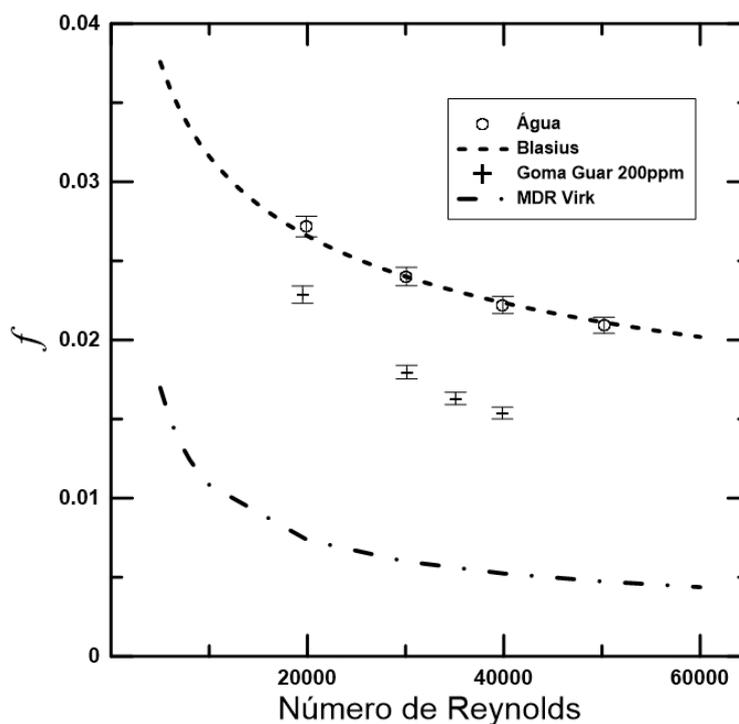


Figura 5.1: Resultado para o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução polimérica com 200 ppm em massa de Goma Guar.

A Figura 5.2 apresenta os dados adquiridos em coordenadas de Prandtl – von Karman, a fim de obter uma melhor representação. Observa-se que os resultados para a solução polimérica revelam reduções consideráveis no fator de atrito, quando comparados aos da água. Nos testes,

a redução do fator de atrito aumentou com o incremento do número de Reynolds, partindo de 14% e chegando a 31%. Essa tendência foi observada por Virk [23, 24], den Toonder [49, 26], White [37] e Andreotti [50].

Esse resultado condiz com os estudos de Lumley [20] que relaciona a redução de atrito com o tempo de relaxação polimérica e a escalas de tempo do escoamento turbulento. Segundo essa abordagem, quando o tempo de relaxação do polímero for maior que a escala de tempo do escoamento ocorre a redução de atrito. Desse modo, como as menores escalas de tempo são contempladas com maiores número de Reynolds, ou seja, quanto maior o número de Reynolds maior a redução de arraste.

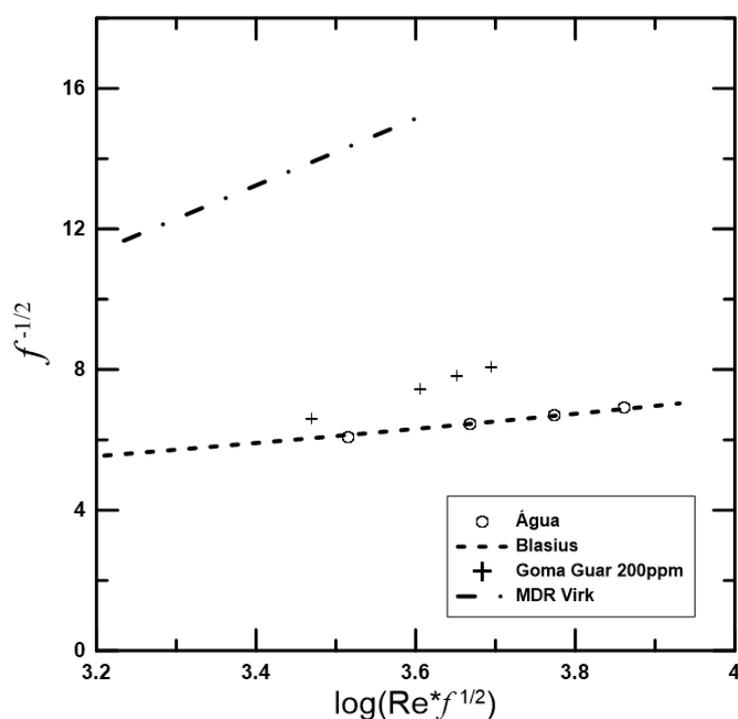


Figura 5.2: Resultados do fator de atrito hidrodinâmico dos experimentos de água e solução polimérica com 200 ppm em massa de Goma Guar em coordenadas de Prandtl - von Karman.

5.1.2 Resultados da vazão volumétrica

A fim de validar a metodologia experimental, a montagem do sistema de PIV e o algoritmo de processamento, uma primeira comparação foi realizada entre os valores de vazão obtidos pelo medidor eletromagnético e o calculado pela integral do perfil de velocidade média fornecido

pelo processamento do PIV. A Tabela 5.3 mostra, para estes dois métodos diferentes, o valor da vazão média e o erro relativo entre elas.

Tabela 5.3: Comparação das vazões medidas.

Símbolo	Re	Vazão volumétrica [m^3/h] (Medidor Eletromagnético)	Vazão volumétrica [m^3/h] (PIV)	Erro relativo [%]
●	19896	1,172	1,142	2,6
■	30085	1,772	1,708	3,6
▲	39905	2,350	2,309	1,7
×	50207	2,958	2,910	1,6

Esses resultados foram considerados satisfatórios, visto que o maior valor encontrado foi de 3,6%. A diferença nos resultados pode ser atribuída ao tamanho da janela de interrogação adotada. Essa deve ser pequena o suficiente para que não haja gradiente de velocidade dentro da mesma, e grande o suficiente para que tenha um número mínimo de partículas.

5.1.3 Perfis de velocidade média

Para caracterizar um instante de um escoamento turbulento é exibida a Figura 5.3, nela é apresentada a magnitude do vetor velocidade em um plano meridional no centro do tubo. O escoamento de água apresenta um número de Reynolds igual a $3,2 \times 10^4$ e a ordenada representa o diâmetro interno do tubo de borossilicato e a abscissa o comprimento axial do tubo.

Pelo mapa de velocidades é possível analisar qualitativamente o escoamento desenvolvido, onde as maiores velocidades se encontram na região central do tubo. Para obtenção dos resultados foram utilizadas 5000 imagens adquiridas pelo PIV, ou seja, 2500 campos instantâneos de velocidades como apresentado na Figura 5.3.

Neste trabalho as velocidades instantâneas serão denominadas $U(t)$ e $V(t)$, representando respectivamente a coordenadas X , parcela axial, e Y , parcela radial. Conforme a decomposição de Reynolds, as velocidades instantâneas podem ser expressas em uma componente média e outra flutuante, onde \bar{u} e \bar{v} são as velocidades médias calculadas a partir de N campos instantâneos,

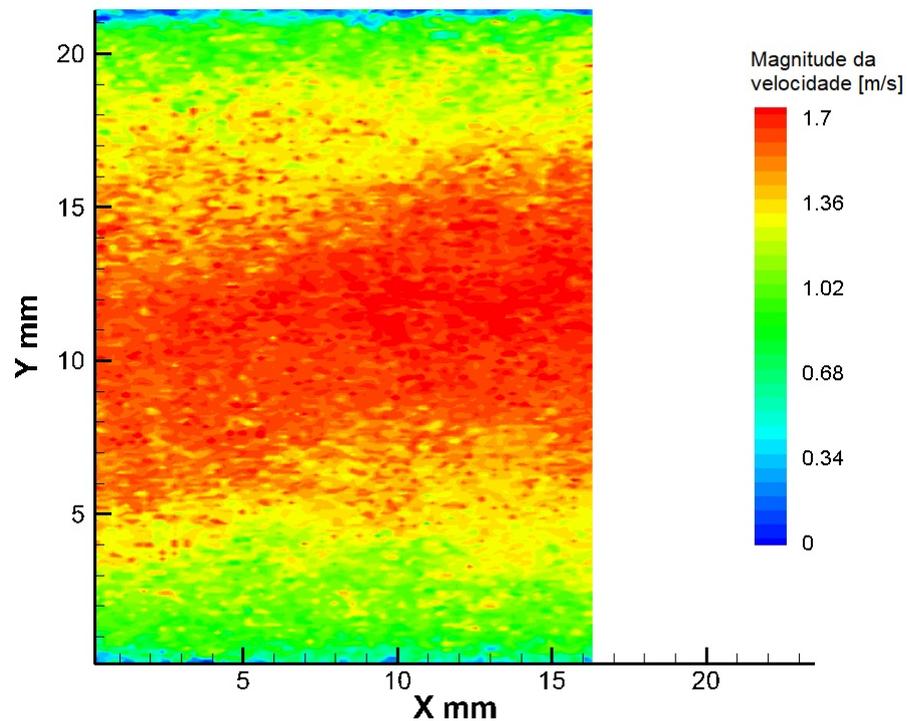


Figura 5.3: Campo bidimensional instantâneo de magnitude da velocidade para água com $Re = 3,2 \times 10^4$.

como mostra a Equação 5.2. u' e v' são as flutuações instantâneas da velocidade.

$$U = \bar{u} + u'(t); V = \bar{v} + v'(t) \quad (5.1)$$

$$\bar{u} = \sum_i^N \frac{U_i}{N}; \bar{v} = \sum_i^N \frac{V_i}{N} \quad (5.2)$$

A Figura 5.4 exibe o campo de velocidades em algumas posições axiais, esta figura é resultado da média dos 2500 campos instantâneos adquiridos. Para haver uma melhor compreensão dos dados, foram suprimidos alguns vetores, tanto axialmente quanto radialmente.

A Figura 5.5 exibe os resultados dos perfis adimensionais de velocidade média axial, onde a velocidade é adimensionalizada pela Equação 5.3.

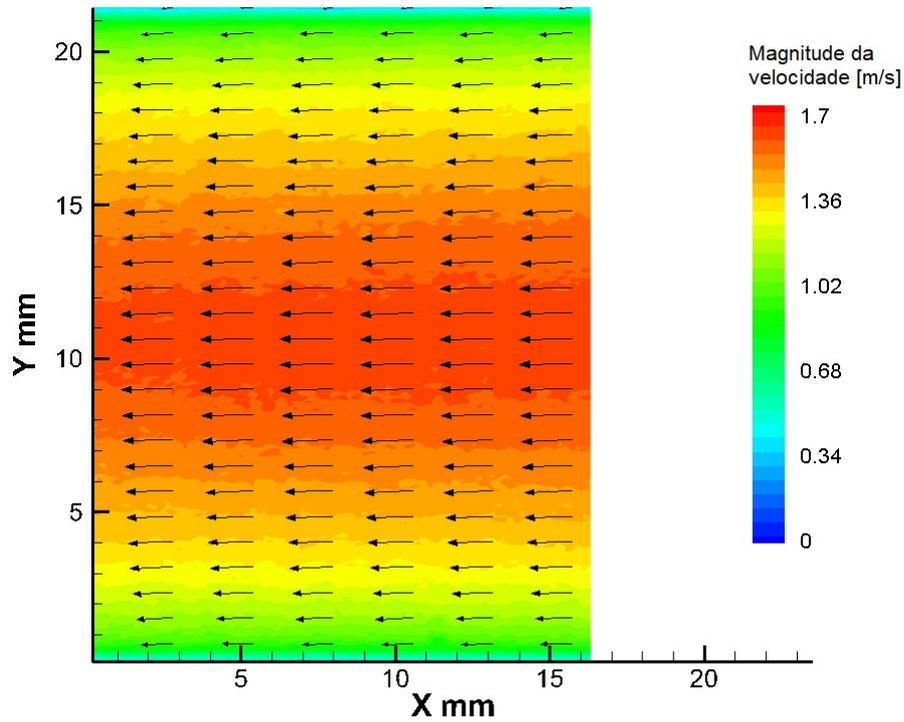


Figura 5.4: Campo de velocidade média de um escoamento de água com $Re = 3,2 \times 10^4$.

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (5.3)$$

onde u_τ é a velocidade cisalhante definida pela Equação 5.4

$$u_\tau = \left(\frac{D}{4\rho} \left| \frac{\Delta P}{\Delta L} \right| \right)^2 \quad (5.4)$$

A coordenada radial foi adimensionalizada pelo o diâmetro do tubo, r/D . Os resultados foram comparados com o trabalho de den Toonder [49], no qual foi utilizado a técnica de velocimetria laser-Doppler. Para melhor visualização, alguns dados foram suprimidos.

Inicialmente, observa-se uma boa simetria dos perfis de velocidade para os testes realizados, esse é um bom indicativo da qualidade de alinhamento do tubo em relação à câmera e do desenvolvimento do escoamento. Outra característica notável é o aumento no gradiente da velocidade

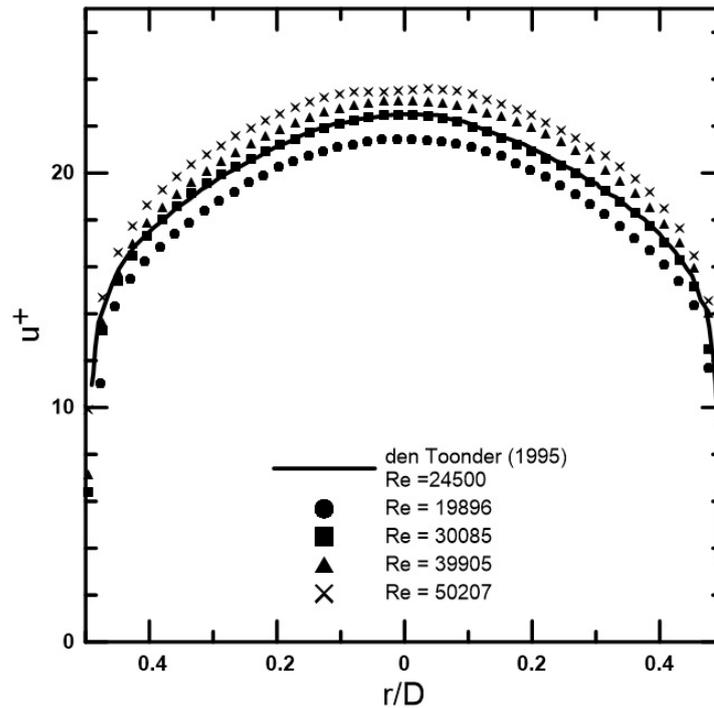


Figura 5.5: Perfis adimensionais de velocidade axial u^+ , em função de r/D para escoamento de água.

na parede com o incremento do número de Reynolds, analisar a região da parede é um grande desafio quando se utiliza a técnica de PIV. Os resultados obtidos foram comparados com o perfil encontrado por den Toonder [49].

Com o objetivo de analisar melhor a Figura 5.5, os resultados foram plotados da parede ao centro do tubo, aproveitando a simetria do perfil, observado na Figura 5.6. Essa apresentou boa concordância a curva de Toonder [49].

A Figura 5.7 apresenta os resultados em função das coordenadas de parede. Observa-se que com o aumento do número de Reynolds, para um mesmo ponto espacial, há um aumento do y^+ , fato esperado pelo aumento da velocidade de cisalhamento. Com isso, é obtido no experimento com $Re = 19896$ o menor valor de y^+ , $y^+ = 4,2$.

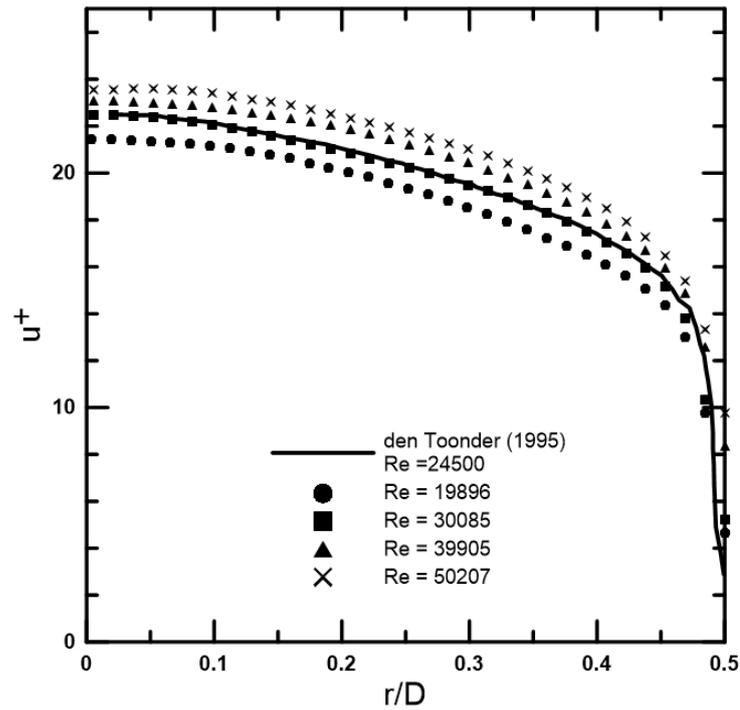


Figura 5.6: Perfis adimensionais de velocidade axial u^+ , em função de r/D para escoamento de água, do centro do tubo à parede.

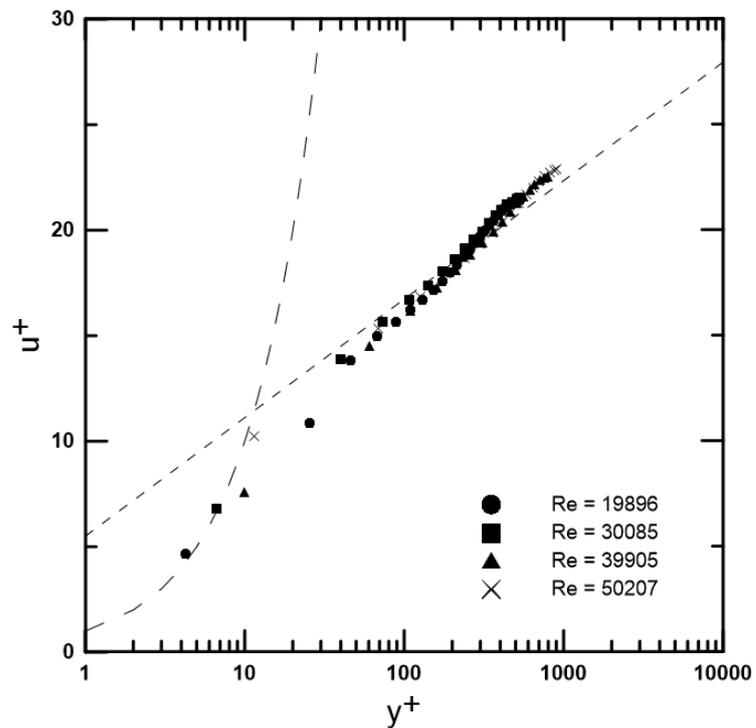


Figura 5.7: Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede para diferentes números de Reynolds.

Os perfis apresentaram boa concordância com as equações (subcamada e desenvolvido), pequenos desvios podem ser relacionados à incerteza encontrada para o fator de atrito que foi utilizado no cálculo de u_τ .

5.1.4 Flutuações da velocidade

A qualidade dos dados sobre a turbulência do escoamento estão diretamente ligados ao número de campos instantâneos adquiridos do escoamento. Como dito anteriormente, foram registrados 2500 campos instantâneos com intuito de obter uma boa qualidade estatística dos resultados. A Equação 2.23 e Equação 2.24 evidenciam como foi calculada a velocidade turbulenta adimensionalizada, média RMS (*root mean square*) das flutuações instantâneas sobre a velocidade cisalhante, para a parcela axial e radial respectivamente.

A Figura 5.8 apresenta o perfil da velocidade turbulenta axial RMS adimensionalizada para diferentes números de Reynolds. Observa-se que, independente do número de Reynolds, para valores menores de y^+ os dados apresentaram números elevados. Ampliando o gráfico na região de maior y^+ pode-se constatar, apesar dos experimentos estarem em um intervalo pequeno do número de Reynolds (20000 a 50000), que houve uma tendência onde quanto maior o número de Reynolds maior o u_{RMS}^+ . Com isso, nota-se uma boa concordância com os dados de Tooder [49].

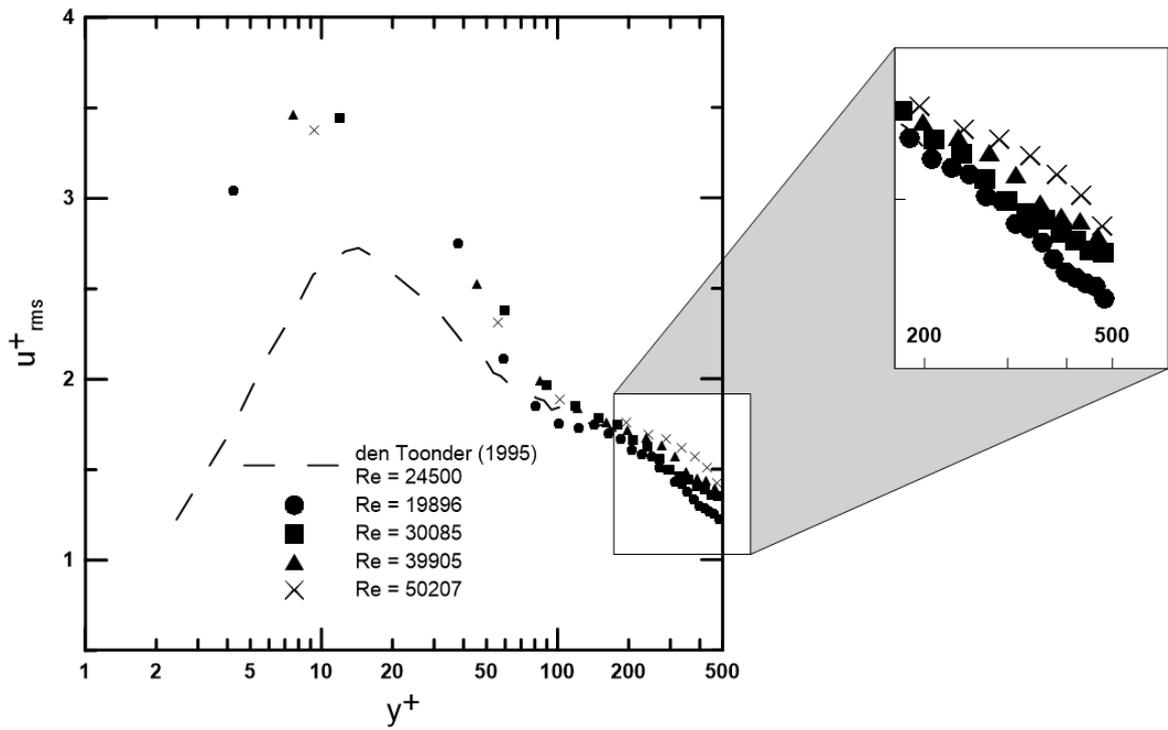


Figura 5.8: Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações axiais para o escoamento de água.

A Figura 5.9 exibe o perfil da flutuação radial RMS adimensionalizada, v^+_{RMS} . Nota-se, um aumento do v^+_{RMS} com o incremento do número de Reynolds o que é observado no trabalho de Toonder [49].

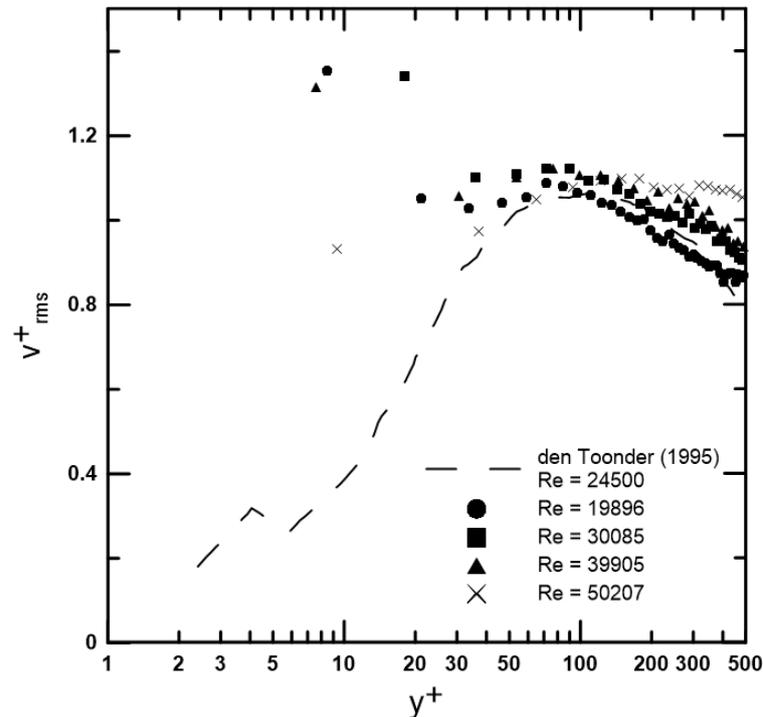


Figura 5.9: Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações radiais para o escoamento de água.

É notável, principalmente pelas últimas figuras apresentadas, a dificuldade de se obter dados com boa qualidade muito próximo à parede. Isto é uma limitação da técnica de PIV, especialmente por causa da curvatura e reflexão, fazendo com que muito ruído seja criado.

5.1.5 Tensão de Reynolds

A tensão de Reynolds ou tensão turbulenta na forma adimensional é calculada a partir da Equação 5.5, variável que traz a noção do transporte da quantidade de movimento. Os perfis da tensão de Reynolds adimensionalizada em função da coordenada de parede y^+ são apresentados na Figura 5.10. Nota-se um deslocamento para direita das curvas com o aumento do número de Reynolds, esse comportamento também é verificado em [42].

$$\tau_r^+ = \frac{1}{u_\tau^2} \left(\overline{u'v'} \right) \quad (5.5)$$

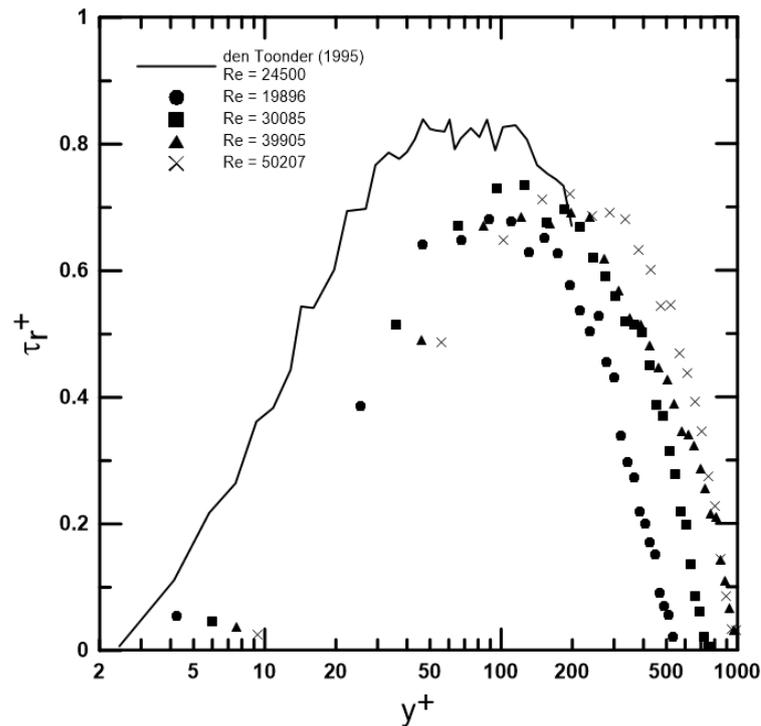


Figura 5.10: Perfis da tensão de Reynolds adimensional em função de y^+ para escoamento de água.

A Figura 5.11, apresenta a tensão de Reynolds adimensionalizada em função de r/D . Nela também está presente a tensão de cisalhamento total, essa varia linearmente do centro do tubo à parede, ou seja, de zero até um valor máximo na parede. A Equação 5.6 mostra como a tensão total varia ao longo do raio.

$$\tau^+ = \frac{2r}{D} \quad (5.6)$$

A Figura 5.11 mostrou-se um bom comportamento saindo do zero no centro do tubo, crescendo linearmente até $r/D = 0,35$ e reduzindo até zero a partir de $r/D = 0,4$. Os valores experimentais obtidos via PIV apresentaram valores menores quando comparados ao de Toonder [49] por laser-Doppler. Esta diferença foi provocada pela dificuldade de medição das flutuações próximo à parede.

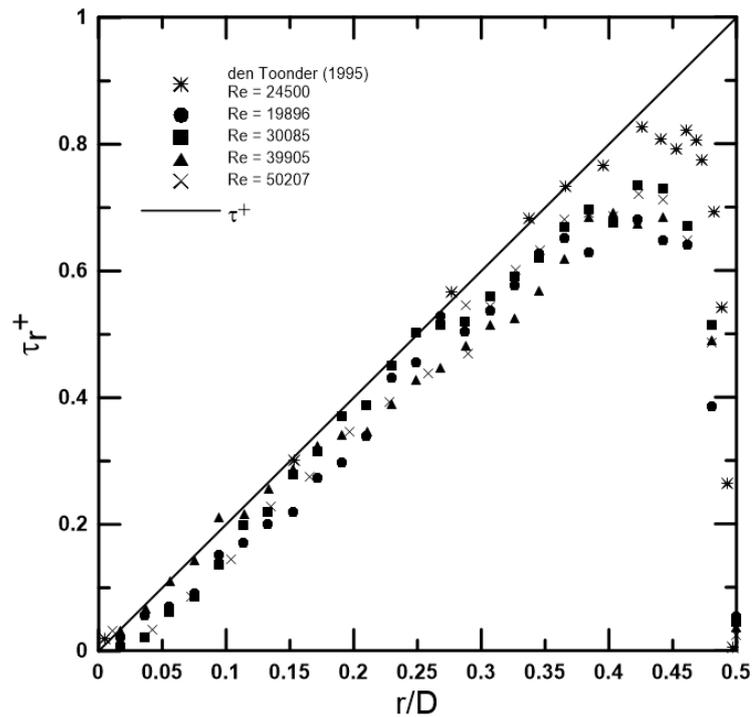


Figura 5.11: Tensão de Reynolds adimensionalizada em função de r/D para escoamento de água.

5.2 Resultados para a solução polimérica

Nesta seção serão apresentados os resultados para o escoamento turbulento da solução polimérica, os dados foram adquiridos pela técnica de velocimetria à laser (PIV). Foram ensaiados quatro diferentes números de Reynolds e esses foram comparados aos testes de solvente puro (água).

Como explicado no capítulo anterior, os testes com solução polimérica tiveram duração de aproximadamente 30 minutos. E como mostrado na Figura 4.8, o polímero apresenta degradação desprezível neste período.

Para a comparação, os testes de solvente puro foram executados de modo que possuíssem o mesmo valor de Re_τ , este calculado a partir da velocidade de cisalhamento.

5.2.1 Perfis de velocidade média

A comparação da velocidade é primeiramente realizada em função de u^+ e em função da coordenada radial adimensional, r/D . Como observado na seção anterior, há uma boa simetria do perfil. Assim, optou-se em plotar apenas metade do perfil. Essa comparação é mostrada da Figura 5.12 a 5.15.

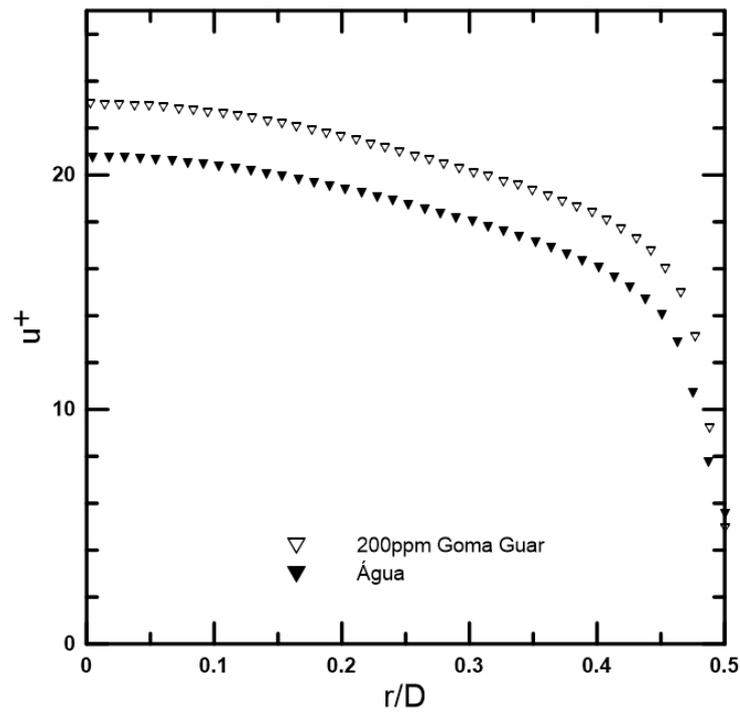


Figura 5.12: Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$.

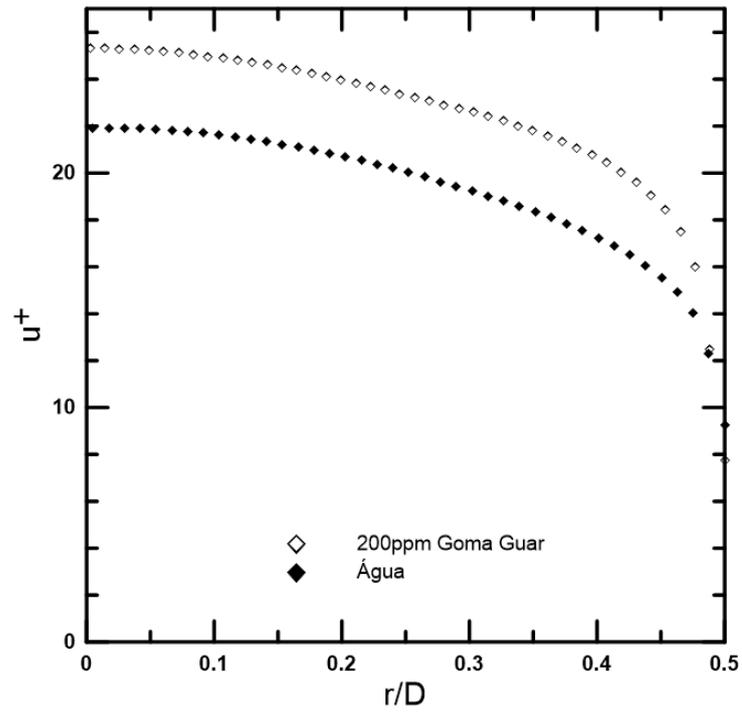


Figura 5.13: Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$.

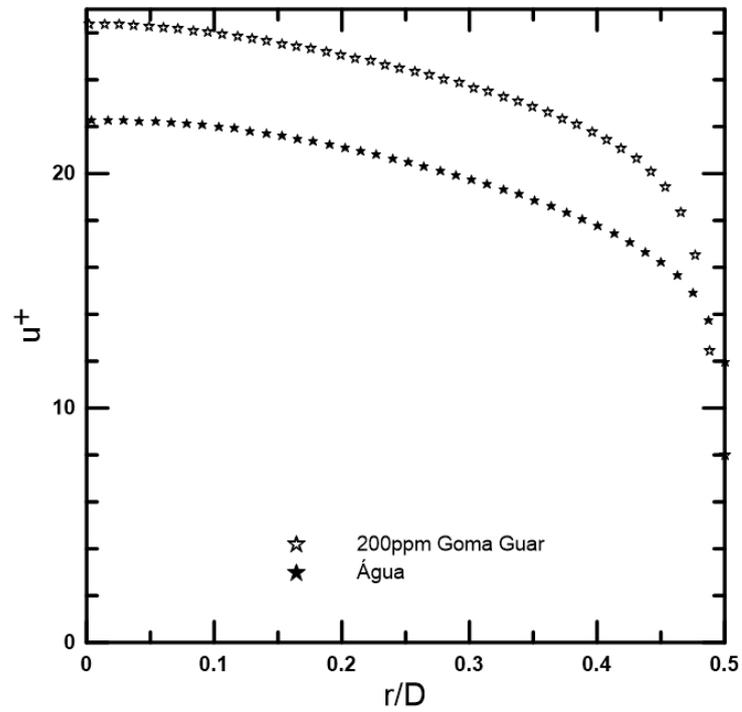


Figura 5.14: Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$.

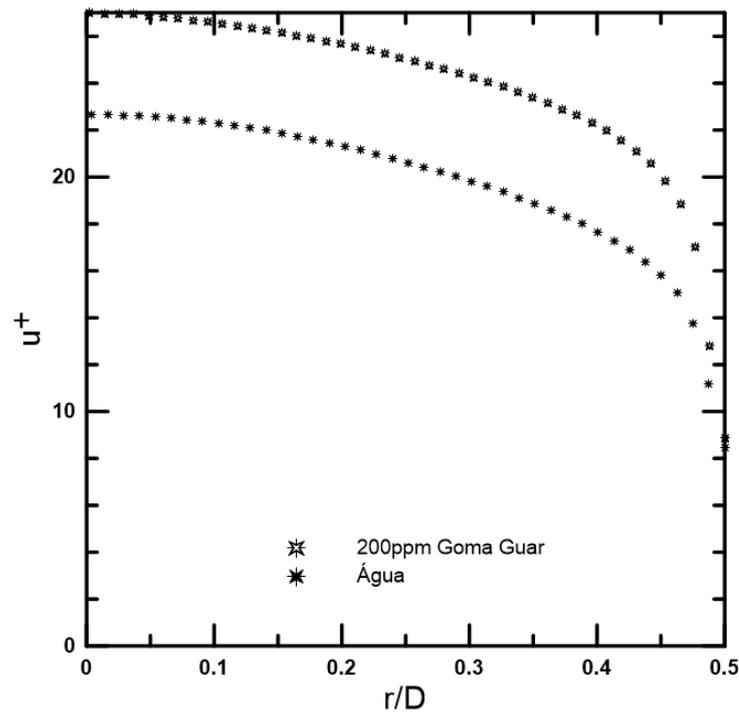


Figura 5.15: Perfis adimensionais de velocidade axial, u^+ , em função de r/D para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$.

Nas quatro figuras apresentadas, observa-se claramente um aumento considerável de u^+ , quando comparado à água com o mesmo valor de Re_τ . Esse fato também foi observado por den Toonder [49] e Pumisacho [42]. A diferença entre a curva da solução polimérica e a de solvente puro aumenta com o incremento da redução de arraste.

Nas Figuras 5.16 a 5.19 são exibidas as comparações entre os experimentos com solvente puro e da solução polimérica dos perfis de velocidade em termos das coordenadas de parede. Os perfis de velocidade da solução polimérica na região de $y^+ < 30$ não apresentaram alterações, já a região logarítmica, o perfil sofre um deslocamento para cima.

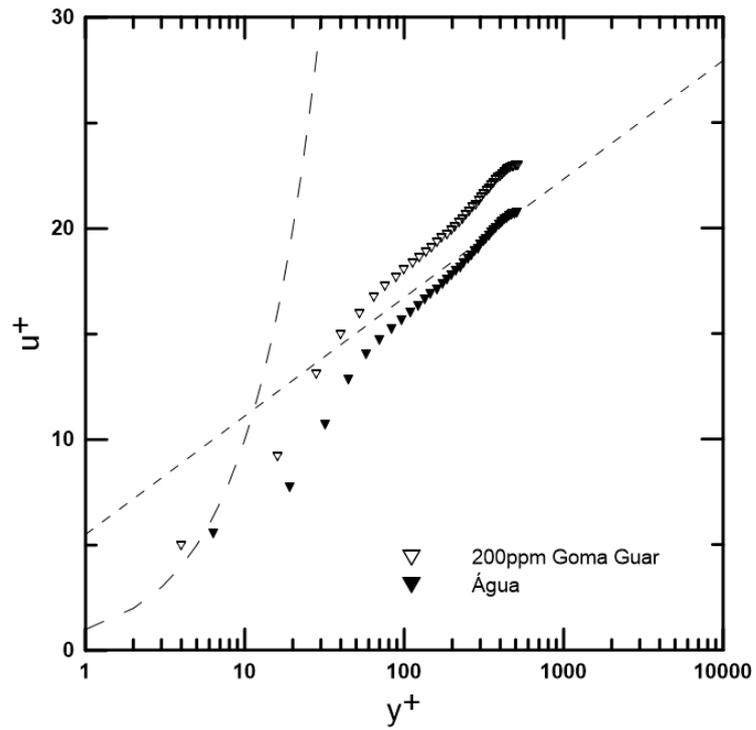


Figura 5.16: Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$.

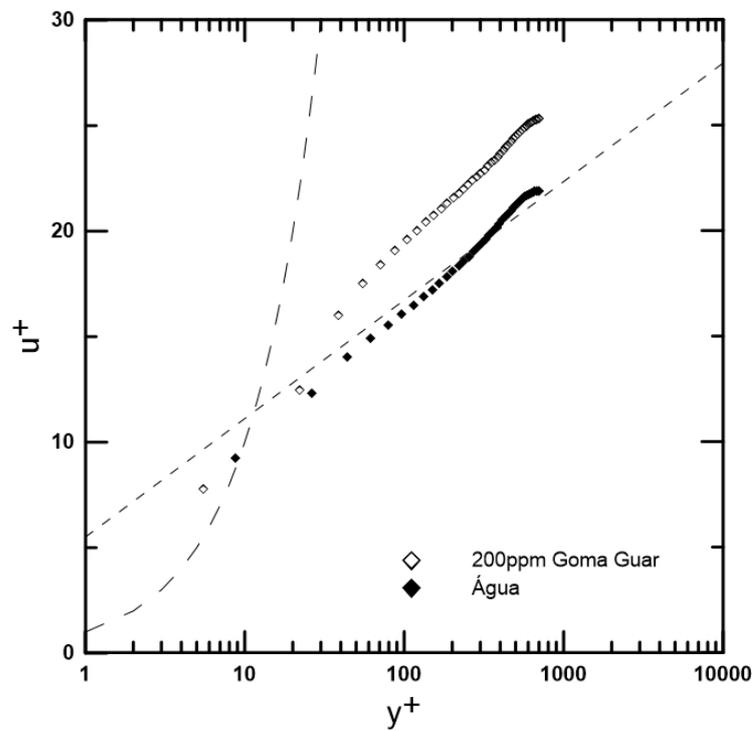


Figura 5.17: Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$.

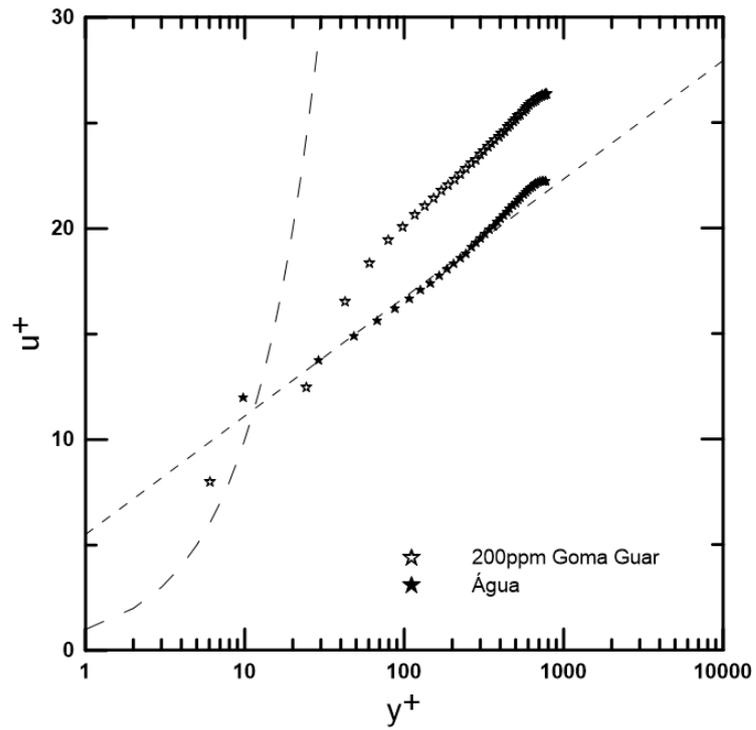


Figura 5.18: Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$.

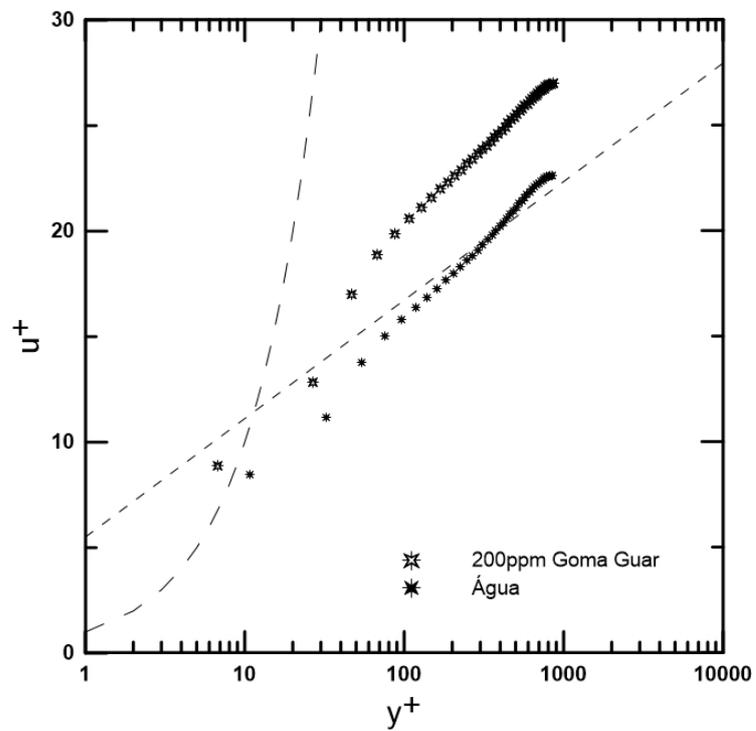


Figura 5.19: Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$.

A Figura 5.20 apresenta a evolução desse deslocamento com o aumento da redução de arraste. Observa-se também, que a região do *buffer layer* sofre um alongamento. Esses fatos são observados em outros estudos de redução de arraste como White [37], den Toonder [49], Procaccia [3], Ptasiniski [38], Andreotti [50] e Pumisacho [42].

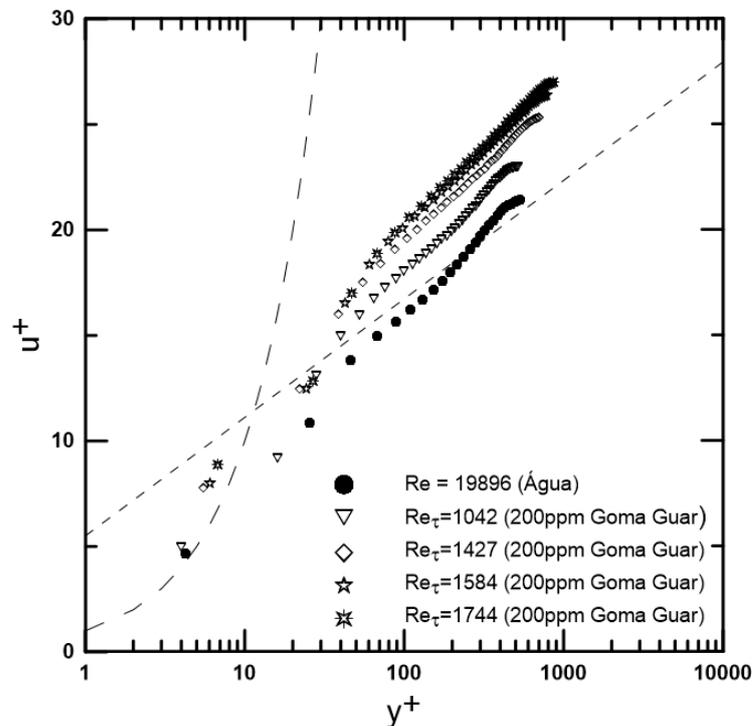


Figura 5.20: Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede, para água e soluções poliméricas.

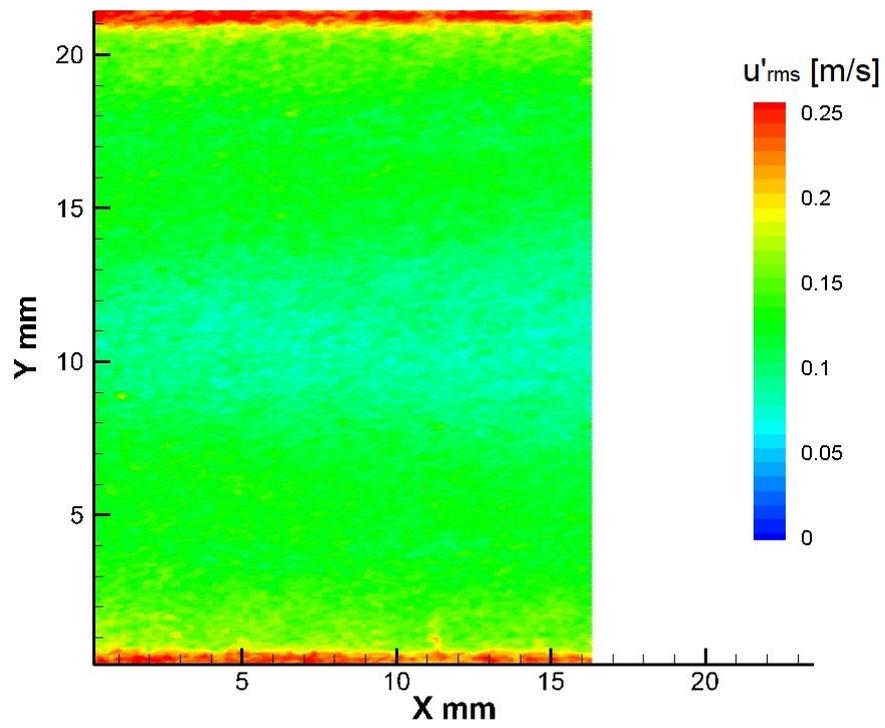
A Figura 5.20 apresenta um teste para água, onde esse apresentou um bom comportamento com a literatura. Com o aumento de Re_τ para solução polimérica observa-se, conseqüentemente, um aumento do DR. Com isso, nota-se um distanciamento entre os testes, esse se torna pequeno na comparação entre o $Re_\tau = 1744$ (200ppm Goma Guar) e $Re_\tau = 1584$ (200ppm Goma Guar) onde a diferença do DR é de 1,9%.

5.2.2 Flutuações da velocidade

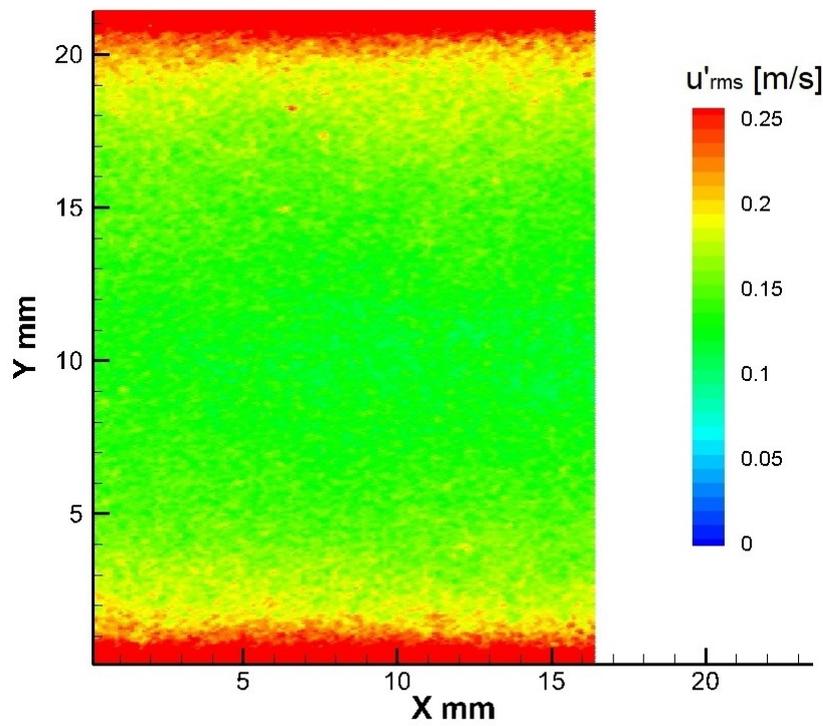
Nesta seção serão apresentados os valores das flutuações da velocidade para a solução polimérica com 200 ppm em massa de Goma Guar. Todos os resultados serão comparados com

os testes de água para o mesmo valor do número de Reynolds calculado com a velocidade cisalhante.

Para exemplificar o efeito polimérico no escoamento na flutuação da velocidade axial RMS, foi elaborada a Figura 5.21 para $Re_\tau \approx 1744$. Observa-se um incremento dos valores, principalmente, nas regiões próxima à parede.



(a)



(b)

Figura 5.21: Perfis de velocidade turbulenta axial u'_{RMS} para, $Re_\tau \approx 1744$. (a) água. (b) solução polimérica 200 ppm Goma Guar.

As Figuras 5.22 a 5.25 exibem as comparações entre os experimentos de água e de solução polimérica, para os mesmos valores do número de Reynolds baseados na velocidade cisalhante, dos valores RMS das flutuações axiais adimensionalizadas. Nota-se que próximo à parede a presença polimérica causou um incremento nas flutuações axiais e o pico foi deslocado, se afastando da parede. Essas constatações também foram observados por Andreotti [50], den Toonder [49], Gyr [4], Ptasinski [38] e Pumisacho [42].

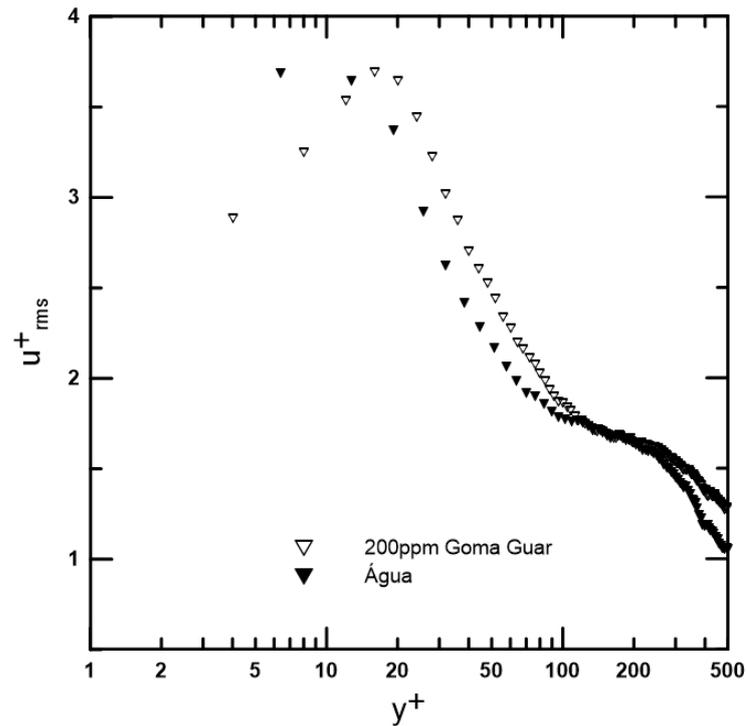


Figura 5.22: Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$.

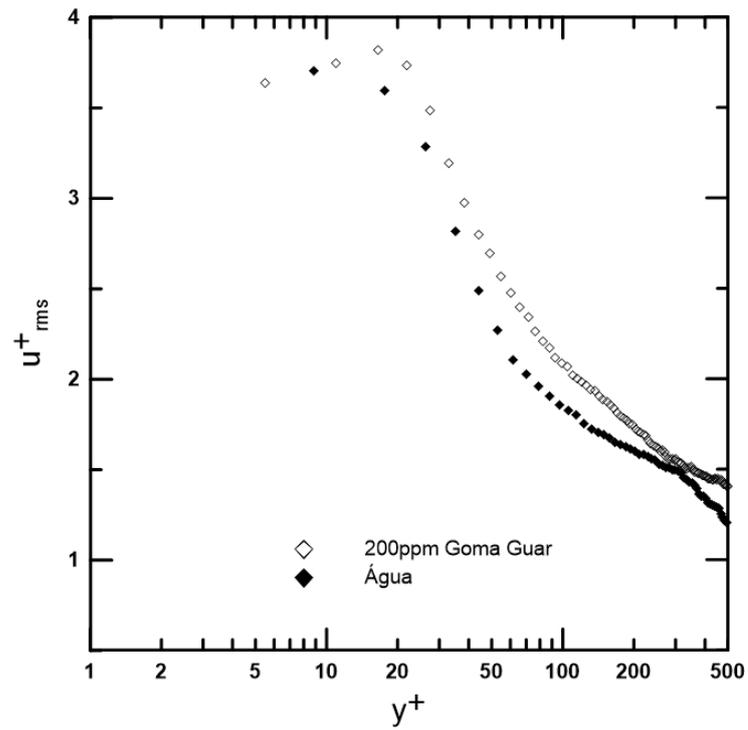


Figura 5.23: Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$.

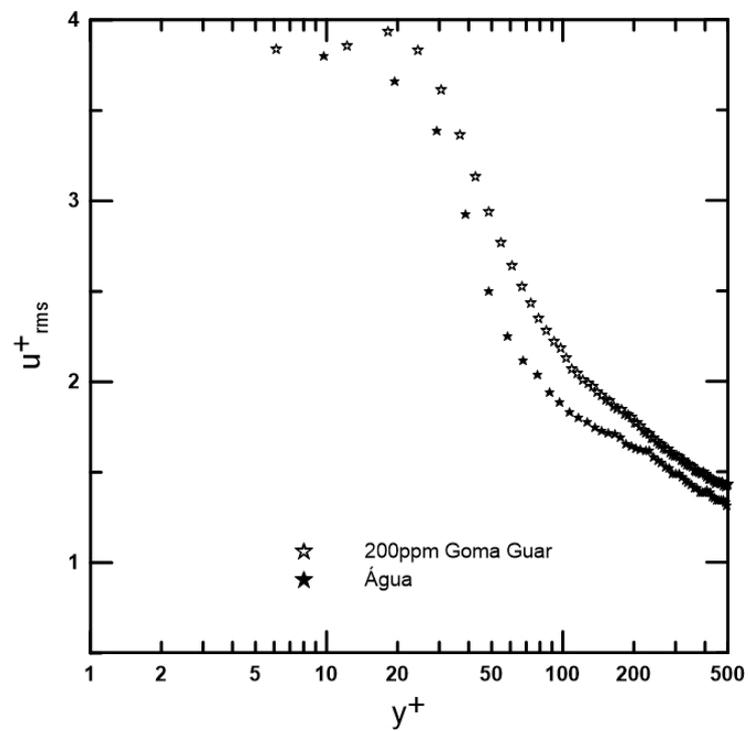


Figura 5.24: Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$.

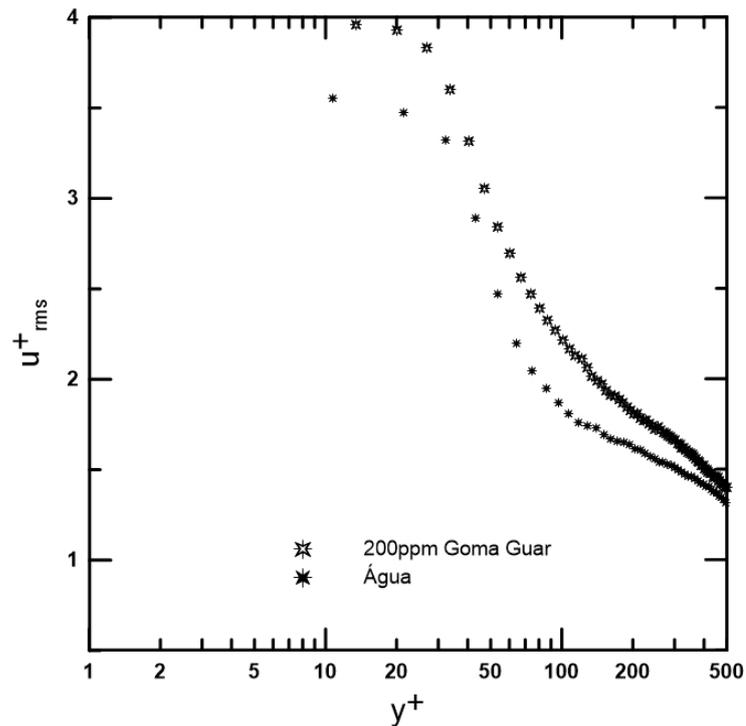


Figura 5.25: Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$.

A diferença entre os valores RMS das flutuações, entre solvente puro e solução polimérica para um mesmo Re_τ , mostrou-se diretamente proporcional ao aumento da redução de arraste, principalmente, comparando a Figura 5.22 com 14% de redução de arraste com a Figura 5.25 que possui 31%. As Figuras 5.26 a 5.29 apresentam as comparações entre os testes de água e solução polimérica, para mesmo número de Reynolds baseado na velocidade de cisalhante, das flutuações da velocidade radial RMS adimensionalizada. Observa-se que o polímero atua gerando uma atenuação das flutuações da velocidade radial, principalmente nas regiões próximas à parede do tubo.

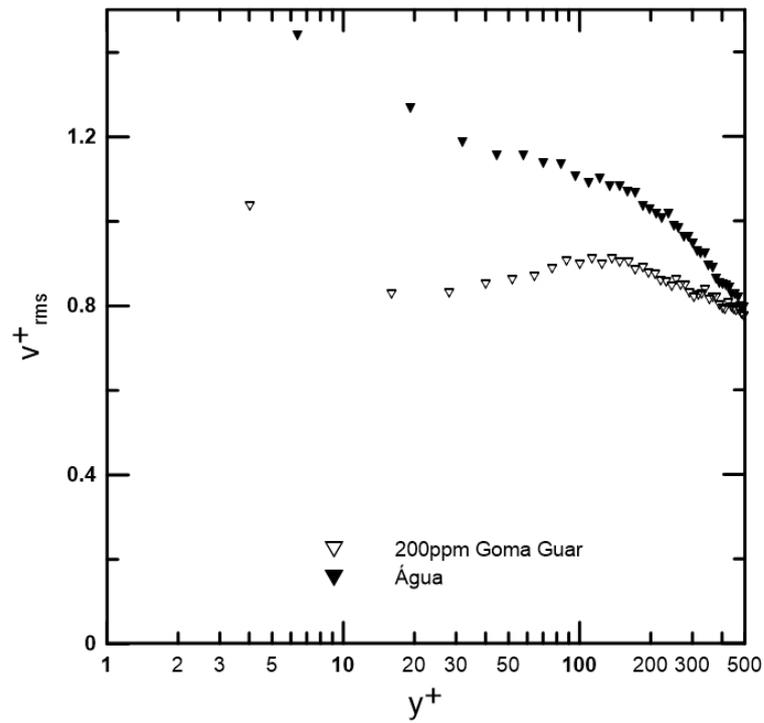


Figura 5.26: Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$.

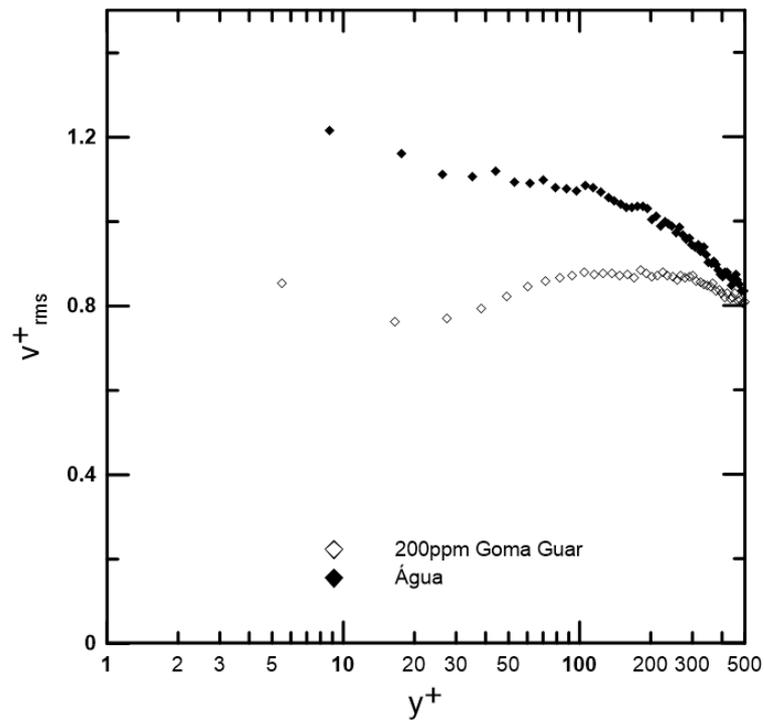


Figura 5.27: Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$.

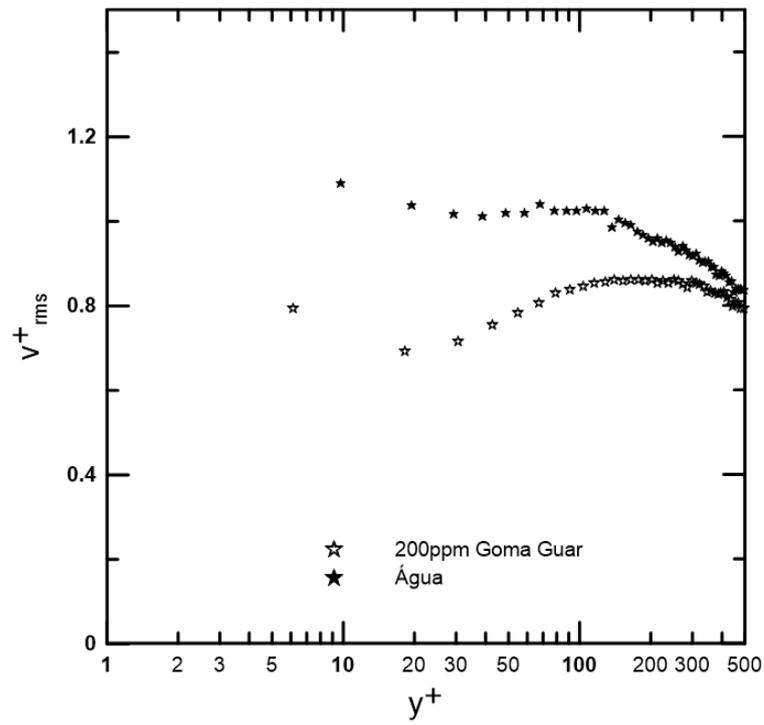


Figura 5.28: Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$.

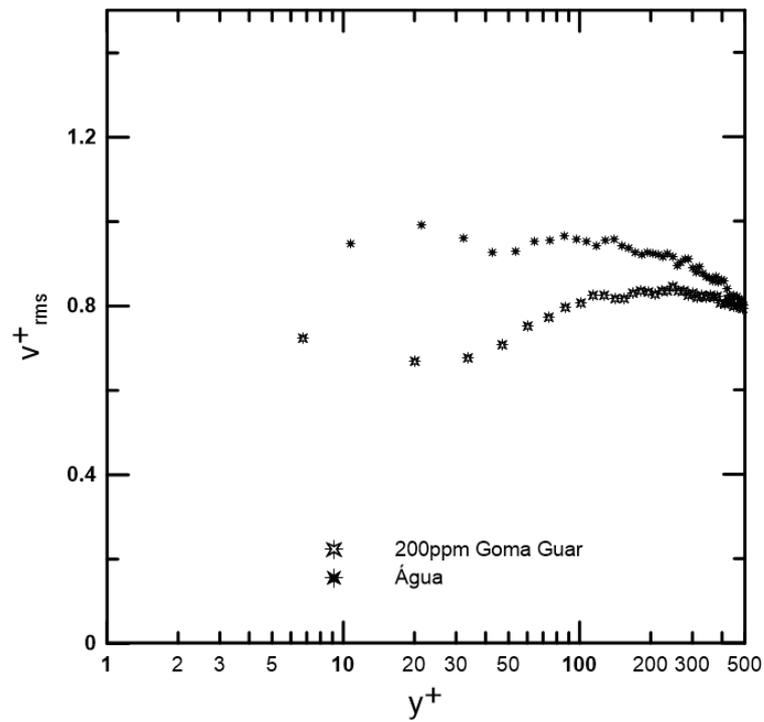


Figura 5.29: Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais, para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$.

O efeito observado nas flutuações para a solução polimérica, aumento na componente axial e redução na componente radial, é analisado por Andreotti [50] e den Toonder [49]. Segundo eles, esse efeito pode ser entendido como sendo uma repressão do transporte de quantidade de movimento radial através de flutuações turbulentas por consequência da anisotropia de tensões promovida pelo esticamento da macromolécula do polímero. E o fato de se aproximarem, conforme caminha para a região central do tubo, acontece por conta do predomínio das grandes escalas de turbulência, e estas são pouco impactadas pela presença polimérica.

5.2.3 Tensão de Reynolds

As Figuras 5.30 a 5.33 apresentam as comparações, entre água e solução polimérica, dos resultados da tensão de Reynolds adimensionalizada para o mesmo valor do número de Reynolds baseado na velocidade cisalhante.

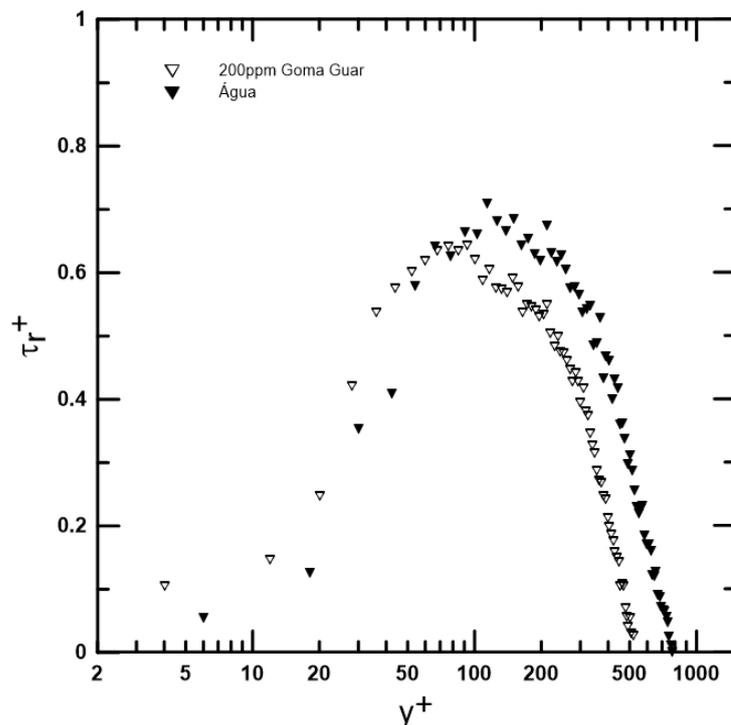


Figura 5.30: Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1042$.

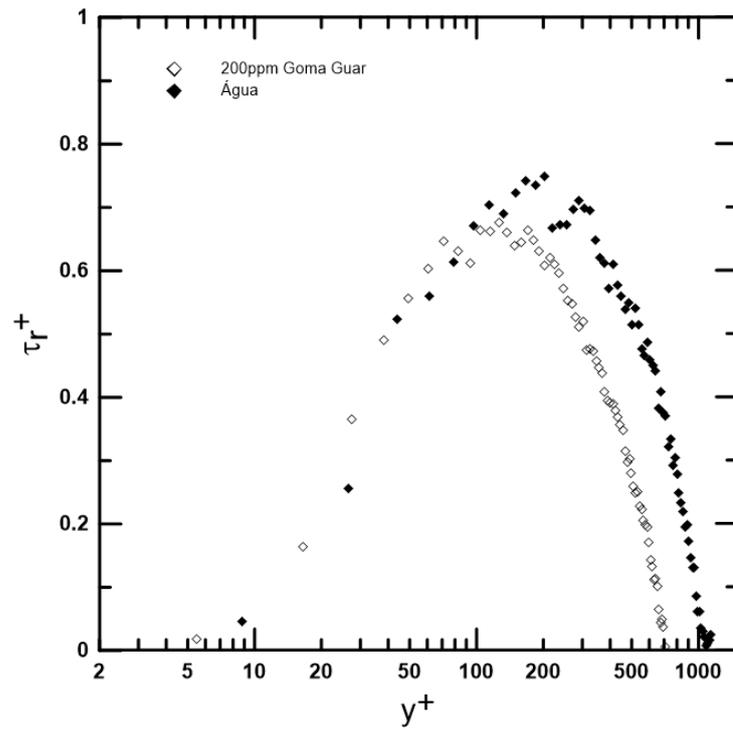


Figura 5.31: Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1427$.

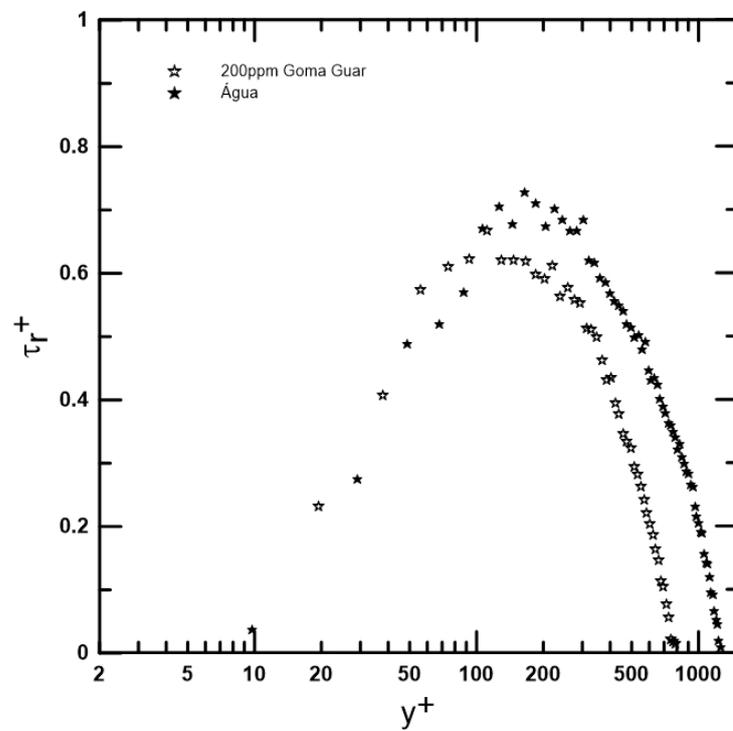


Figura 5.32: Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1584$.

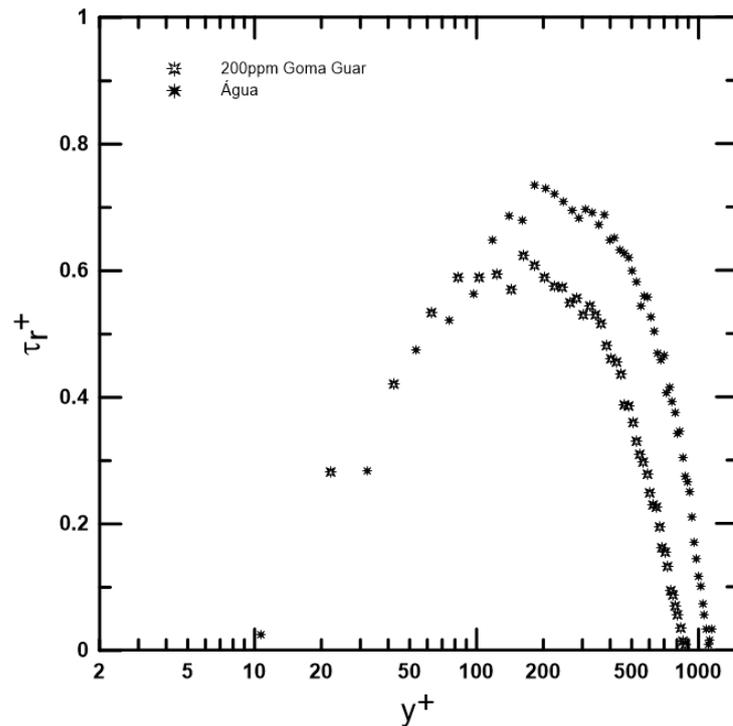


Figura 5.33: Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de y^+ , para água e solução polimérica, $Re_\tau \approx 1744$.

Observa-se uma diminuição da tensão de Reynolds entre a parede e o centro do tubo nos resultados com polímero, que é intensificada com o aumento da redução de arraste. A diminuição pode ser proveniente da atenuação na correlação entre as flutuações u' e v' ou o resultado da redução da magnitude das correlações.

A Figura 5.34 apresenta a tensão de Reynolds adimensionalizada em função de r/D . Nela observa-se a redução da tensão de Reynolds adimensionalizada com o aumento da redução de arraste. Para comparação foram adicionadas a tensão de cisalhamento total e a curva de água para $Re_\tau \approx 1744$.

Observa-se a redução da tensão de Reynolds com o aumento da redução de arraste, neste caso, apenas o teste de $Re_\tau \approx 1042$ não seguiu esta tendência. Para certificar os resultados os testes foram replicados e estão apresentados no Apêndice B. Os dados são evidenciados nas Figura B.1 até B.4. Nota-se que o resultado para $Re_\tau \approx 1042$ apresentou maior variabilidade, por isso não seguiu a tendência na Figura 5.34.

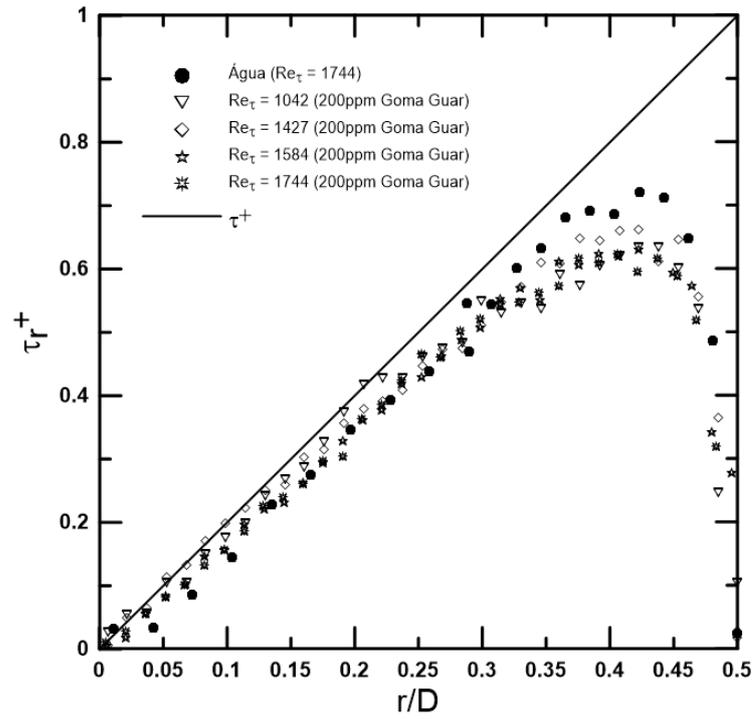


Figura 5.34: Perfis adimensionais da tensão de Reynolds, em função de r/D , para água com $Re_\tau \approx 1744$ e as soluções polimérica.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma abordagem experimental do fenômeno de redução de arraste juntamente com a utilização da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Os experimentos comparativos foram realizados para uma faixa de números de Reynolds de 17000 a 40000 e o polímero redutor de arraste foi a Goma Guar. A concentração de 200 ppm foi estabelecida como padrão.

Os resultados das grandezas turbulentas foram adquiridas por meio de 2500 campos instantâneos de velocidades para cada teste definido pelo número de Reynolds baseado na velocidade cisalhante e concentração polimérica. Esses resultados foram comparados com um escoamento turbulento com o mesmo número de Reynolds baseado na velocidade cisalhante para solvente puro (água).

A validação experimental apresentou boa concordância com os resultados já estabelecidos na literatura [26]. A incerteza do fator de atrito hidrodinâmico apresentou um valor igual a 1,2% quando se comparado a equação de Blasius.

Os resultados apresentaram uma redução de arraste de até 30% e praticamente não houve degradação polimérica durante o teste, como mostrado no Capítulo 4. Observou-se também, na presença do aditivo polimérico, uma alteração na estrutura do escoamento turbulento na região de transição, houve um prolongamento na camada de amortecimento e um deslocamento para cima da região logarítmica do perfil de velocidade quando comparado ao um fluido newtoniano.

Os perfis RMS das flutuações axiais apresentaram valores maiores e um afastamento da parede para a solução polimérica na região de baixo y^+ , já no centro da tubulação ambos apresentaram valores próximos. O perfil RMS das flutuações radiais apresentou valores menores e o pico deslocado para fora da parede quando comparado ao fluido newtoniano.

As tensões de Reynolds, com adição polimérica, apresentaram valores menores quando comparados aos testes de solvente puro. As tensões de Reynolds demonstrou sofrer uma queda no seu valor com o aumento do DR.

Como trabalho futuro sugere-se avaliar a comportamento de blends (polímeros rígidos e flexíveis) no escoamento turbulento. Utilização do PIV para o estudo de geometrias que promovem a redução de arraste de modo passivo, com isso pode-se avaliar um outro método que não modifica as propriedades do fluido.

Referências Bibliográficas

- [1] F. E. Bailey and J. V. Koleske, *Poly(ethylene oxide)*. Academic Press Inc., 1976.
- [2] Y. Dubief, C. M. White, V. E. Terrapon, E. S. G. Shaqfeh, P. Moin, and K. Lele, “On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows,,” *J. Fluid Mech*, vol. 514, 2004.
- [3] I. Procaccia and V. S. L’vov, “Theory of drag reduction and degradation with dilute polymer solution,,” 2008.
- [4] A. Gyr and H. W. Bewersdoff, “Drag reduction of turbulent flows by additives,,” *Kluwer Academic Publishers*, 1995.
- [5] H. Tennekes and J. L. Lumley, *A first Course in Turbulence*. The MIT Press, 1999.
- [6] M. Raffel, C. Willert, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*. Ed. Springer, 1998.
- [7] *Manual Insight 4G*.
- [8] *Dantec Dynamics - PIV*. Apresenta textos sobre Velocimetria por Imagens de Partículas.
- [9] *Yokogawa Electric Corporation, User’s Manual: AXR Two-wire Magnetic Flowmeter Integral Flowmeter*.
- [10] H. A. Abdulbari, A. Shabirin, and H. N. Abdurrahman, “Bio-polymers for improving liquid flow in pipelines—a review and future work opportunities,,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, pp. 1157–1170, 2014.

- [11] B. A. Toms, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large reynolds numbers.," *Proceedings of the International Congress of Rheology, Holland, North-Holland, Amsterdam, Section II*, pp. 135–141, 1948.
- [12] E. D. Burger and L. G. Chorn, "Studies of drag reduction over a broad range of pipeline conditions when flowing prudhoe bay crude oil," *J. Rheology*, vol. 24, p. 603, 1980.
- [13] L. Nijs, "New generation drag reducer," in *Proceedings of the 2nd International Pipeline Technology Conference, Elsevier, Ostend, Belgium*, 1995.
- [14] G. Fabula, "Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction," *Trans ASME J Basic Engng*, 1971.
- [15] R. C. R. Figueredo and E. Sabadini, "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide," *Colloids and Surfaces A*, vol. 215, 2003.
- [16] R. G. Larson, "Analysis of polymer drag reduction on a flat plane," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 111, 2003.
- [17] J. Golda, "Hydraulic transport of coal in pipes with drag reducing additives," *Chem Engng Commun*, vol. 45, 1986.
- [18] R. H. J. Sellen, J. W. Hoyt, J. Poliert, and O. Scrivener, "The effect of drag reducing additives on fluid flows and there industrial applications part ii: present applications and futures proposals," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 20, 1982.
- [19] J. G. Savins, "Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 4, 1964.
- [20] J. L. Lumley, "Drag reduction by additives," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 11, 1969.
- [21] J. L. Lumley, "Drag reduction in turbulent flow by polymer additives. j. polym," *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews*, vol. 7, 1973.
- [22] P. S. Virk, E. W. Merrill, H. S. Mickley, and K. A. Smith, "The toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 30, 1967.

- [23] P. S. Virk, H. S. Mickley, and K. A. Smith, "The ultimate asymptote and mean flow structure in tom's phenomenon.," *ASME-Journal of Applied Mechanics*, vol. 37, pp. 488–493, 1970.
- [24] P. S. Virk, "Drag reduction fundamentals.," *AICHE Journal*, vol. 21, pp. 625–650, 1975.
- [25] F. H. Bark, H. E. J, and M. T. Landahl, "Drag reduction in turbulent flow due to additives: a report on euromech.," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 68, 1975.
- [26] J. M. J. D. Toonder, M. A. Hulsen, G. D. C. Kuiken, and F. T. M. Nieuwstadt, "Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments.," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 337, pp. 193–231, 1997.
- [27] E. J. Hinch, "Mechanical models of dilute polymer in strong flows," *Physics of Fluids*, vol. 20, 1977.
- [28] G. Ryskin, "Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory," *Physiccal Review Letters*, vol. 59, 1987.
- [29] P. Orlandi, "A tentative approach to the direct simulation of drag reduction by polymers," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 60, 1995.
- [30] V. S. L'vov, A. Pomyalov, I. Procaccia, and V. Tiberkevich, "Drag reduction by polymer in wall bounded turbulence," *Physiccal Review Letters*, vol. 92, 2004.
- [31] M. Tabor and P. G. D. Gennes, "A cascade theory of drag reduction," *Europhysics Letter*, vol. 7, 1986.
- [32] D. D. Joseph, *Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids*. Springer-Verlag, 1990.
- [33] K. R. Sreenivasan and C. M. White, "The onset of drag reduction by dilute polymer additives and the maximum drag reduction asymptote," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 409, 2000.
- [34] T. Min, J. Y. Yoo, H. Choi, and D. D. Joseph, "Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 286, 2003.
- [35] B. H. Zimm, "Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow

- birefringence and dielectric loss,” *Journal of Chemical Physics*, vol. 24, 1956.
- [36] M. D. Warholic, D. K. Heist, M. Katcher, and T. J. Hanratty, “A study with particle-image velocimetry of the influence of dragreducing polymers on the structure of turbulence,” 2001.
- [37] C. M. White and M. G. Mungal, “Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives.,” *Annu. Rev. Fluid Mech*, vol. 40, pp. 235–256, 2008.
- [38] P. K. Ptasinski, F. T. M. Nieuwstadt, B. H. A. A. van den Brule, and M. A. Hulsen, “Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction.,” 2000.
- [39] H. A. Abdulbari, H. D. Mahammed, and Z. B. Y. Hassan, “Bio-inspired passive drag reduction techniques: A review,” *ChemBioEng Reviews*, 2015.
- [40] E. V. Bacher and C. R. Smith, “Turbulent boundary-layer modification by surface riblets,” *AIAA Journal*, vol. 24, 1986.
- [41] M. Çengel, A. Yunus, and J. Cimbala, *Mecânica dos fluidos*. Grupo A, 2015.
- [42] L. M. Pumisacho, “Medições do escoamento turbulento em tubos na presença de polímeros redutores de atrito,” Master’s thesis, PUC, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [43] A. Azevedo, *Velocimetria Por Imagem de Partículas*. PUC – Rio de Janeiro, 2011.
- [44] R. J. Adrian and C. S. Yao, “Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and scattering power of seeding materials.,” *Applied Optics*, vol. 24, pp. 44–52, 1985.
- [45] R. Adrian, “Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanic.,” *Annu. Rev. Fluid Mech*, vol. 23, pp. 261–304, 1991.
- [46] N. C. Dey and S. Laik, “Effect of temperature on intrinsic viscosity of partially hydrolyzed polyacrylamides,” *J. Inst. Eng*, vol. 66, pp. 22–24, 1986.
- [47] G. L. Novelli, L. A. Ferrari, G. G. Vargas, and B. V. Loureiro, “A synergistic analysis of drag reduction on binary polymer mixtures containing guar gum,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 137, 2019.

- [48] *Deosen Biochemical Ltda, Os tipos de gomas e suas aplicações na indústria.*
- [49] J. M. J. den Toonder, F. T. M. Nieuwstadt, and G. D. C. Kuiken, “The role of elongational viscosity in the mechanism of drag reduction by polymer additives,” *Appl. Sci. Res.*, vol. 54, pp. 95–123, 1995.
- [50] M. Andreotti, “Investigação da redução de arrasto por aditivos em escoamentos turbulentos em dutos,” Master’s thesis, UNB, Brasília, Brasil, 2002.
- [51] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The study of uncertainties in physical measurements.* University Science Books, 1997.
- [52] BIMP, *Evaluation of measurement data - Guide to expression of uncertainty in measurement.* JCGM, 2008.
- [53] H. W. Coleman and W. G. Steele, *Experimentation, Validation and Uncertainty Analysis for Engineers.* University Science Books, 2009.

Apêndice A

ANÁLISE DE INCERTEZAS

Para se ter um melhor entendimento sobre o fenômeno de redução de arraste estudado é importante conhecer as incertezas experimentais relacionadas à medição de cada variável e isso pode ser feito através da análise de incertezas. Neste apêndice serão mostrados os tipos de incertezas e o cálculo das mesmas.

De acordo com o método de avaliação, as incertezas podem ser divididas em dois grupos, "A" e "B". No tipo A, a avaliação deve ser baseada em métodos estatísticos para tratamento dos dados. O tipo B, a avaliação é baseada em julgamentos científicos, como por exemplo medições anteriores [51, 52]. Em muitos casos a variável a ser conhecida é obtida indiretamente a partir de outros fatores. Como exemplo, podemos equacionar o fator de atrito f em função da queda de pressão (ΔP), a distância entre os pontos das tomadas de pressão (Δx), o diâmetro do tubo (D), a massa específica (ρ) e a velocidade média do escoamento (U_b), Equação A.1.

$$f = \phi(\Delta P, \Delta x, D, \rho, U_b) \quad (\text{A.1})$$

E por sua vez, a velocidade (U_b) é uma função da vazão volumétrica (Q) e do diâmetro do tubo (D), Equação A.2.

$$U_b = \phi(Q, D) \quad (\text{A.2})$$

De modo geral, os resultados medidos podem ser expressos em uma quantidade x , Equação A.3, onde δ_x é chamado de incerteza [51]. Isso, devido às incertezas associadas a cada medição.

$$(\text{valor medido de } x) = x \pm \delta_x \quad (\text{A.3})$$

É comum expressar o valor medido de x em termos do percentual de incerteza multiplicando a incerteza relativa (δ_x/x) por 100, ($\delta_x/x \times 100$), como mostra a Equação A.4.

$$(\text{valor medido de } x) = x \pm \left(\frac{\delta_x}{x} \right) (\%) \quad (\text{A.4})$$

É possível escrever o fator de atrito na forma da Equação A.4, onde a incerteza relativa do fator de atrito pode ser determinada usando o método das séries de Taylor [53], Equação A.5.

$$y_f = \left(\frac{\delta_f}{f} \right) = k \left[\left(\frac{\Delta P}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta P} \right)^2 \left(\frac{\delta_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^2 + \left(\frac{l}{f} \frac{\delta f}{\partial l} \right)^2 \left(\frac{\partial_l}{l} \right)^2 + \left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D} \right)^2 \left(\frac{\partial_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)^2 \left(\frac{\partial_\rho}{\rho} \right)^2 + 2 \left(\frac{U_b}{f} \frac{\partial f}{\partial U_b} \right)^2 \left(\frac{\partial_{U_b}}{U_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

Sendo que k é o fator de abrangência e os termos $\left(\frac{\Delta P}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta P} \right)$, $\left(\frac{l}{f} \frac{\delta f}{\partial l} \right)$, $\left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D} \right)$, $\left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)$ e $\left(\frac{U_b}{f} \frac{\partial f}{\partial U_b} \right)$ são conhecidos como fatores de ampliação da incerteza para a diferença de pressão, comprimento, diâmetro, massa específica e velocidade média respectivamente. Fazendo os cálculos e considerando uma confiabilidade de 95% ($k = 2$), encontra-se um percentual de incerteza para o fator de atrito para tubo. Neste trabalho, a incerteza encontrada com esses cálculos foi de 1,2%.

Apêndice B

REPLICAÇÕES

Neste apêndice são apresentados os testes replicados para a conclusão da Figura 5.34. Essas Figuras, B.1 a B.4, mostram que o teste para $Re_\tau \approx 1042$ apresentou grande variação quando comparados com os demais.

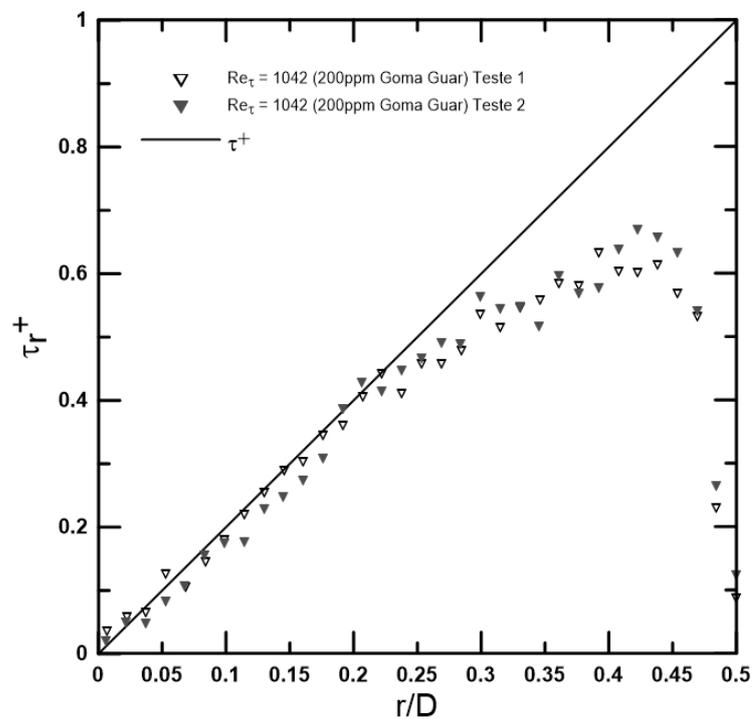


Figura B.1: Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1042$.

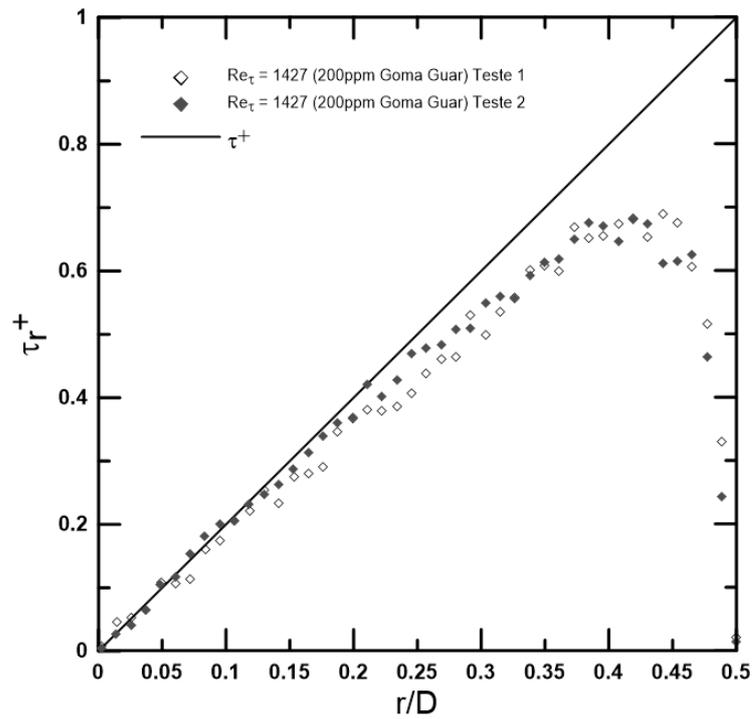


Figura B.2: Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1427$.

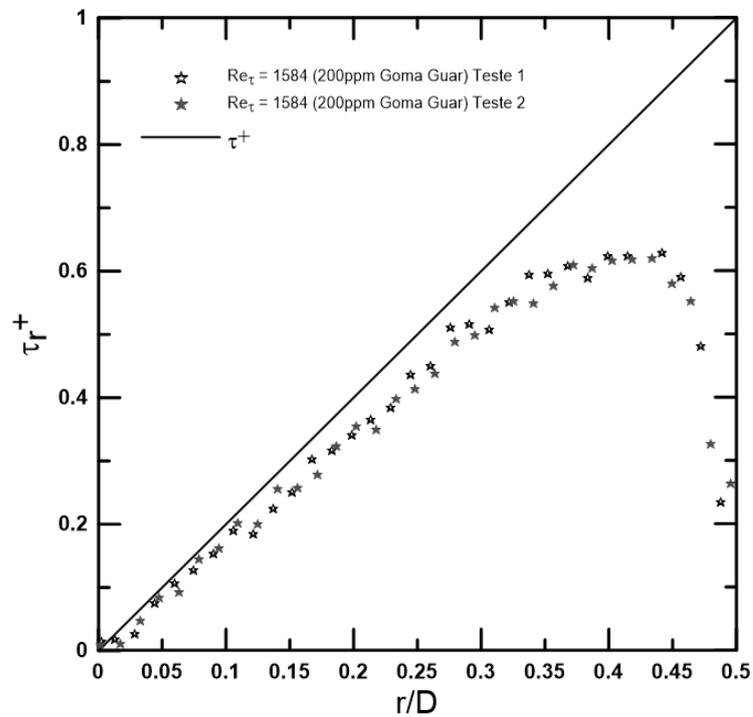


Figura B.3: Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_\tau \approx 1584$.

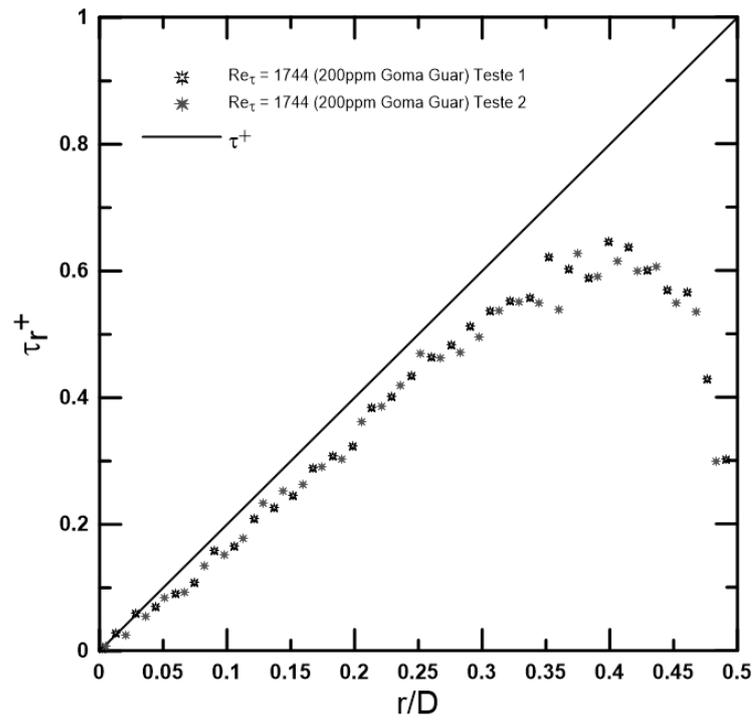


Figura B.4: Replicação dos resultados de perfil adimensional da tensão de Reynolds, em função de r/D , para solução polimérica com $Re_{\tau} \approx 1744$.