

6 Resultados dos experimentos

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos para o escoamento turbulento totalmente desenvolvido de um tubo circular. Os testes realizados envolveram cinco valores do número de Reynolds para o escoamento de água e para uma solução de água e aditivo polimérico redutor de atrito. Em todos os testes a concentração da solução do aditivo foi mantida constante e igual a 20 ppm em massa.

Os experimentos consistiram na medição de grandezas globais e locais, assim como grandezas estatísticas para a caracterização da turbulência. Foram medidos a queda de pressão ao longo do tubo, e perfis de velocidade média e valores RMS das flutuações turbulentas da velocidade. Também foram determinados perfis de tensão turbulenta e viscosa. Com o objetivo de avaliar o efeito do polímero no escoamento, os resultados com o aditivo foram comparados com aqueles obtidos para a água. Resultados do trabalho de Toonder [7] para a mesma concentração de solução polimérica foram também usados como forma de validar os resultados obtidos.

As informações sobre os perfis de velocidade foram obtidas com a utilização da técnica de velocimetria por imagem de partículas – *PIV*, descrita no Capítulo 3. Em cada experimento, foram adquiridos 2500 campos instantâneos de velocidade, número considerado suficiente para produzir dados estatísticos de boa qualidade.

Nos experimentos conduzidos, os níveis de redução de atrito encontrados situaram-se na faixa de 30 a 40%.

6.1. Casos testados

Nesta seção é apresentada uma matriz dos casos experimentais testados ao longo do estudo conduzido. As Tabelas 6.1 e 6.2 resumem as informações sobre cada caso testado. A Tabela 6.1 apresenta os ensaios realizados com água, enquanto a Tabela 6.2 mostra os dados referentes aos ensaios conduzidos com a solução polimérica. A primeira coluna de cada tabela

apresenta os símbolos que serão usados nos gráficos que apresentam os resultados experimentais detalhados.

Em cada tabela são apresentados os valores das vazões volumétricas e velocidades médias de fluido utilizadas, assim como as propriedades termo físicas medidas. São apresentados também os valores para o número de Reynolds baseado na velocidade média e a gradiente de pressão medido. As escalas de velocidade e comprimento são apresentadas. O valor do número de Reynolds baseado na velocidade de atrito e no diâmetro do tubo, e fornecido para cada experimento. No caso da Tabela 6.2, é apresentada também a redução de atrito percentual obtida para cada ensaio para vazão constante.

Tabela 6.1 Casos testados nos experimentos com água.

Casos experimentais para água									
Símbolo	Q	V	ρ	μ $\times 10^{-4}$	Re	$\Delta P/L$	u_r	Re_r	v/u_r
	l/min	m/s	kg/m ³	kg/m*s		kPa/m	(mm/s)		(μ m)
▲	34,4	0,63	997,27	9,09	23554	0,151	35,8	1336	25,4
◆	60,0	1,10	997,19	9,03	41334	0,402	58,5	2197	15,4
●	74,3	1,36	997,14	8,99	51428	0,587	70,7	2667	12,7
■	90,9	1,67	997,09	8,95	63237	0,812	83,2	3152	10,8
★	113,6	2,09	997,04	8,90	79390	1,213	101,7	3872	8,78

Tabela 6.2 Casos testados nos experimentos com solução polimérica com concentração de 20 ppm em massa.

Casos experimentais para solução polimérica com concentração de 20 ppm em massa									
Símbolo	V	ρ	μ $\times 10^{-4}$	Re	$\Delta P/L$	u_r	Re_r	v/u_r	DR_P
	m/s	kg/m ³	kg/m*s		kPa/m	(mm/s)		(μ m)	(%)
△	0,63	997,27	9,09	23417	0,109	30,4	1134	30,0	27,9
◇	1,10	997,24	9,07	41146	0,261	47,2	1763	19,3	35,0
○	1,36	997,22	9,05	51079	0,402	58,5	2192	15,5	31,5
□	1,67	997,19	9,03	62666	0,563	69,2	2600	13,1	30,7
☆	2,08	997,17	9,01	78359	0,824	83,8	3154	10,8	32,1

A velocidade de atrito u_τ é definida pela Eq. 2-26, e foi determinada a partir das medições da queda de pressão de acordo com,

$$u_\tau = \left(\frac{D}{4\rho} \left| \frac{\Delta P}{\Delta L} \right| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-1)$$

onde $\Delta P/L$ é a gradiente de pressão, D é o diâmetro do duto, ρ é a massa específica do fluido

A escala de comprimento viscoso ν/u_τ é determinada pela razão da viscosidade cinemática do fluido pela velocidade de atrito. Os números de Reynolds Re e Re_τ são definidos pela velocidade média do duto e a velocidade de atrito, respectivamente.

É relevante mencionar que a variação da temperatura durante cada experimento foi de 0.1°C.

6.2.

Resultados para o fator de atrito hidrodinâmico

O fator de atrito hidrodinâmico foi avaliado a partir do gradiente de pressão na região de escoamento desenvolvido, como descrito no Capítulo 4. O fator de atrito é de dado pela seguinte equação,

$$f = \frac{2(\Delta P / L)D}{\rho(Q / A)^2} \quad (6-2)$$

onde, $\Delta P/L$ é o gradiente de pressão, D o diâmetro do duto, ρ é a massa específica do fluido, Q é a vazão e A é a área da seção transversal do duto.

A Figura 6.1 apresenta os resultados obtidos para o fator de atrito como função do número de Reynolds baseado na velocidade média, para a água e para a solução a 20 ppm do polímero Superfloc A110. A figura apresenta também uma curva correspondendo à equação (2-7) que representa a equação semi-empírica de Blasius para o escoamento turbulento de um fluido newtoniano através de um tubo liso.

Pode-se observar na figura a excelente concordância dos resultados do presente trabalho com a equação de Blasius, o que indica que os procedimentos experimentais utilizados foram adequados. Os níveis de incerteza experimental na determinação do fator de atrito, estimados pela metodologia indicada no Anexo A, ficaram na faixa de 3 a 7%.

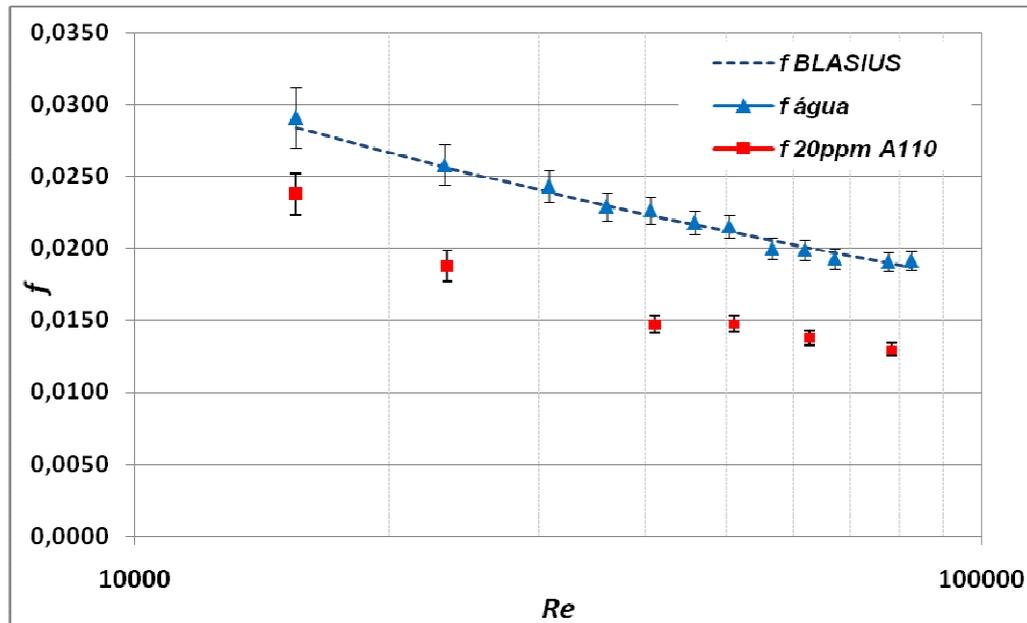


Figura 6.1 – Resultado para o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução de polímero Superfloc A110 a 20 ppm em massa

Para melhorar a visualização dos resultados, foram plotados em coordenadas de Prandtl – Karman apresentados na Figura 6.2. Os resultados obtidos para a solução de polímero mostram, em primeiro lugar, reduções apreciáveis no fator de atrito, quando comparado ao da água. Estas reduções, da ordem de 28 a 35%, são consideradas apreciáveis tendo em vista a pequena concentração de polímero utilizada e também o fato que os experimentos foram conduzidos em circuito fechado, o que acarreta em degradação mecânica do polímero.

Nota-se nos resultados da Figura 6.2, ou nos dados da Tabela 6.2, uma tendência de aumento da redução do fator de atrito com o aumento do número de Reynolds. Este fato pode ser interpretado seguindo os argumentos de Lumley [13] que associa a redução de atrito a uma relação entre o tempo de relaxação do polímero e escalas de tempo do escoamento turbulento. De acordo com esta interpretação, a redução de atrito se dá quando o tempo de relaxação do polímero for maior que a escala de tempo do escoamento. Assim, a tendência observada de maiores reduções de atrito para maiores números de Reynolds está de acordo com esta interpretação pois, sabe-se que menores escalas de tempo do escoamento estão presentes quando o valor do número de Reynolds é mais elevado. Esta tendência e argumentação são encontradas na literatura nos trabalhos de Andreotti [4], Den Toonder [7] e White[6].

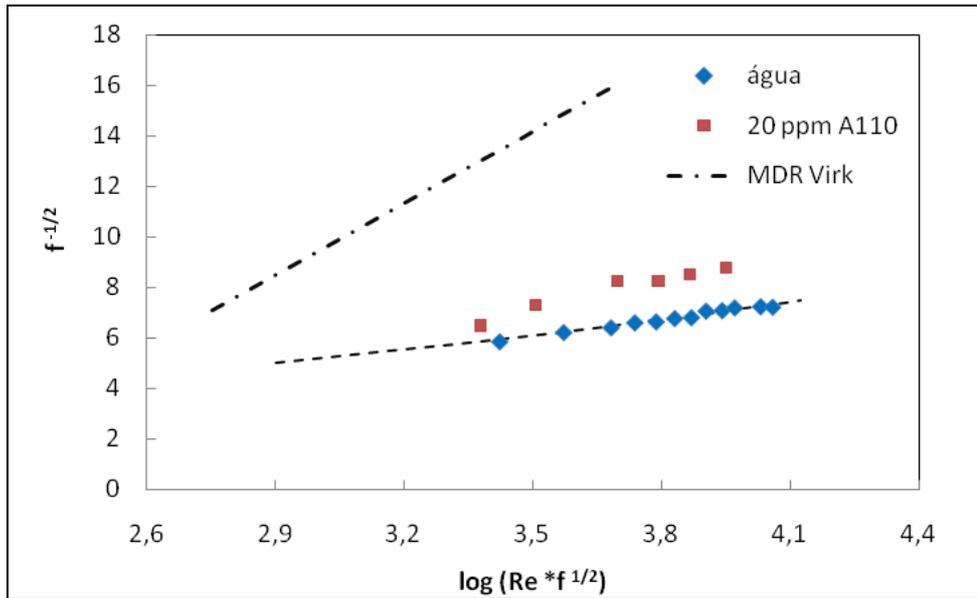


Figura 6.2 – Relação entre o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução de polímero Superfloc A110 a 20 ppm em massa com o número de Reynolds em coordenadas de Prandtl - Karman

6.3. Resultados para o fluido newtoniano

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais para o campo de velocidade do escoamento turbulento de água, obtidos empregando-se a técnica PIV. Serão apresentados os resultados para os cinco valores do número de Reynolds ensaiados. Informações sobre as condições de operação de cada experimento podem ser encontradas na Tabela 6.1.

A apresentação será iniciada pelos resultados para campos de velocidade média, seguindo-se outras estatísticas que caracterizam o escoamento turbulento. Quando pertinente, os resultados apresentados serão comparados com os experimentos de Toonder [8], realizados para um número de Reynolds de 24.580.

6.3.1. Perfis de velocidade média

Antes de apresentarmos os perfis de velocidade média, é ilustrativo apresentar uma imagem típica de um campo instantâneo de velocidade. A imagem da Figura 6.3, obtida para escoamento de água com Reynolds igual a 4.2×10^4 , apresenta a magnitude do vetor velocidade em um plano meridional

passando pelo centro do tubo. A região apresenta uma extensão de cerca de um diâmetro de comprimento. As linhas horizontais da figura definem as paredes do tubo. A escala de cores mostrada na figura indica o valor da magnitude da velocidade. As cores azuis na parte superior da figura encontram-se dentro da espessura da parede do tubo e devem ser ignoradas na análise.

O mapa de velocidades instantâneas mostra qualitativamente o comportamento esperado para o escoamento desenvolvido em um tubo, onde uma grande região com velocidades próxima à velocidade máxima domina a região central do tubo.

Para cada valor do número de Reynolds ensaiado, foram obtidas 2500 imagens como a apresentada na Figura 6.3, de onde foram obtidos os valores médios e as informações estatísticas desejadas.

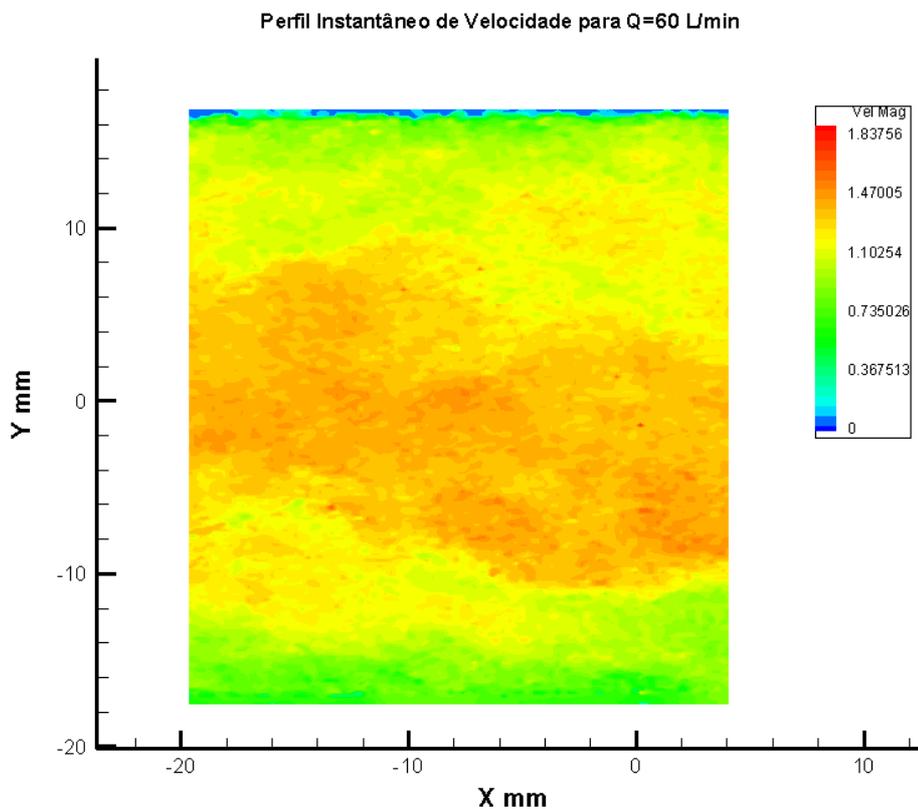


Figura 6.3 – Campo bi-dimensional instantâneo de magnitude da velocidade para escoamento de água com $Re = 4.2 \times 10^4$. A região azul em torno se localiza fora da seção de escoamento do tubo.

Na apresentação que se segue, as componentes da velocidade instantânea serão denominadas $U(t)$ e $V(t)$, respectivamente nas direções dos eixos coordenados X e Y . Estas componentes são separadas em uma parcela média e outra flutuante, de acordo com a decomposição de Reynolds,

$$U(t) = \bar{U} + u'(t); V(t) = \bar{V} + v'(t) \quad (6-3)$$

onde, u' e v' são as flutuações instantâneas de velocidade nas respectivas direções. \bar{U} e \bar{V} são as velocidades médias calculadas a partir dos N campos instantâneos de velocidade, de acordo com a equação (6-4). Nos perfis, a componente U da velocidade representa a velocidade axial e a componente V representa a velocidade radial.

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^N \frac{U_i}{N}; \quad \bar{V} = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{N} \quad (6-4)$$

A Figura 6.4 apresenta perfis de vetores velocidade média em posições axiais selecionadas, superpostos ao campo de magnitude da velocidade. Este campo é o resultado da média de 2500 campos instantâneos, como descrito no parágrafo anterior. Cada campo instantâneo de velocidade produzia cerca de 17.000 vetores velocidade. Na apresentação da Figura 6.4, a maioria destes vetores foi suprimida, para tornar possível a observação dos perfis de velocidade nas diversas posições axiais apresentadas.

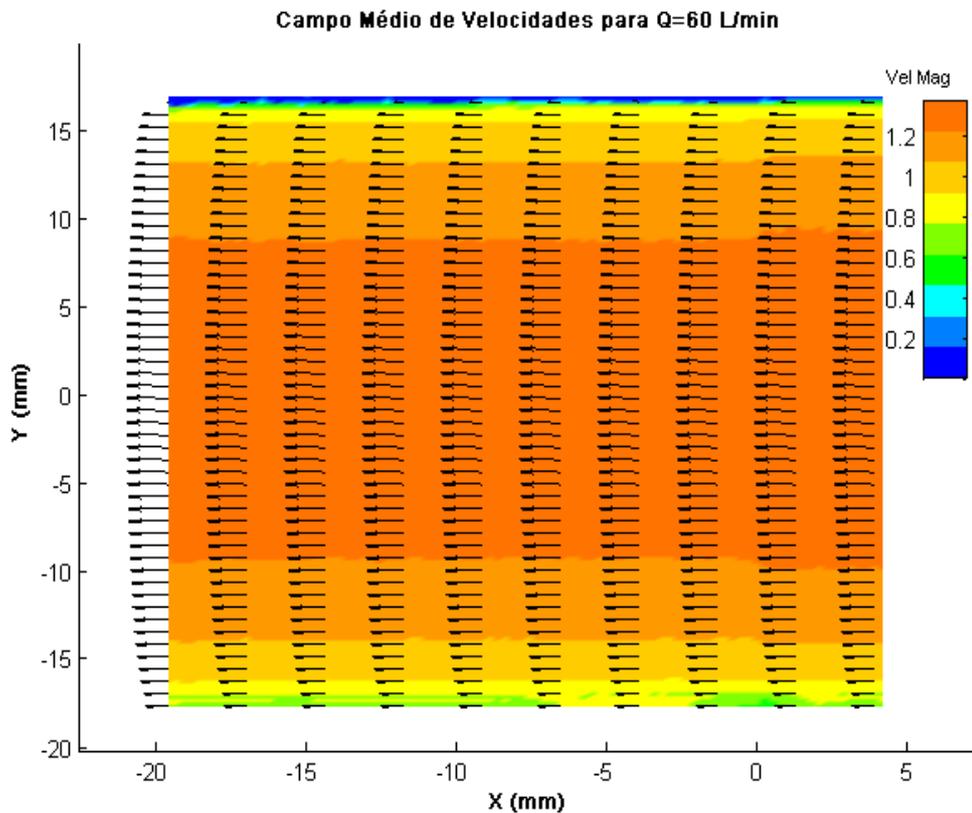


Figura 6.4 – Perfis de velocidade média extraídos do campo completo de velocidade média para escoamento de água a $Re = 4.2 \times 10^4$.

A Figura 6.5 apresenta perfis adimensionais de velocidade média axial, $U^+ = U/u_\tau$, para os cinco valores do número de Reynolds ensaiados. Nesta apresentação a velocidade foi adimensionalizada pela velocidade de atrito u_τ , definida pela equação (6-1), enquanto a coordenada radial foi adimensionalizada pelo diâmetro do tubo, r/D . A título de comparação, foram incluídos na figura os resultados de Toonder [8], obtidos pela técnica de velocimetria laser-Doppler para $Re = 2,45 \times 10^4$, valor próximo do menor valor estudado no presente trabalho. De modo a permitir uma melhor observação dos perfis de velocidade, alguns dados de velocidade na região central do tubo foram removidos.

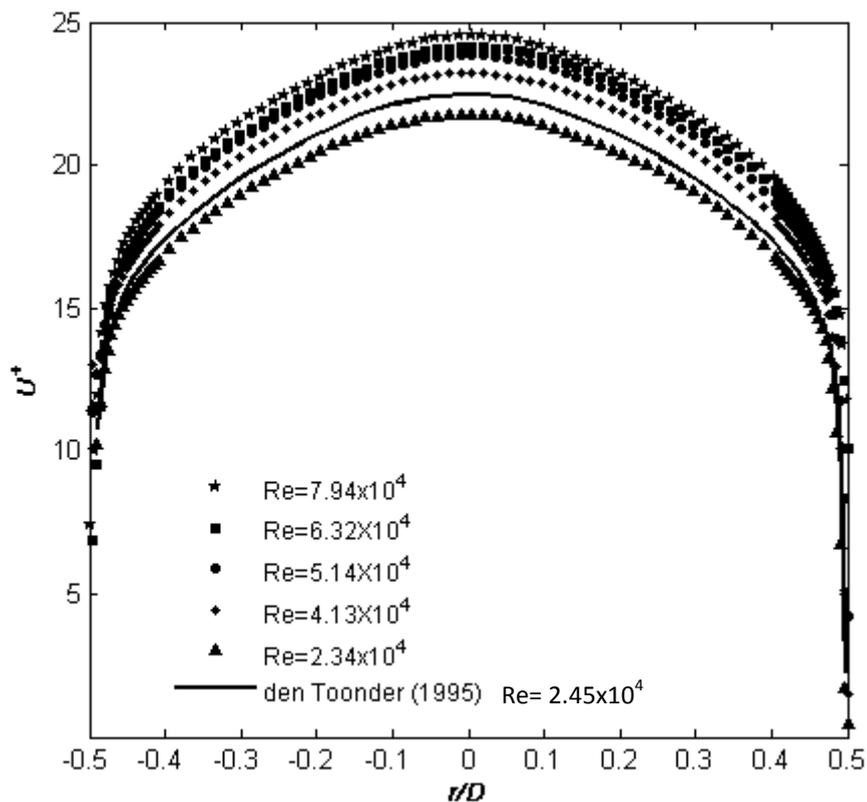


Figura 6.5 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para escoamento de água a diversos valores do número de Reynolds.

Uma análise geral dos resultados da Figura 6.5 mostra, em primeiro lugar, uma excelente simetria dos perfis de velocidade para todos os valores de número de Reynolds ensaiados. Apesar de ser um resultado esperado, a simetria dos perfis é uma indicação da qualidade do alinhamento do tubo da seção de testes e do bom condicionamento do escoamento na entrada. Notável também, é o número de medidas de velocidade que foram obtidas na região muito próxima à parede, um desafio para a técnica PIV aplicada a dutos com superfícies curvas. Nota-se claramente o aumento contínuo do valor da derivada

da velocidade na parede com o aumento do número de Reynolds. O posicionamento do perfil de velocidade de Toonder relativamente aos perfis do presente trabalho é coerente com o valor do número de Reynolds daqueles testes, o que ajuda a validar os resultados do presente trabalho.

Utilizando-se a simetria apresentada pelos perfis de velocidade, os resultados da Figura 6.5 são apresentados na Figura 6.6 apenas para metade do tubo, o que facilita a observação dos perfis de velocidade medidos.

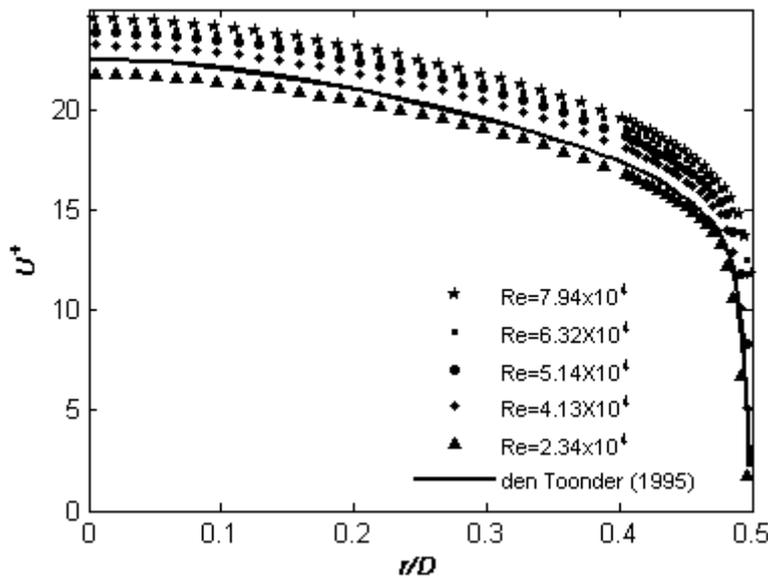


Figura 6.6 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D . Resultados são os mesmos da Figura 6.5.

Com mais uma forma de validar os dados experimentais obtidos, é apresentado na Figura 6.7 uma comparação com os perfis de velocidade gerados pela lei de potência, dada por,

$$\frac{\bar{U}}{U_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{6-5}$$

onde o expoente é obtido de, $n = -1.7 + 1.8 \log Re$.

Excelente concordância é obtida na região mais próxima à parede, observando-se um pequeno desvio na região da linha de centro, onde a lei de potência não apresenta bons resultados.

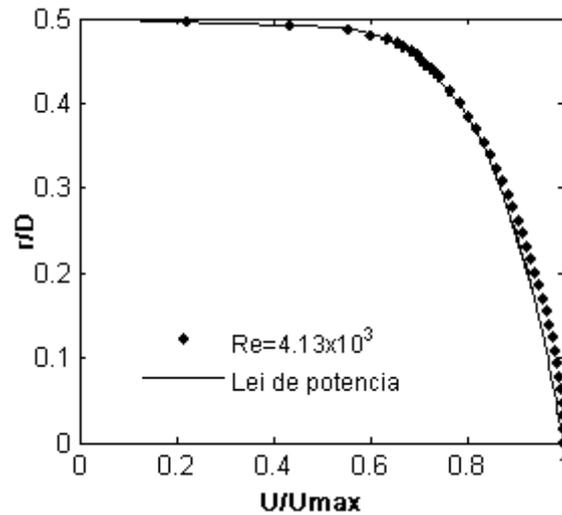


Figura 6.7 – Comparação dos perfis de velocidade medidos com a lei de potência dada pela equação (6-5) para escoamento de água a $Re=4,13 \times 10^4$

A Figura 6.8 apresenta os resultados para os perfis de velocidade em termos de coordenadas de parede. Como pode ser observado nas nossas medições, não temos muitos dados para as posições da parede para valores menores que $y^+ = 5$ devido aos efeitos da refração na parede curva do tubo. Além disso, observa-se que os dados obtidos apresentam uma pequena variação quando comparados com a lei para a camada logarítmica dada pelas eq. (2-28) e eq.(2-29) estando deslocados em relação ao perfil aceito na literatura, este desvio é atribuído à incerteza na medição da queda de pressão que é da ordem de 3% ao 7 % portanto afeta diretamente a velocidade de atrito u_τ utilizada como referência para normalizar as velocidades.

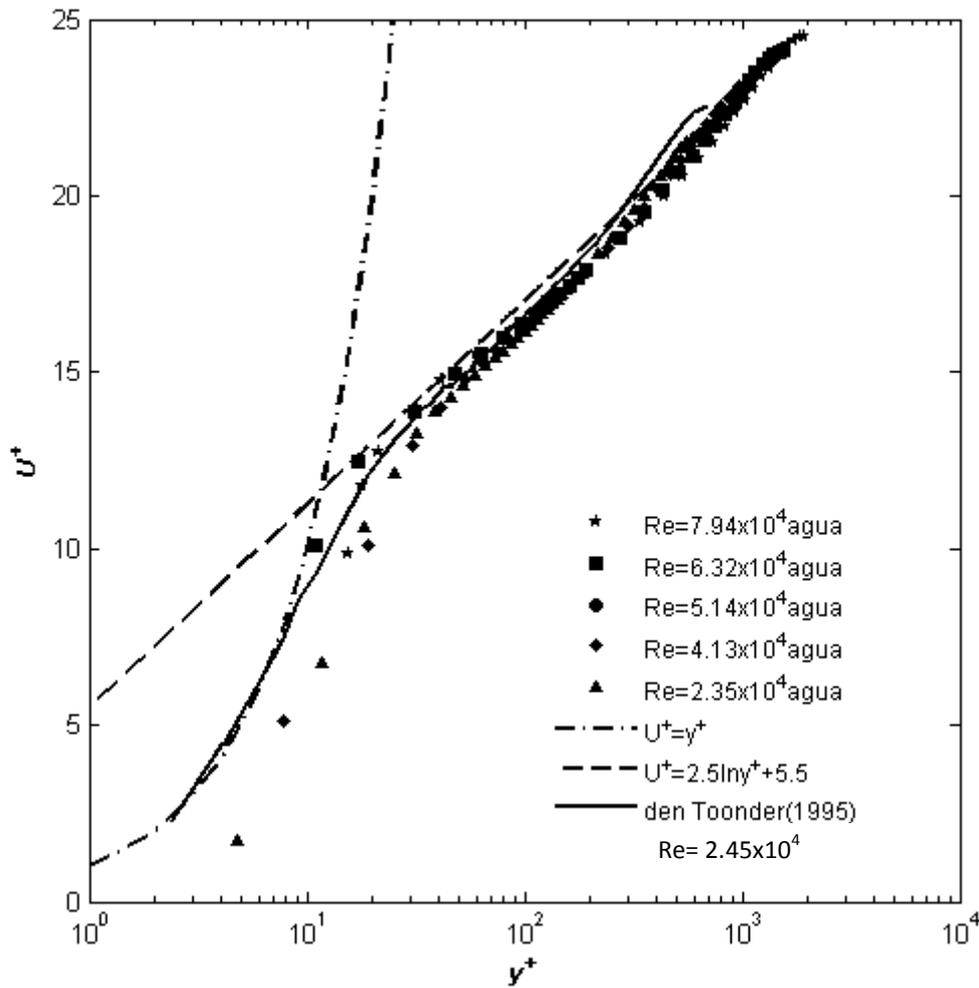


Figura 6.8 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede para diferentes números de Reynolds. O centro do duto está a $y^+ = 1929, 1575, 1333, 1098, 668$.

6.3.2. Flutuações de velocidade

O valor RMS (*root mean square*) das flutuações de velocidade nas duas direções foi determinado a partir dos campos 2500 campos de velocidade instantâneos medidos e dos campos médios determinados. Estas grandezas foram calculadas como,

$$u_{RMS}^+ = \frac{1}{u_\tau} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u'_i)^2} \tag{6-6}$$

$$v_{RMS}^+ = \frac{1}{u_\tau} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i')^2} \tag{6-7}$$

Na Figura 6.9 é apresentado o perfil da velocidade axial RMS adimensional, u_{RMS}^+ . Pode-se observar na figura a presença de um máximo na distribuição do valor RMS da flutuação axial em torno de $y^+ = 20$, independentemente do valor do número de Reynolds. Nota-se também a boa concordância com os resultados de Toonder [8].

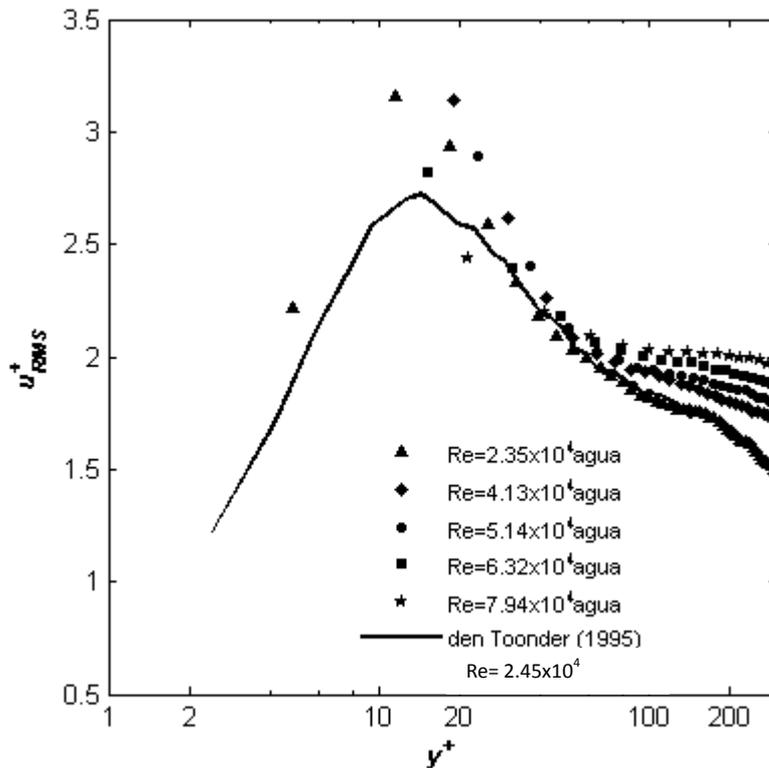


Figura 6.9 – Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações axiais de velocidade para escoamento de água.

Na Figura 6.10 são apresentados os perfis da flutuação de velocidade radial RMS, v_{RMS}^+ . Para o perfil RMS radial verifica-se que com o aumento do número de Reynolds o pico da flutuação de velocidade se situa mais distante da parede, o que concorda com os resultados obtidos por Toonder [8].

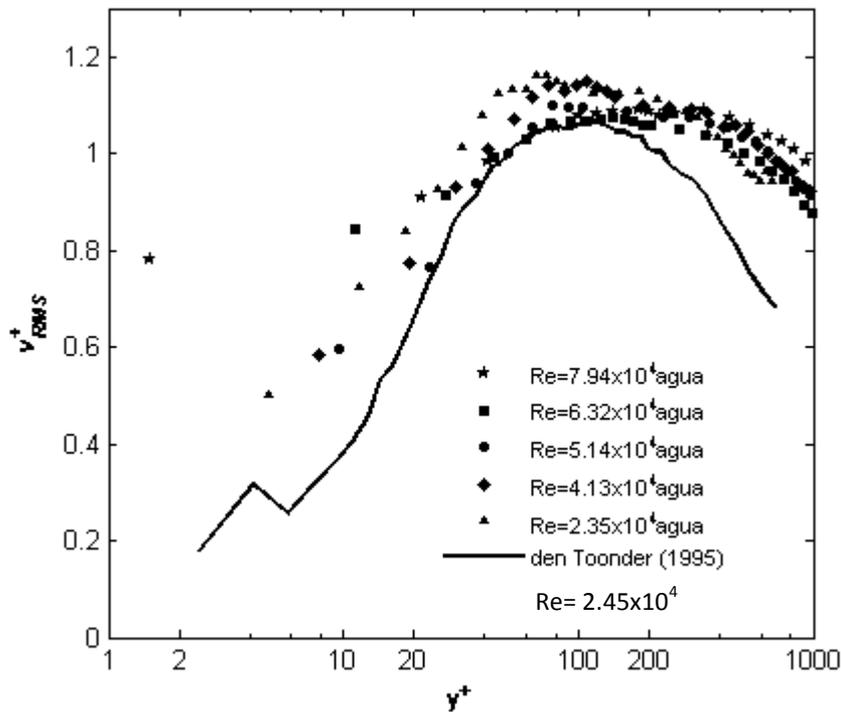


Figura 6.10 – Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações radiais da velocidade para escoamento de água.

Nas duas figuras anteriores pode-se observar a ausência de dados próximos à parede, além do elevado nível de ruído para as medições mais próximas à parede que, provavelmente, são oriundas dos reflexos produzidos pela parede que dificultam a identificação das partículas utilizadas na técnica PIV.

Toonder [8] apresenta em seu trabalho os valores RMS da velocidade normalizados pela velocidade média em função da região perto da parede, o que dá uma idéia do ruído presente nas medições. Na Figura 6.11 e Figura 6.12 apresentamos esta relação observando que para a componente axial há uma excelente concordância entre todos os dados obtidos e os resultados de Toonder, além de que a influência do ruído é menor. Já para a componente radial a influência do ruído é maior.

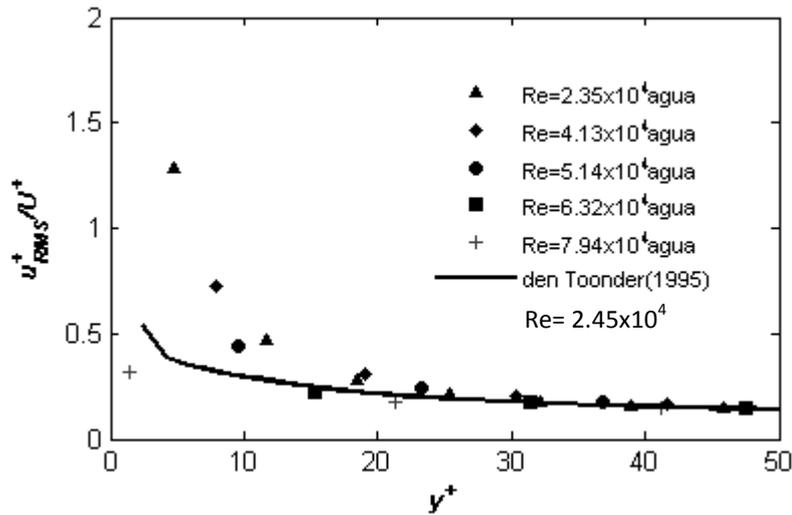


Figura 6.11 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais normalizada pela velocidade media em função da distância da parede y^+ .

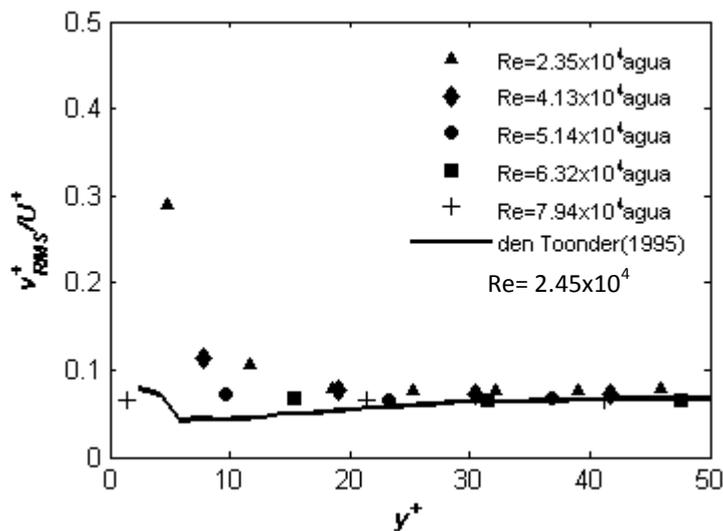


Figura 6.12 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais normalizada pela velocidade media em função da distância da parede y^+ .

Antes de encerrar a apresentação das grandezas que caracterizam o escoamento turbulento, convém apresentar um campo típico de flutuações de velocidade obtidos com a técnica PIV e super-resolução empregada. Pode-se notar a riqueza de informações contidas na figura, como estruturas de vórtices formando-se junto às paredes e na região intermediária do tubo.

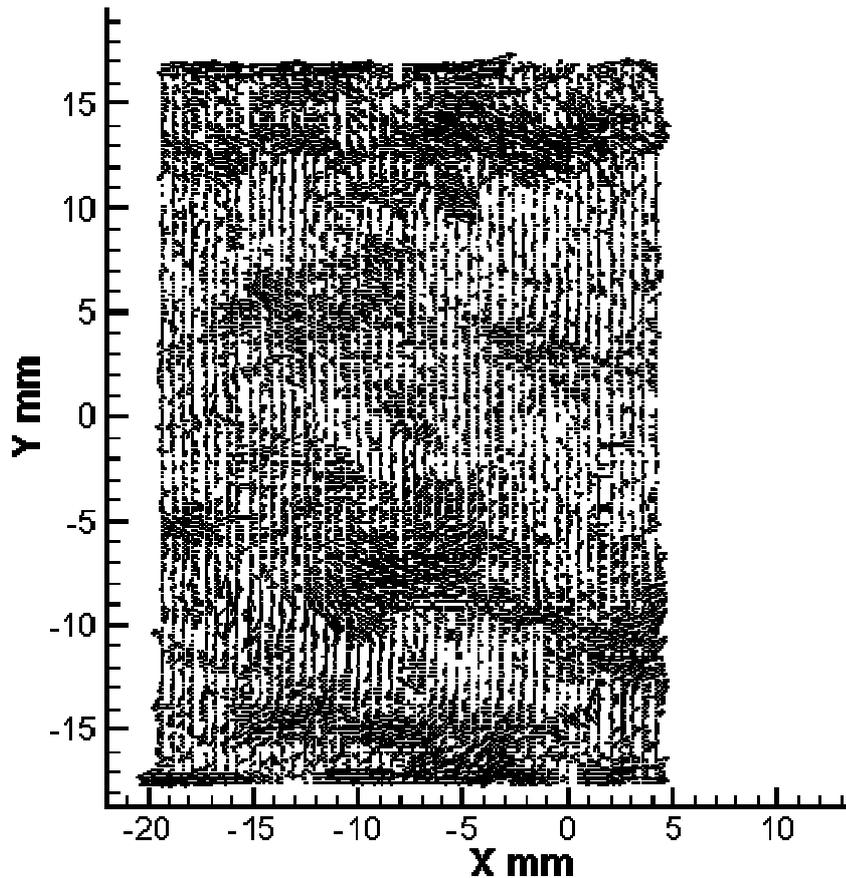


Figura 6.13 – Campo instantâneo de flutuações da velocidade para escoamento turbulento de água a $Re = 7,94 \times 10^4$ medido com a técnica PIV de super-resolução.

6.3.3. Tensão cisalhante

Nesta seção são apresentados os resultados para a tensão cisalhante obtidos para o escoamento com água.

Os resultados para os perfis da tensão de Reynolds ou tensão turbulenta são apresentados na Figura 6.14 na forma adimensional. A tensão de Reynolds adimensional é definida na equação (6-9).

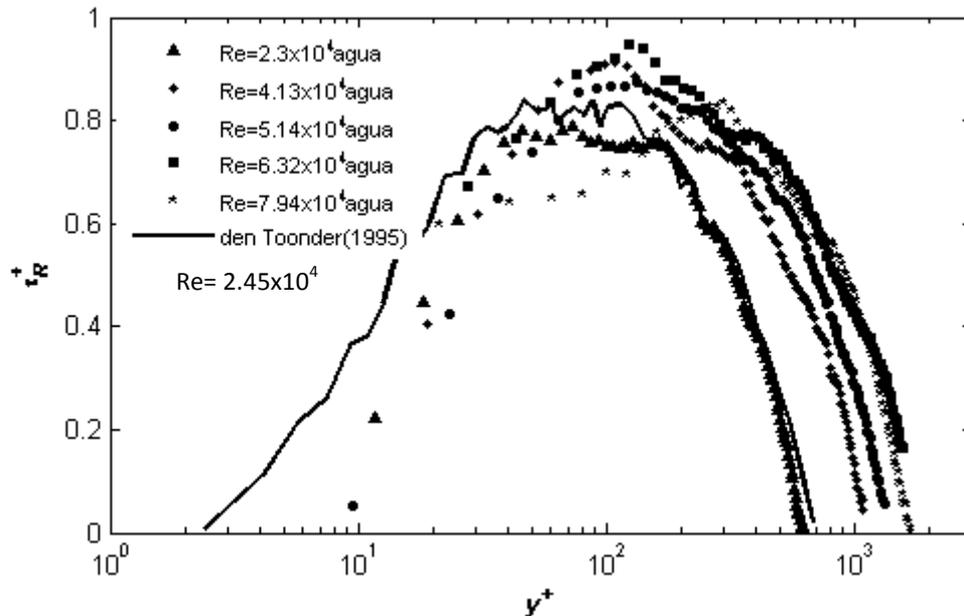


Figura 6.14 – Perfis de tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ .

A tensão cisalhante média total é a soma da tensão de Reynolds, da tensão viscosa e da tensão do polímero, quando este está presente no escoamento. Assim:

$$\tau^+ = \frac{2r}{D} \tag{6-8}$$

$$\tau_R^+ = \frac{1}{u_\tau^2} (\overline{u_x' u_r'}) \tag{6-9}$$

$$\tau_S^+ = -\frac{1}{\rho u_\tau^2} \mu \frac{dU_x}{dr} \tag{6-10}$$

$$\tau_P^+ = \tau^+ - \tau_R^+ - \tau_S^+ \tag{6-11}$$

A tensão de cisalhamento total τ^+ em um escoamento completamente desenvolvido varia linearmente na seção transversal do tubo, de zero na linha de centro, até um máximo na parede do tubo τ_w , dado pela Eq. (2-2).

A contribuição individual de cada componente da tensão para a tensão total é na Figura 6.15. Estas das contribuições são a tensão de cisalhamento turbulenta τ_R^+ e a tensão de cisalhamento viscosa τ_S^+ , já que no caso de fluido newtoniano a tensão polimérica é zero. Os resultados mostram que o cisalhamento turbulento é dominante no centro do duto. Embora não existam muitas medidas perto da parede esta tensão tem que ser zero na parede para

poder cumprir com a condição de não deslizamento. Portanto na região próxima da parede predomina o cisalhamento viscoso.

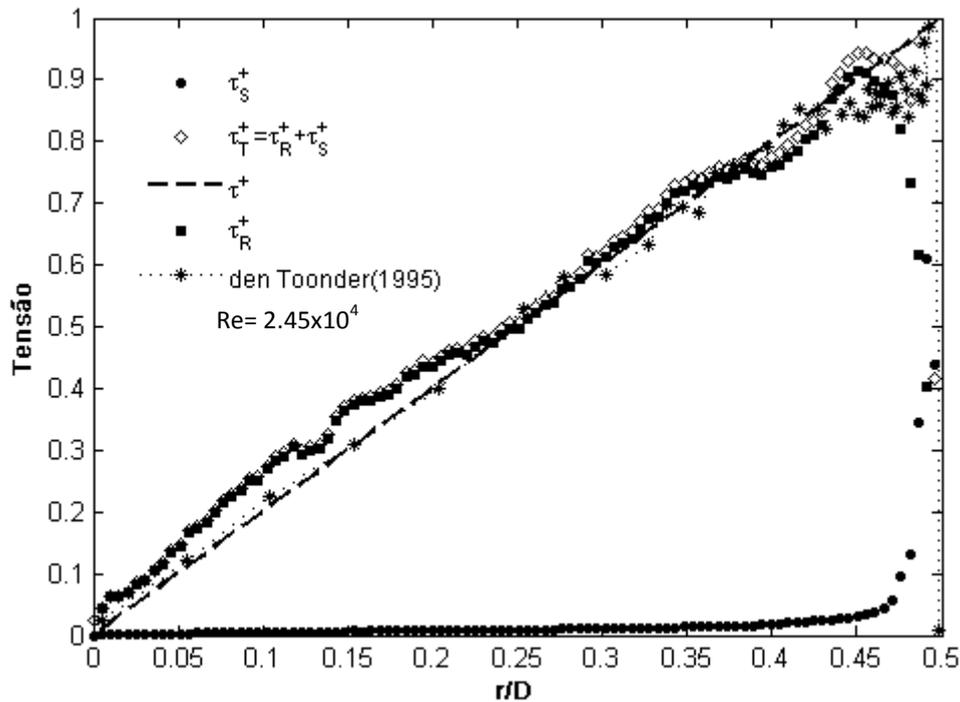


Figura 6.15 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ : tensão viscosa, τ_R^+ : tensão turbulenta, τ^+ : tensão de cisalhamento teórico. $Re = 4.13 \times 10^4$.

Considerando a Eq. (2-26) podemos estimar u_τ a partir dos perfis de tensão de Reynolds e tensão viscosa. Neste caso, a velocidade de atrito se baseia na extrapolação da tensão total medida para a parede. A Figura 6.16 apresenta o perfil de tensões medido para $Re = 4.13 \times 10^4$. O valor calculado da velocidade de atrito é $u_\tau = 49,9$ mm/s. Enquanto que a velocidade de atrito obtida através do gradiente de pressão medido experimentalmente foi de 58,5 mm/s.

O valor obtido a partir da tensão de cisalhamento é menor que o obtido através do gradiente de pressão, esta variação também foi observado em Doorne [28], e Paquelet [16], eles concluem que isto se deve à resolução espacial obtida pelo PIV.

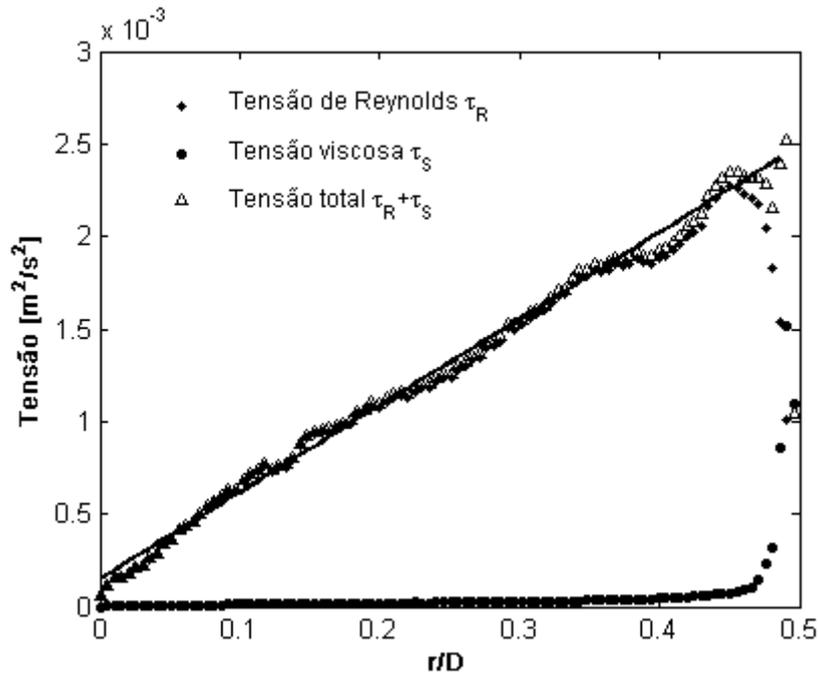


Figura 6.16 – Perfis de tensões de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água $Re= 4.13 \times 10^4$.

6.3.4. Energia Cinética Turbulenta

A produção da turbulência P_k pode ser medida diretamente a partir da definição dada pela Eq. (6-12). Esta é responsável pela geração de energia cinética turbulenta, extraindo energia do escoamento médio e levando-a à turbulência. Na Figura 6.17 é mostra-se a produção turbulenta em função das coordenadas de parede para os diversos números de Reynolds testados. Apesar da falta de dados junto à parede, obteve-se uma boa concordância com os resultados de Toonder.

$$P_{xx} = -2\tau_R \frac{dU_x}{dr} \tag{6-12}$$

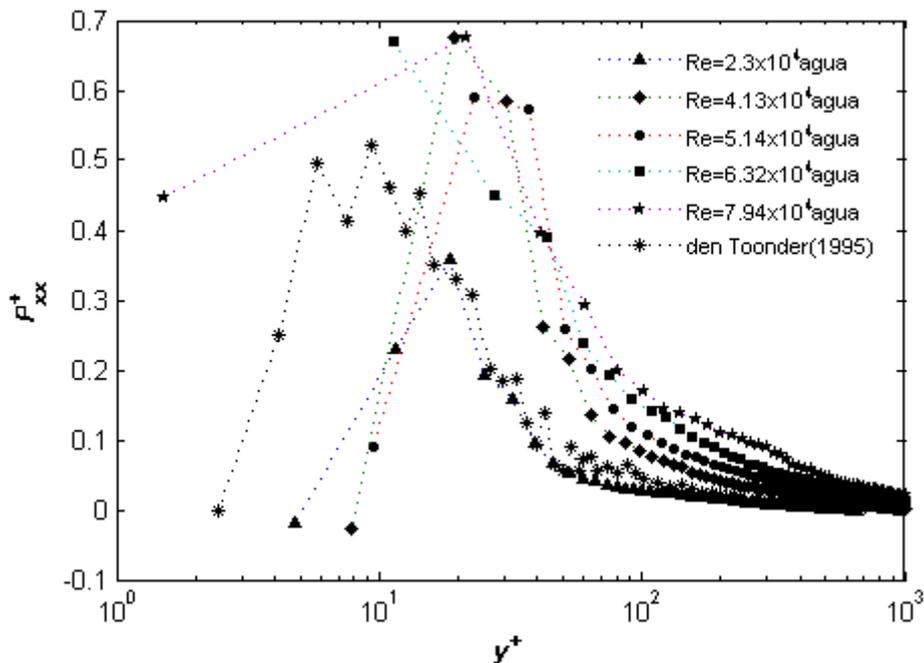


Figura 6.17 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância da parede y^+ .

6.4. Resultados para a solução polimérica

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados com a técnica PIV para a determinação dos campos de velocidade para o escoamento turbulento da solução polimérica, para os cinco valores do número de Reynolds investigados. Detalhes sobre as condições experimentais das medições podem ser encontrados na Tabela 6.1.

Será apresentada uma comparação entre os dados obtidos com água e com a solução polimérica para aproximadamente os mesmos valores do número de Reynolds turbulento Re_τ baseado na velocidade de fricção.

6.4.1. Perfis de velocidade média

Nas Figuras 6-18 a 6-20 são apresentados os perfis de velocidade axial média adimensional, $U^+ = U/u_\tau$, em função da coordenada radial adimensional, r/D , para a solução de 20 ppm de polímero, para cinco valores do número de Reynolds baseado na velocidade de atrito. Os perfis de velocidade para o escoamento de água são também mostrados nas figuras para valores aproximadamente iguais do número de Reynolds baseado na velocidade de

atrato. Devido à simetria observada nos perfis, apenas metade dos perfis é apresentada.

O aumento significativo da velocidade devido à presença do polímero é verificado, mesmo para a pequena concentração de polímero empregada nos testes. No trabalho de Ptasinski [20], concentrações muito maiores de polímeros são empregadas, produzindo variações na máxima velocidade de até 130% em relação ao escoamento de água.

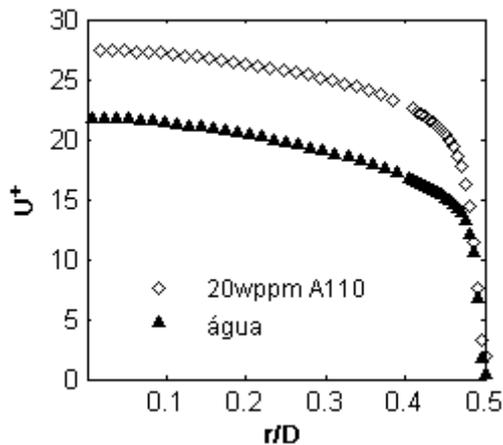


Figura 6.18 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para $Re_\tau \approx 1764$, para água e solução com polímero.

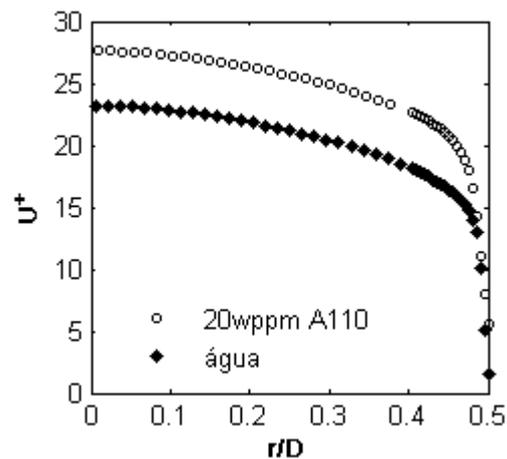


Figura 6.19 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para $Re_\tau \approx 2192$, para água e solução com polímero.

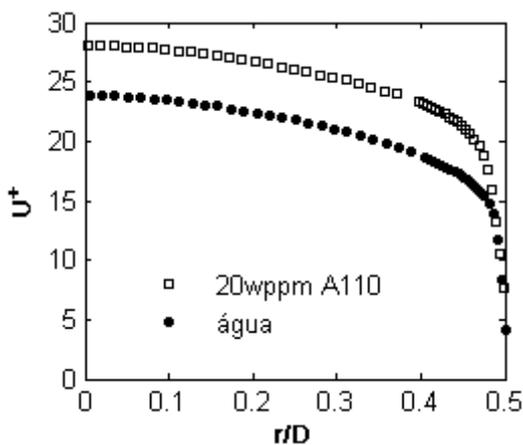


Figura 6.20 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para $Re_\tau \approx 2600$, para água e solução com polímero.

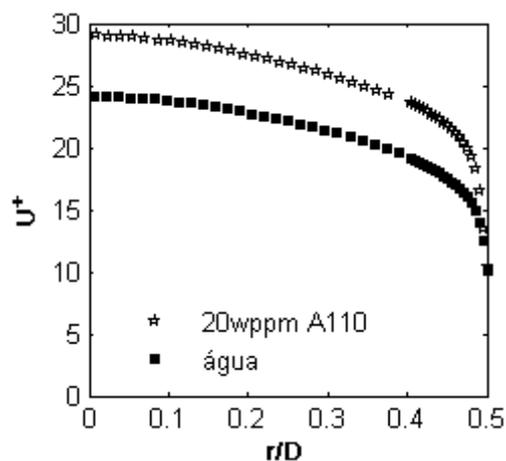


Figura 6.21 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para $Re_\tau \approx 3154$, para água e solução com polímero.

Nas Figuras 6.22 a 6.25 são apresentados os perfis de velocidade em termos de coordenadas de parede. Os perfis de velocidade da solução polimérica de 20 ppm mostram que a região logarítmica é deslocada para cima com relação ao perfil do fluido newtoniano, mas mantém-se paralela ao mesmo e que em uma região intermediária ($y^+ < 30$) não há alterações. Nota-se que a camada amortecedora (*buffer layer*) sofre um alargamento. Estas observações também foram encontradas em outros trabalhos de redução de atrito como o de White [6], Den Toonder [8], Procaccia [19], Ptasinski [20] e Andreotti [4].

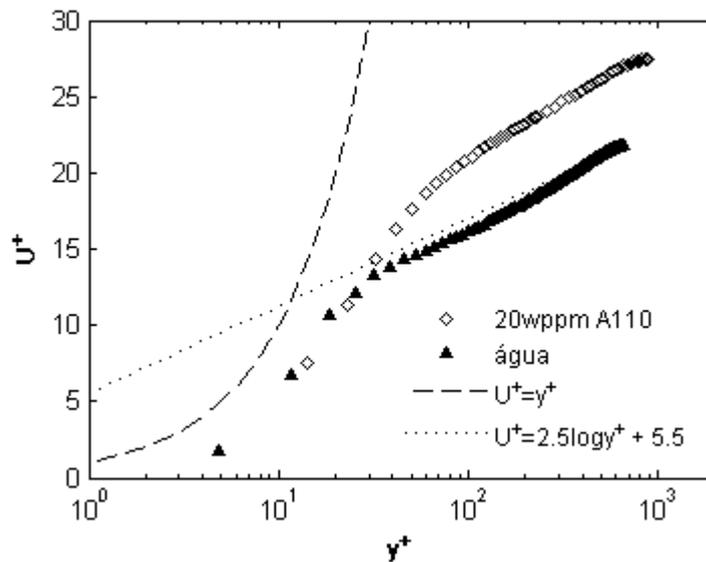


Figura 6.22 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_\tau \approx 1764$.

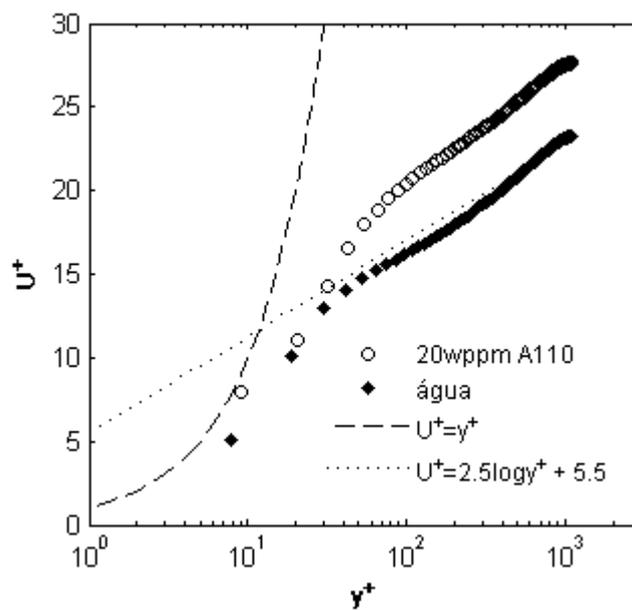


Figura 6.23 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_\tau \approx 2192$.

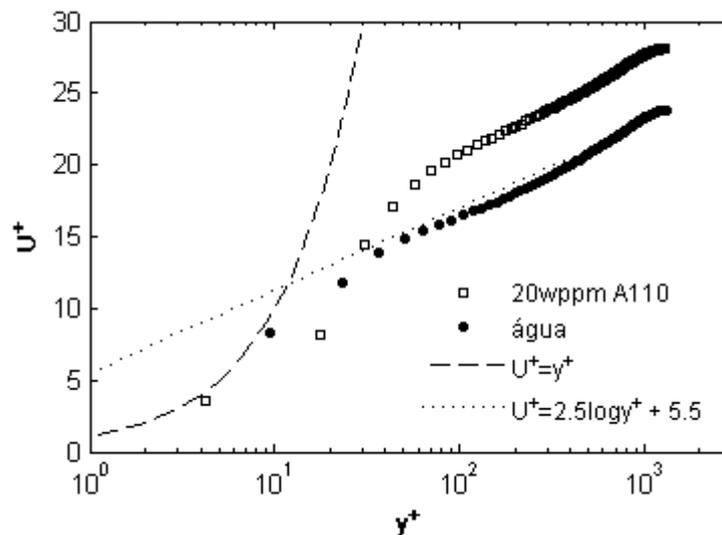


Figura 6.24 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_{\tau} \approx 2600$.

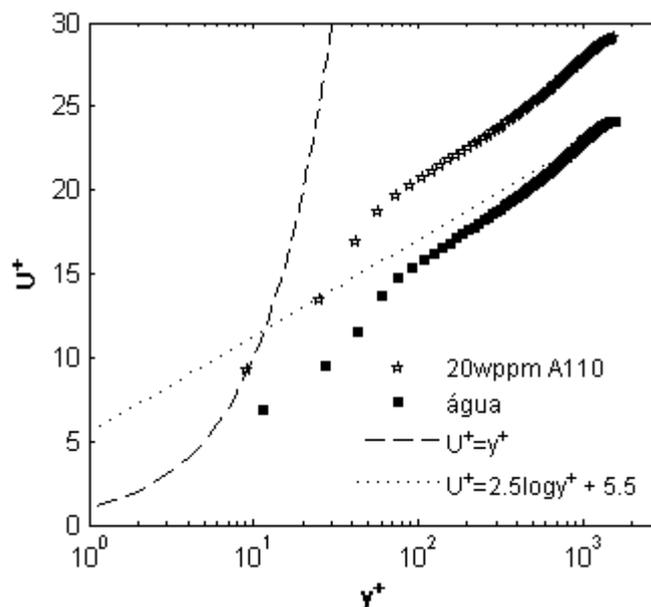


Figura 6.25 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_{\tau} \approx 3154$.

O fato que os gráficos para os diversos valores de Reynolds baseado na velocidade de atrito apresentam aproximadamente os mesmos perfis de velocidade para a solução polimérica é uma indicação que, para esta pequena concentração de polímero, a tensão polimérica é pequena em relação à tensão turbulenta proporcionando um perfil de velocidade universal, como para fluido newtoniano.

6.4.2. Flutuações de velocidade

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para as flutuações da velocidade para a solução polimérica do polímero Superfloc A110 a 20 ppm de concentração em massa. Em todos os resultados é apresentada uma comparação com os resultados para água, para o mesmo valor do número de Reynolds baseado na velocidade de atrito.

A Figura 6.26 ilustra a o efeito da presença do polímero no campo de flutuações da velocidade axial RMS. No caso da figura, para $Re_\tau \approx 3154$, nota-se claramente um aumento nos valores da componente de flutuação axial na região próxima à parede do tubo causada pelo polímero.

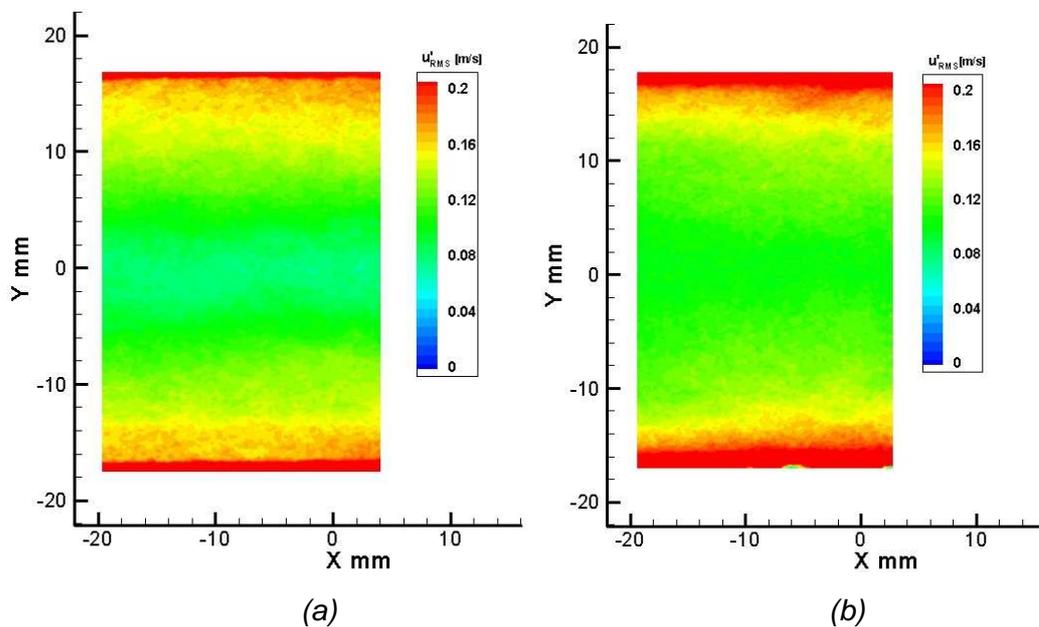


Figura 6.26 - Perfis de velocidade turbulenta na direção axial u'_{RMS} na seção transversal do tubo $Re_\tau \approx 3154$. (a) água. (b) solução polimérica a 20 ppm

Nas Figura 6.27 a 6.30 são apresentados os valores RMS das flutuações axiais para água e para a solução com polímero. Para as posições próximas da parede foi observado que na presença de aditivos poliméricos existe um aumento das flutuações axiais e que o pico é deslocado mais longe da parede com relação ao escoamento de água. Já mais para o centro do tubo as flutuações não apresentam variações entre o polímero e a água. Estes resultados foram também encontrados em experimentos realizados por Andreotti [4], Den Toonder[8], Gyr [9] e Ptasinski [20].

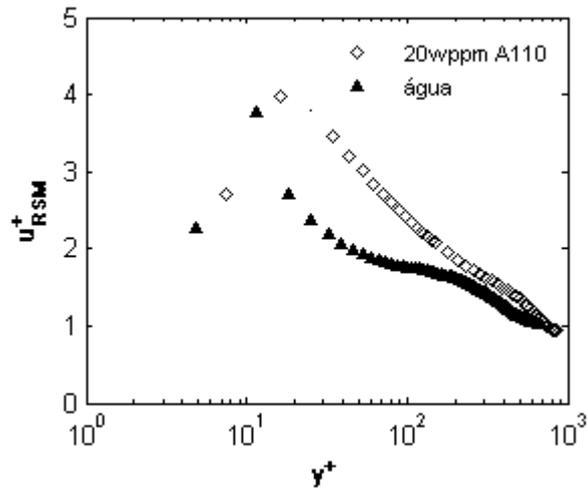


Figura 6.27 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_\tau \approx 1764$.

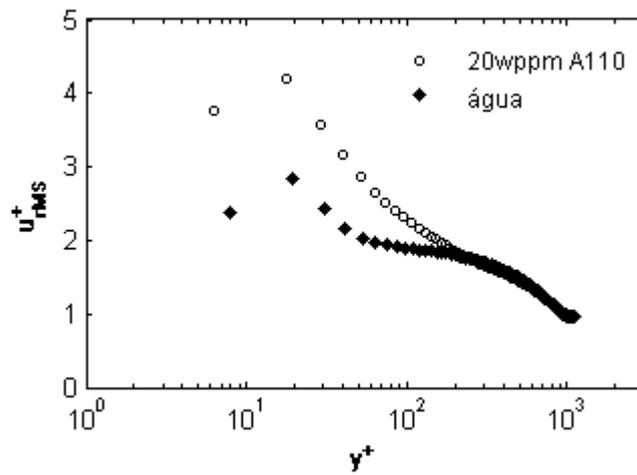


Figura 6.28 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_\tau \approx 2192$.

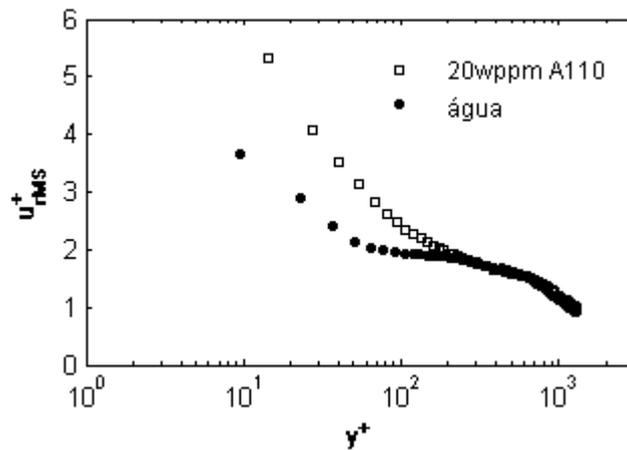


Figura 6.29 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_\tau \approx 2600$.

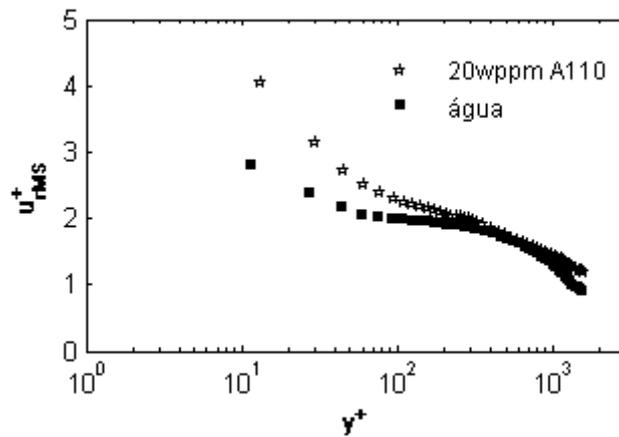


Figura 6.30 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_{\tau} \approx 3154$.

Os resultados obtidos para as flutuações da velocidade radial RMS para água e para a solução com polímero são apresentados nas Figura 6.31 a 6.34. Pode-se observar que a presença do polímero age no sentido de produzir uma atenuação das flutuações da velocidade radial em todas as regiões investigadas. Nota-se, no entanto, uma tendência a diminuição deste efeito nas regiões muito próximas da parede.

Andreotti [4] e Den Toonder[8], consideram que o efeito do aumento das flutuações axiais e a diminuição das flutuações radiais, pode ser interpretado como sendo uma inibição do transporte de quantidade de movimento transversal por flutuações turbulentas em decorrência da anisotropia de tensões produzida pela elongação do polímero pelo escoamento. E que a similaridade das flutuações no centro do tubo ocorre devido à predominância de grandes escalas de turbulência já que estas escalas turbulentas são pouco afetadas pela presença dos polímeros.

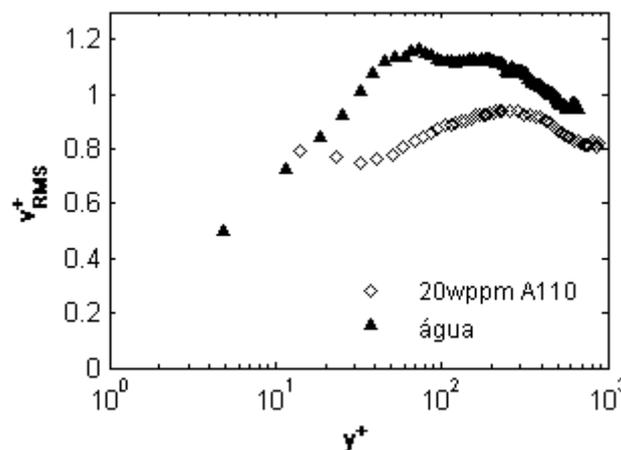


Figura 6.31 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_{\tau} \approx 1764$.

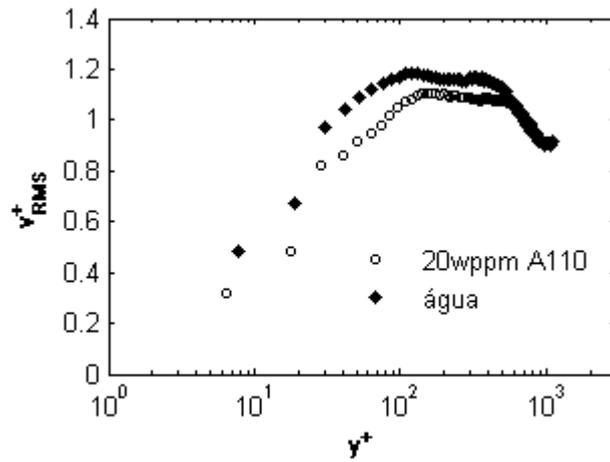


Figura 6.32 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_\tau \approx 2192$.

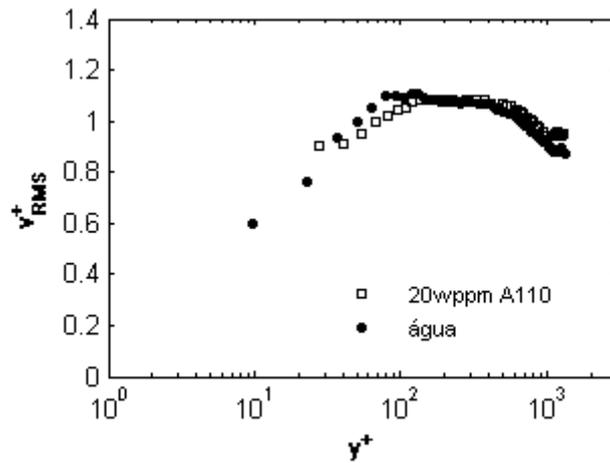


Figura 6.33 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_\tau \approx 2600$.

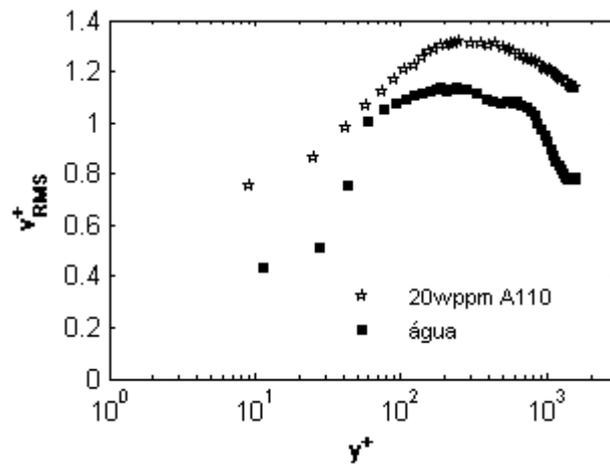


Figura 6.34 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_\tau \approx 3154$.

6.4.3. Tensão cisalhante

Os resultados obtidos para a tensão de Reynolds para a solução com adição de polímero são apresentados nas Figura 6.35 a 6.38. Nota-se, em todas as figuras, um decréscimo na tensão de Reynolds nas regiões intermediárias entre a parede e a linha de centro. Esta diferença diminui para regiões mais afastadas da parede, chegando a ser nula na região central do tubo. Ptansinski[20] encontrou que este decréscimo é mais forte à medida que a concentração do polímero aumenta. Warholic[32] encontrou que a tensão de Reynolds é quase nula próximo do ponto de máxima redução de atrito, resultado contrário ao reportado por Ptansinski[20].

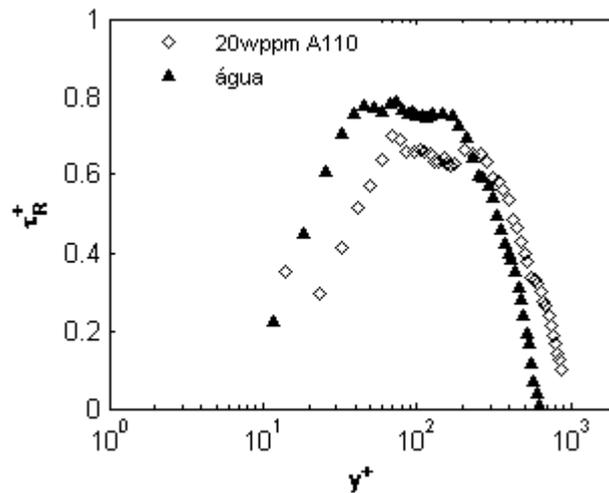


Figura 6.35 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_\tau \approx 1764$.

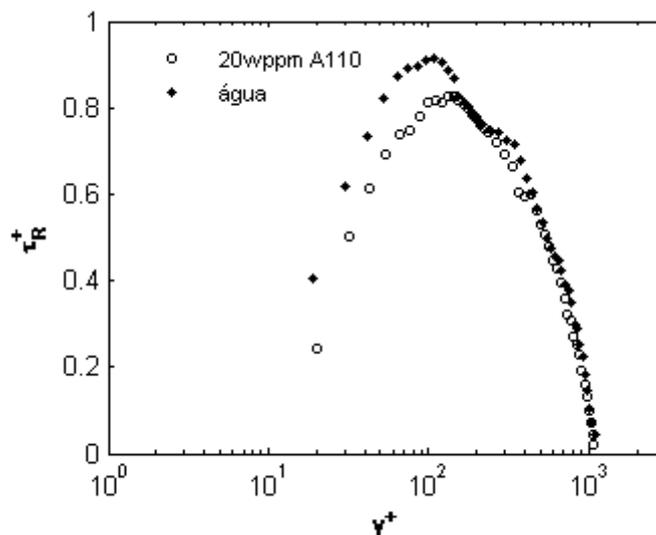


Figura 6.36 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_\tau \approx 2192$.

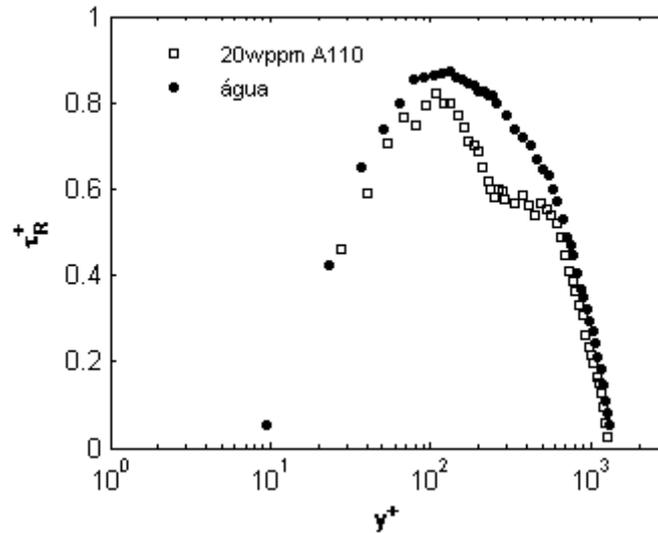


Figura 6.37 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_\tau \approx 2600$.

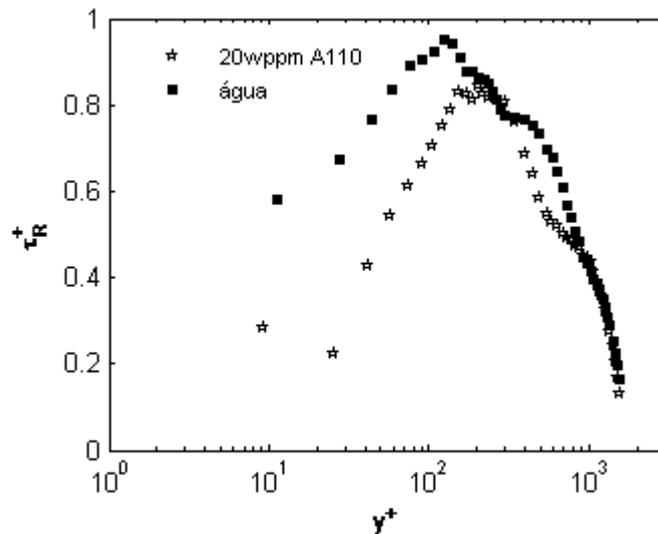


Figura 6.38 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_\tau \approx 3154$.

Os resultados apresentados no parágrafo anterior indicaram uma diminuição da tensão de Reynolds causada pela presença do polímero. Esta diminuição pode ser devida a um enfraquecimento na correlação entre as flutuações u' e v' ou o resultado da diminuição da magnitude das correlações. Para verificar-se esta questão os coeficientes de correlação entre as velocidades axial e radial foram computados, de acordo com a equação 6.13. Os resultados da variação destes coeficientes são apresentados nas Figuras 6.39 a 6.42.

Uma análise destas figuras indica que, de fato, a presença do polímero produz uma diminuição na correlação entre as velocidades axial e radial especialmente para os maiores valores de Reynolds. Esta diminuição, no

entanto, não muito pronunciada, o que indicaria que o polímero também produz uma diminuição na magnitude das flutuações das velocidades. Este argumento é proposto por Ptasinski [20].

$$\rho_{xr} = \frac{\overline{(u'v')}}{\sqrt{\overline{(u'^2)}}\sqrt{\overline{(v'^2)}}} \tag{6-13}$$

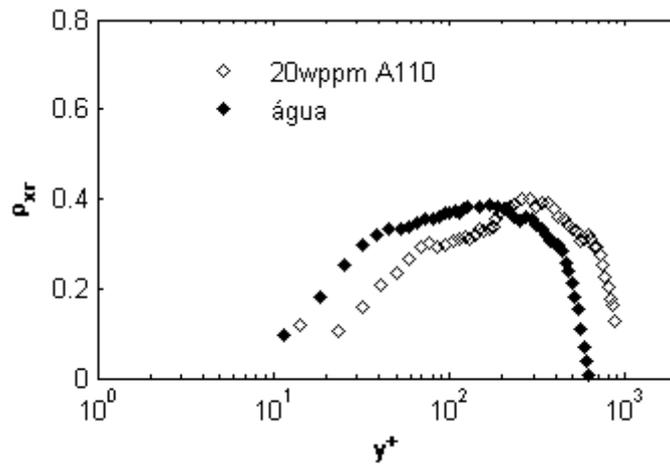


Figura 6.39 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_\tau \approx 1764$.

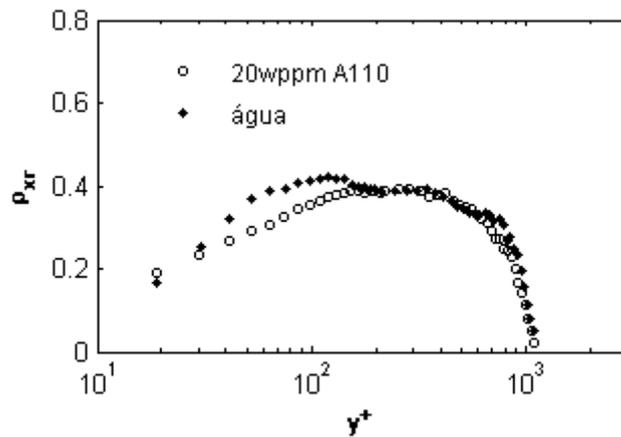


Figura 6.40 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_\tau \approx 2192$.

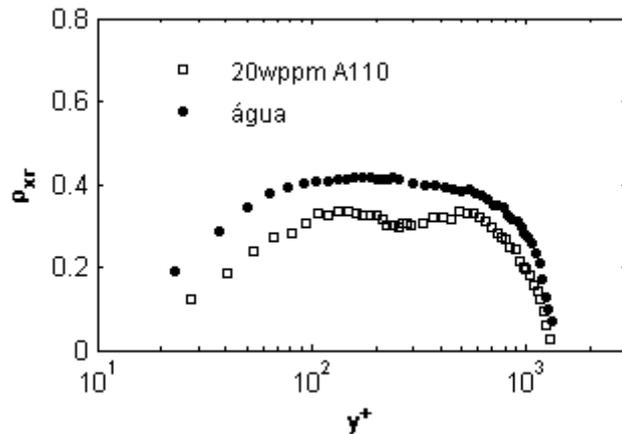


Figura 6.41 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_\tau \approx 2600$.

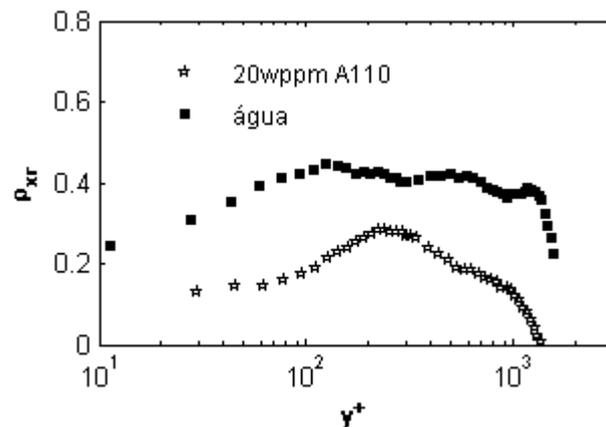


Figura 6.42 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_\tau \approx 3154$.

As contribuições individuais para a tensão de cisalhamento são expostas nas Figura 6.43 a Figura 6.46. É evidente que para a solução com polímero a tensão de Reynolds e a tensão viscosa somadas não atingem o valor esperado da tensão total. Este efeito é conhecido como “déficit da tensão de Reynolds” e é compensado pela tensão polimérica. A tensão polimérica foi determinada a partir da Eq. (6-11) do balanço de tensões.

A contribuição do polímero é pequena, e está na região de transição. Resultados semelhantes são relatados em trabalhos como o de Den Toonder [8] e Ptasinski [20].

Os resultados apresentados na Figura 6.46 onde a tensão de Reynolds ultrapassa a tensão total são inesperados. Não encontramos explicação plausível para estes resultados, que devem ser atribuídos a problemas nos experimentos.

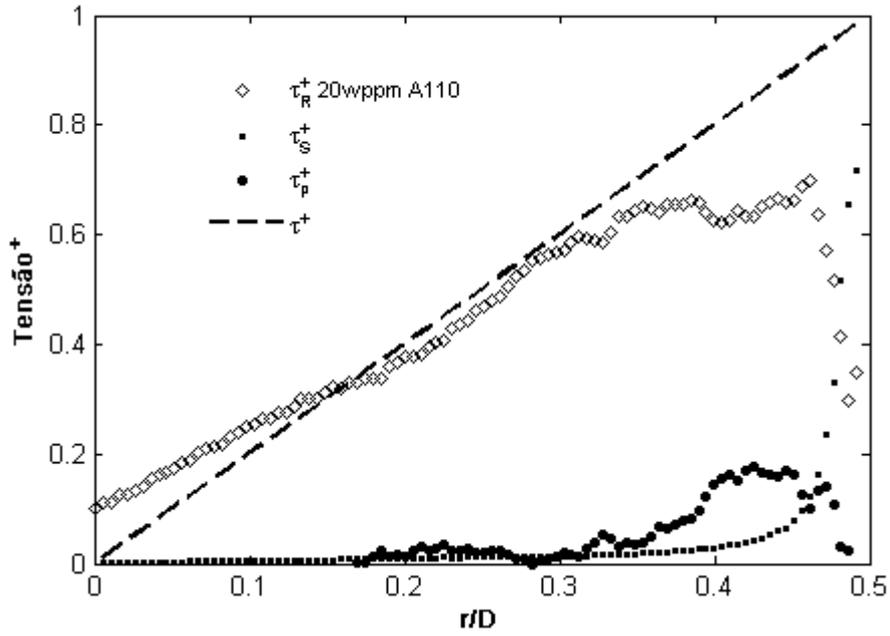


Figura 6.43 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ_p^+ :tensão polimérica, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re_\tau \approx 1764$.

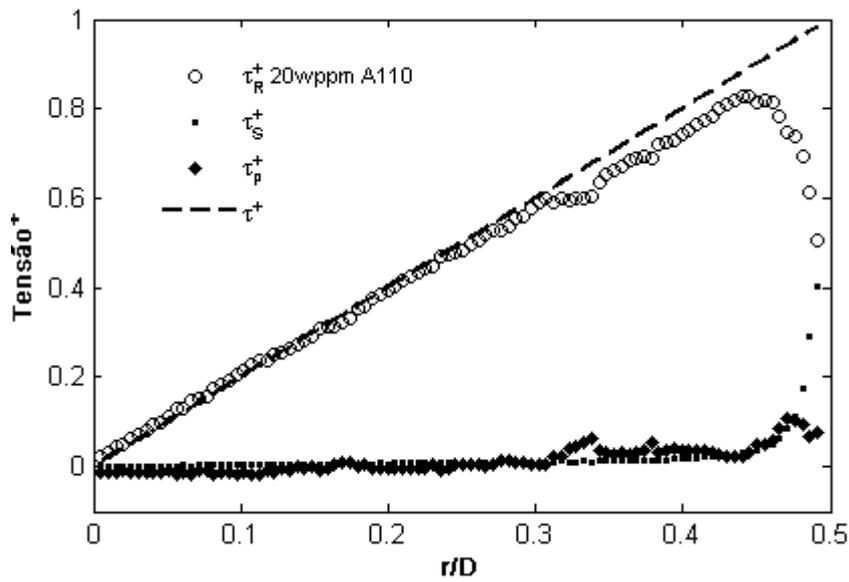


Figura 6.44 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ_p^+ :tensão polimérica, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re_\tau \approx 2192$.

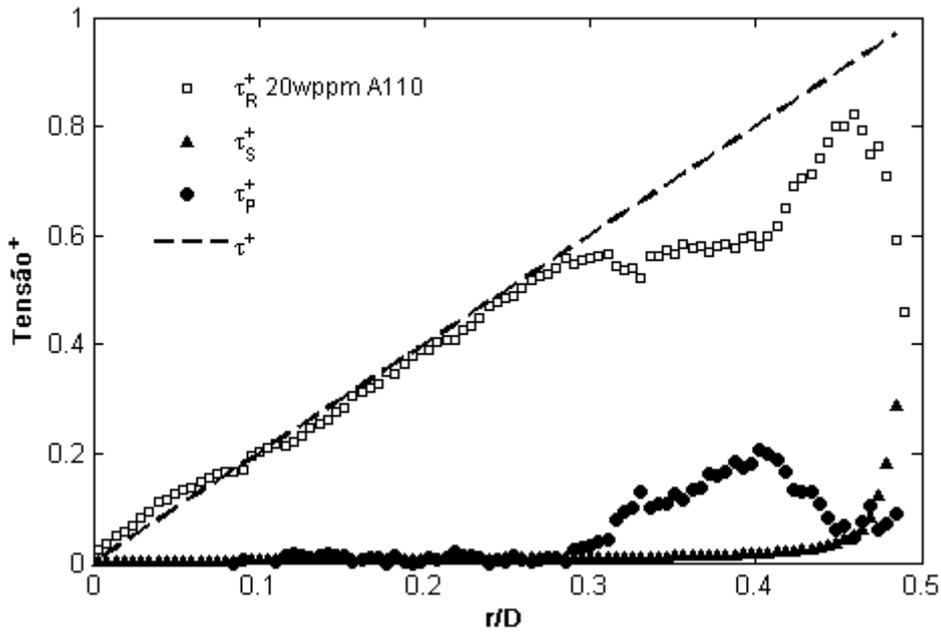


Figura 6.45 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ : tensão viscosa, τ_R^+ : tensão turbulenta, τ_P^+ : tensão polimérica, τ^+ : tensão de cisalhamento teórico. $Re_\tau \approx 2600$.

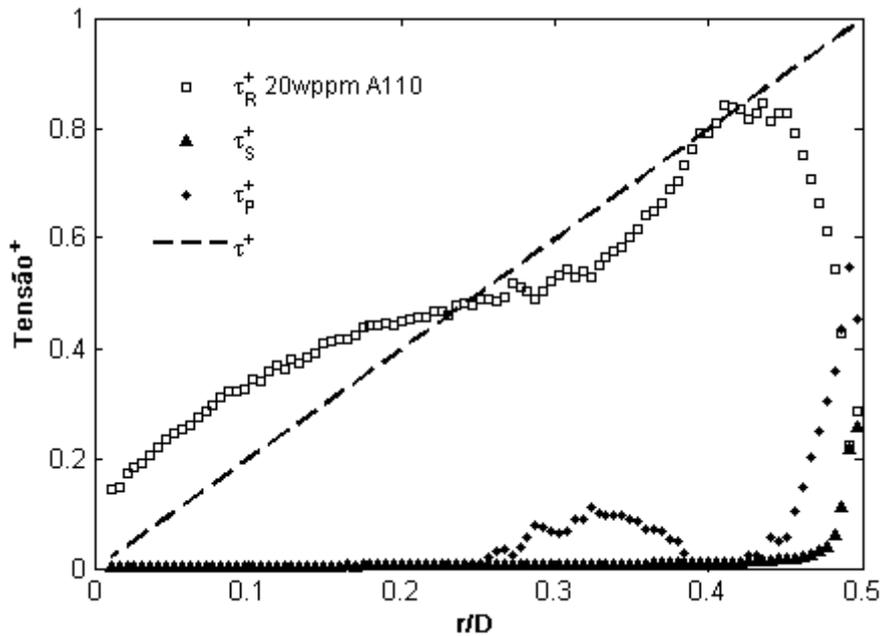


Figura 6.46 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ : tensão viscosa, τ_R^+ : tensão turbulenta, τ_P^+ : tensão polimérica, τ^+ : tensão de cisalhamento teórico. $Re_\tau \approx 3154$.

6.4.4. Energia Cinética Turbulenta

Os perfis de produção de energia cinética turbulenta são apresentados nas Figura 6.47 a 6.50. Devido à adição de polímeros verifica-se que os picos da produção são afastados da parede. Este resultado concorda com o observado nos perfis RMS das flutuações de velocidade. Além disso, a produção turbulenta é diminuída perto da parede. Esta observação também foi feita por Toonder [8].

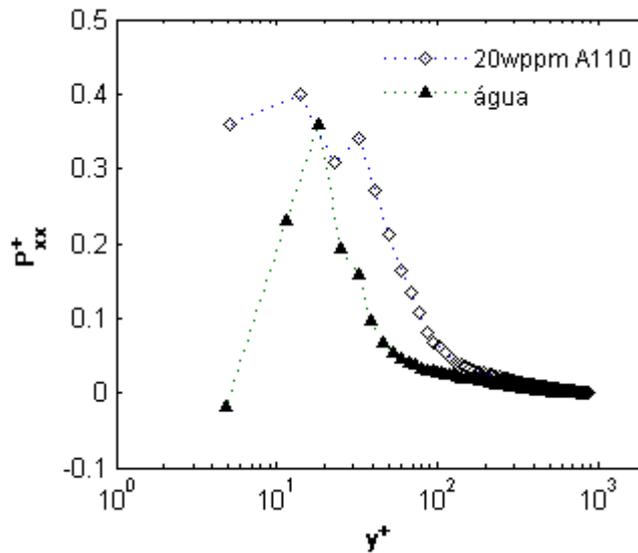


Figura 6.47 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_{\tau} \approx 1764$.

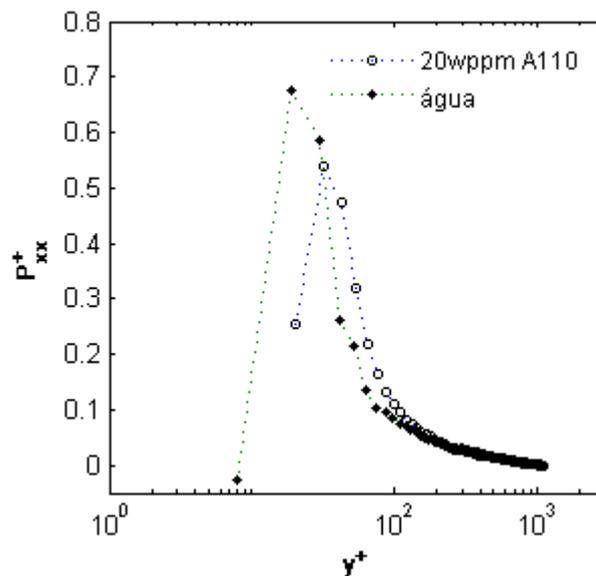


Figura 6.48 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_{\tau} \approx 2192$

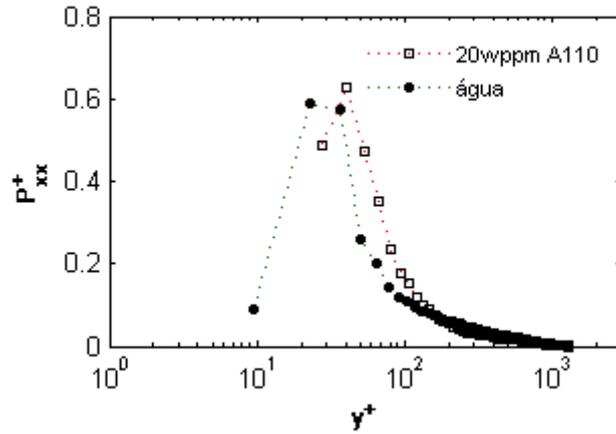


Figura 6.49 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_{\tau} \approx 2600$.

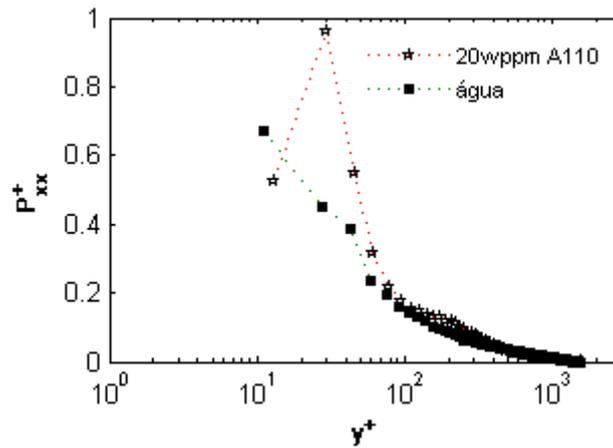


Figura 6.50 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_{\tau} \approx 3154$.