

# Assimetrias do escoamento de líquidos não-Newtonianos em regime de transição

S. Rosa<sup>1</sup>, M. P. Escudier<sup>2</sup> e R. J. Poole<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Campus Santa Apolónia, 5301–854 Bragança, Portugal. Email: [srosa@ipb.pt](mailto:srosa@ipb.pt)

<sup>2</sup> University of Liverpool, Department of Engineering, Liverpool L69 3GH, UK

## Sumário

Este trabalho apresenta e discute novos resultados experimentais obtidos em escoamentos no interior de condutas, usando fluidos não-Newtonianos em regime de transição, entre laminar e turbulento. Os dados confirmam que o escoamento de líquidos com redução de arrasto em regime de transição diverge significativamente, no que à simetria dos perfis de velocidade diz respeito, do escoamento de fluidos Newtonianos em qualquer regime. Este trabalho investiga a estrutura da assimetria e a sua evolução ao longo do escoamento, bem como as flutuações de velocidade. Os resultados não conduzem de forma conclusiva à explicação do porquê da existência de assimetrias nos escoamentos em regime de transição, para fluidos não-Newtonianos, mas permitiram concluir que a geometria do escoamento, quer a jusante quer a montante, não produz qualquer influência sobre a assimetria dos perfis de velocidade.

## 1 Introdução

Assimetrias dos perfis de velocidade para escoamentos completamente desenvolvidos de fluidos não-Newtonianos em regime de transição foram inicialmente apresentados para Laponite [1]. Subsequentemente [2, 3] mostrou-se que a assimetria dos perfis de velocidade se verifica para uma larga variedade de fluidos com redução de arrasto (pseudoplásticos e viscoelásticos): goma de xanthan (XG), poliácridamida (PAA), CMC e também Carbopol. A não ser que seja provocado, como por exemplo, impondo distúrbios a montante [4], os perfis de velocidade de escoamentos completamente desenvolvidos em regime de transição, entre laminar e turbulento, de fluidos Newtonianos são invariavelmente simétricos [2, 5, 6]. O facto deste comportamento ter sido observado para diferentes líquidos não-Newtonianos em três laboratórios completamente independentes, em diferentes países, França, Austrália e Inglaterra, leva à conclusão [2] de que as imperfeições de construção das instalações não são a causa do aparecimento das assimetrias. Observações para pseudoplásticos em regime de transição foram apresentadas recentemente por um grupo do Canadá [7, 8], e uma vez mais, chegaram à conclusão de que a assimetria observada era um fenómeno da dinâmica dos fluidos e não de aspectos construtivos da instalação. Os perfis de velocidade para escoamentos turbulentos, quer de fluidos Newtonianos, quer de não-Newtonianos, são invariavelmente simétricos [6]. Torna-se óbvio que o perfil de velocidades assimétrico segundo um determinado plano exhibe uma variação com o ângulo, mas apenas recentemente [9] isto foi demonstrado experimentalmente. Excluindo este último artigo, todas as anteriores observações relativas a escoamentos em regime de transição de soluções poliméricas com redução de arrasto, são apenas um aspecto accidental das investigações de escoamentos em regime turbulento.

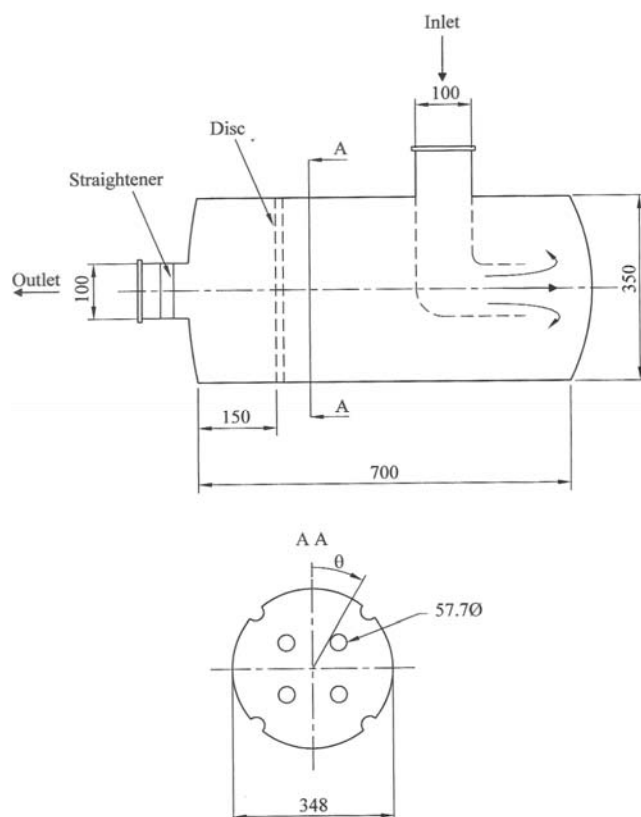
Este trabalho apresenta dados experimentais para o escoamento em regime de transição no interior de um tubo para PAA e XG. É estudada a influência da imposição de distorções ao escoamento, a montante e a jusante e quantifica-se o grau de assimetria, mostrando a sua evolução ao longo da conduta, com a distância axial. O grau de assimetria é obtido através do coeficiente  $\alpha$ , definido como:

$$\alpha = \frac{2\pi \int_0^R (u - u_M) \cdot r \cdot dr}{2\pi \int_0^R u_M \cdot r \cdot dr} \times 100 \quad (1)$$

onde  $u_M$  representa a média aritmética dos dois valores da velocidade  $u$  à mesma distancia radial  $r$  em relação ao eixo da conduta. Depois de estudar diversos perfis de velocidade concluiu-se que, para poder ser considerado assimétrico, um perfil de velocidade deve apresentar um  $\alpha$  de pelo menos 2%. Para valores inferiores a 1% não é perceptível qualquer assimetria.

## 2 Instalação experimental

As medições foram efectuadas numa conduta horizontal em vidro com um diâmetro interno de  $100.4 \pm 0.1$  mm. O comprimento total da conduta é de 23.28 m que consiste em 22 tubos de vidro montados e alinhados recorrendo a um sistema de laser que permitiu o alinhamento do eixo de cada tubo com uma tolerância de  $\pm 0.1$  mm, estimando-se que a curvatura longitudinal máxima da conduta seja de  $10^6$  m. Antes da conduta foi colocada uma câmara com a capacidade de 70 litros com a intenção de se obter um escoamento uniforme à entrada. O líquido ao entrar na câmara é desviado para a parte de trás da câmara (ver **Figura 1**). Dentro da câmara existe ainda um disco com furos de 57,70 mm cada de diâmetro que orientam o líquido antes de este chegar à contracção e depois entrar na conduta.



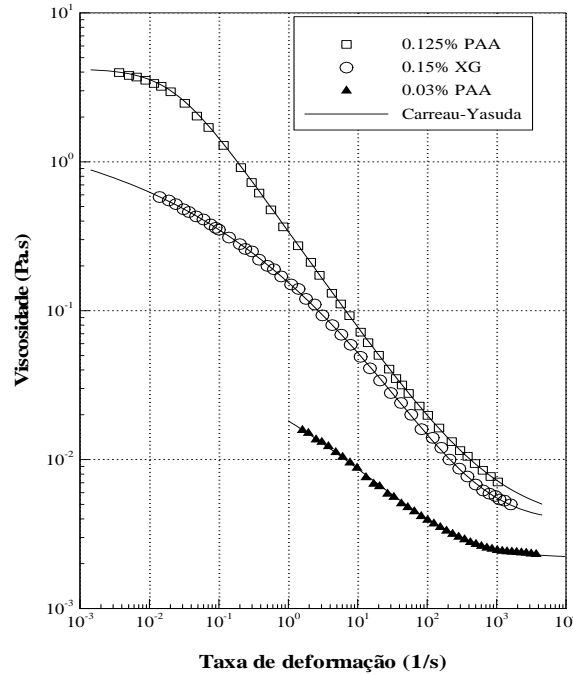
**Figura 1** – Esquema da câmara com detalhes do disco interno e definição do ângulo  $\theta$  (dimensões em mm)

As medições de pressão foram efectuadas com um transdutor de pressão diferencial, marca Druck, modelo LPX9381, entre duas tomadas localizadas a 14 m e 21m da entrada da conduta, permitindo assim calcular a tensão de corte junto à parede. O caudal mássico foi obtido, com uma incerteza inferior a 1%, utilizando um caudalímetro, marca Endres+Hauser, modelo Promass 63. As velocidades e respectivas flutuações (turbulência) foram medidas utilizando um sistema de laser (Dantec Fibreflow laser Doppler anemometer) e determinadas através da média de 20.000 amostras para cada ponto. Para obter um perfil de velocidade foram medidas as velocidades em 50 pontos (distâncias radiais). A incerteza dos resultados é de 3% para a velocidade e 6% para a turbulência. O suporte da cabeça do laser foi especialmente construído para o efeito, permitindo medições radiais em planos múltiplos de  $15^\circ$  em relação à vertical (definida com  $0^\circ$ ).

## 3 Reologia dos fluidos

O fluido Newtoniano usado foi uma solução de 60% de glicerina em água, que tem uma viscosidade de 0.00858 Pa.s e uma massa específica de  $1140 \text{ kg/m}^3$ . Dois dos líquidos não-Newtonianos usados formam duas soluções aquosas de poliácridamida (PAA) com diferentes concentrações, 0.03% e 0.125%. O terceiro líquido usado foi uma solução aquosa de goma de xanthan (XG) com uma concentração de 0.15%. As duas concentrações de PAA foram escolhidas porque, embora apresentem diferentes curvas de viscosidade *versus* taxa de deformação, ambas apresentam níveis de redução de arrasto elevados. As soluções de 0.125% PAA e

0.15% XG foram escolhidas com a intenção de obter dois fluidos com idêntica variação da viscosidade com a taxa de deformação, mas com diferente elasticidade [10]. As curvas da viscosidade *versus* taxa de deformação para os três fluidos não-Newtonianos são mostradas na **Figura 2**, que inclui um modelo reológico que representa na perfeição os dados experimentais, modelo de Carreau-Yasuda [11].



**Figura 2** – Viscosidade *versus* taxa de deformação para os líquidos não-Newtonianos investigados

#### 4 Resultados experimentais

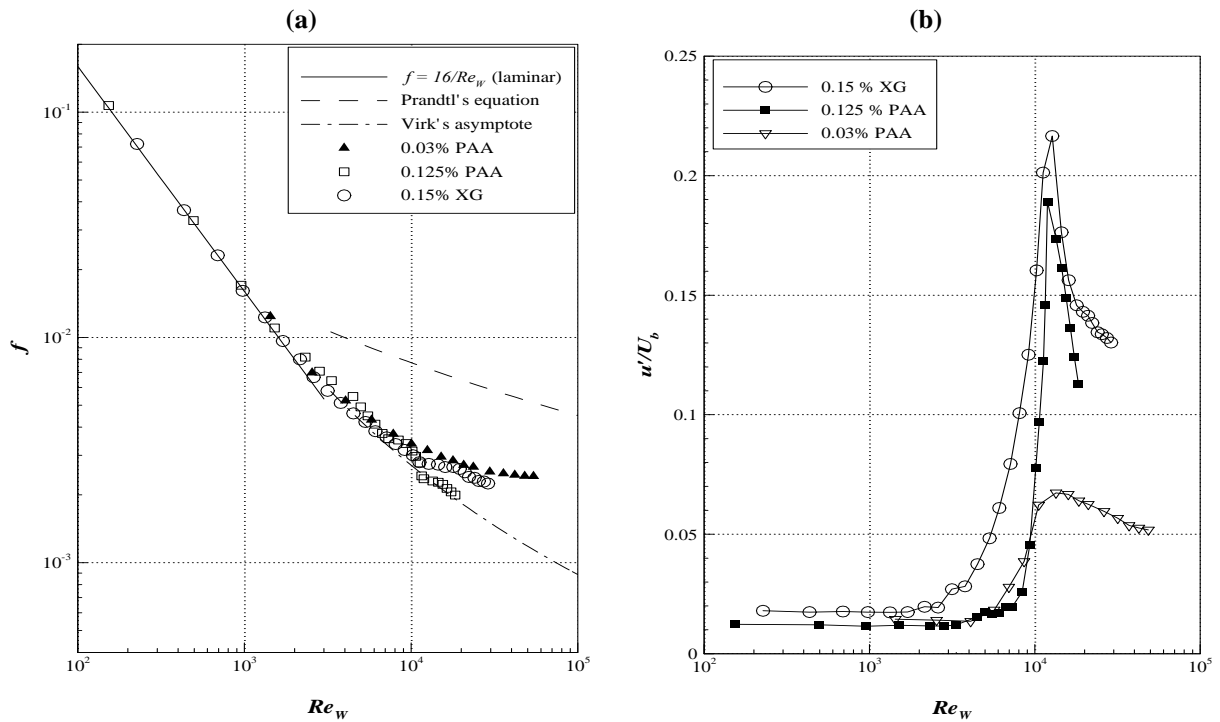
Segundo [2] o coeficiente de Fanning  $f$  e o número de Reynolds  $Re_W$  são definidos como:

$$f \equiv \frac{2\tau_w}{\rho U_b^2} \text{ e } Re_W = \frac{\rho U_b D}{\mu_w} \quad (2)$$

com  $\tau_w$  como sendo a tensão de corte na parede,  $\rho$  a massa específica,  $U_b$  a velocidade média calculada através do caudal lido no caudalímetro,  $D$  o diâmetro interno da conduta e  $\mu_w$  a viscosidade na parede determinada recorrendo ao modelo de Carreau-Yasuda, usando a tensão  $\tau_w$  obtida através da medição do gradiente de pressão.

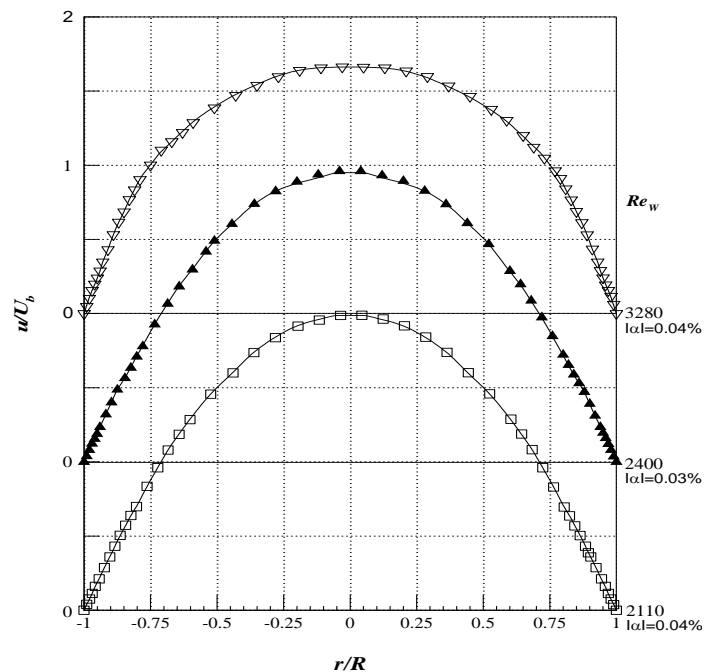
Para escoamentos completamente desenvolvidos de fluidos Newtonianos em condutas circulares o gráfico  $f$  versus  $Re_W$  mostra uma evolução com um degrau bem definido para  $Re_W$  entre 2300 e 4000. Esta região é admitida como sendo a região de transição entre o regime laminar e o turbulento. Para soluções poliméricas com elevada redução de arrasto, a curva  $f$ - $Re_W$  não apresenta esse degrau e portanto o regime de transição não é perceptível. O método utilizado neste trabalho para detectar o regime de transição consistiu em representar a turbulência ( $u'$ ) perto da parede (a 80% do raio) em função do  $Re_W$ . Um aumento de  $u'$  para além do ruído dos instrumentos indica o fim do regime laminar e início da transição. Seguidamente, verifica-se um aumento gradual de  $u'$  até atingir um máximo que representa o fim da transição e início do regime turbulento.

A **Figura 3(a)** mostra os resultados experimentais de  $f$ - $Re_W$  para os três líquidos não-Newtonianos investigados e os correspondentes resultados de  $u'$ - $Re_W$  na **Figura 3(b)**. O atraso do início do regime de transição para valores de  $Re_W > 10^4$  é evidente para os três líquidos.



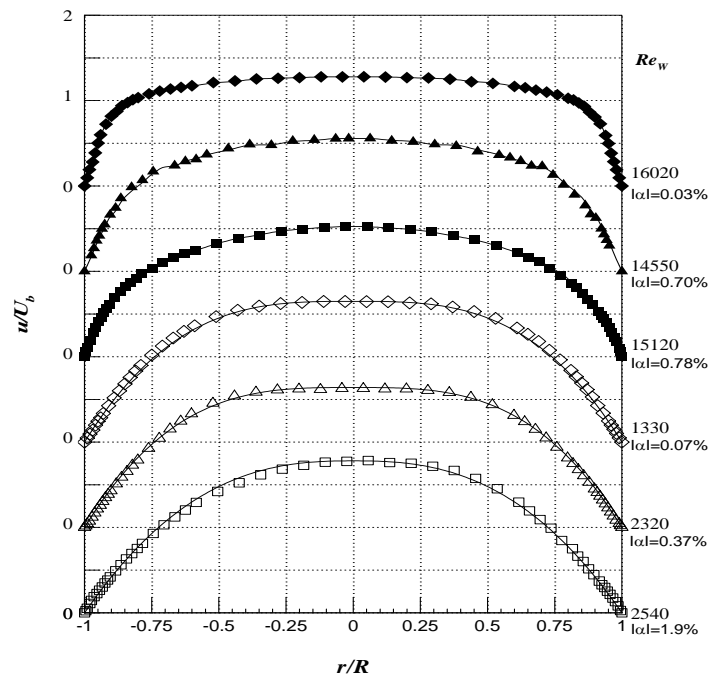
**Figura 3** – (a) Coeficiente de fricção de Fanning  $f$  versus  $Re_w$ ; (b) Turbulência  $u'/U_b$  versus  $Re_w$

A **Figura 4** mostra perfis de velocidade para o caso Newtoniano (60% glicerina) para a três diferentes  $Re_w$ , correspondendo aos três diferentes regimes de escoamento. Estes perfis foram medidos ao longo do plano horizontal ( $\theta = 90^\circ$ ) e em cada caso inclui-se uma curva representativa da média da velocidade medida em ambos os lados do eixo da conduta. Pode concluir-se que neste caso, com o líquido Newtoniano, todos os perfis de velocidade, em todos os regimes, são invariavelmente simétricos, com coeficientes de assimetria  $\alpha$  bem inferiores a 2% e de acordo com o observado anteriormente noutros estudos [2, 6].



**Figura 4** – Distribuições da velocidade ao longo do plano horizontal ( $\theta = 90^\circ$ ), a 22 m da entrada, para escoamentos laminar, de transição e turbulento, para 60% glicerina

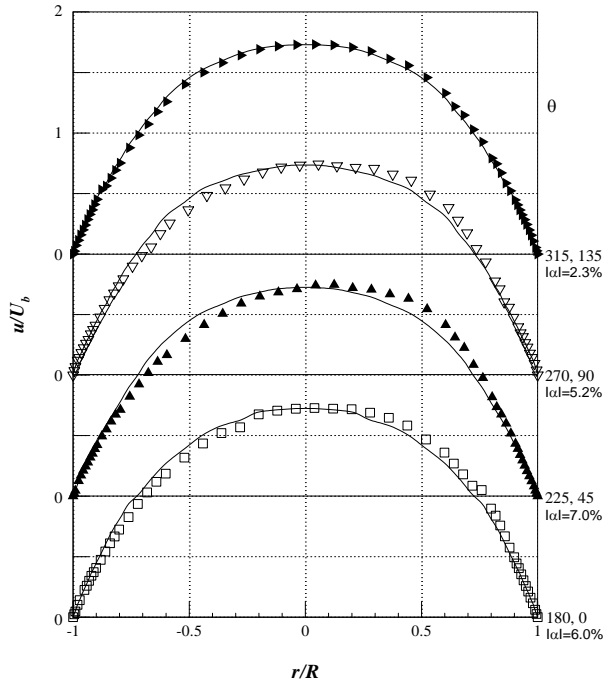
A **Figura 5** mostra os perfis de velocidade medidos em regime laminar e regime turbulento para cada uma das três soluções poliméricas investigadas. Para cada caso inclui-se um perfil teórico, lei de potência, para comparação. Em nenhum caso se verifica um desvio significativo da assimetria, isto é, em regime laminar e turbulento os fluidos não-Newtonianos também apresentam perfis de velocidade simétricos.



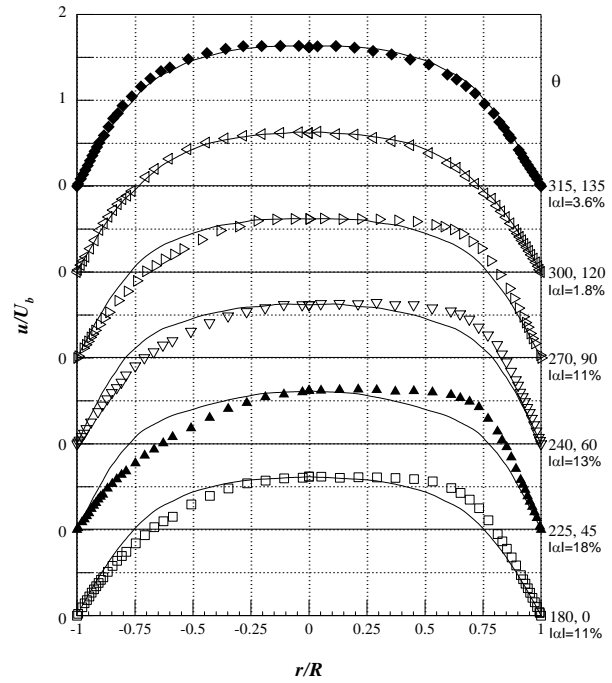
**Figura 5** – Distribuições da velocidade ao longo do plano horizontal ( $\theta = 90^\circ$ ), a 22 m da entrada, para escoamento laminar (símbolos abertos) e turbulento (símbolos fechados). Para escoamento laminar as linhas sólidas representam a lei de potência e para escoamento turbulento as curvas sólidas representam a média aritmética da velocidade em ambos os lados do eixo da conduta. **(a)** 0.03% PAA,  $Re_w=2540$ ,  $n=0.64$ ; **(b)** 0.125% PAA,  $Re_w=2320$ ,  $n=0.47$ ; **(c)** 0.15% XG,  $Re_w=1330$ ,  $n=0.48$ ; **(d)** 0.03% PAA,  $Re_w=15120$ ; **(e)** 0.125% PAA,  $Re_w=14550$ ; **(f)** 0.15% XG,  $Re_w=16020$

A **Figura 6** mostra os perfis de velocidade para 0.03% PAA obtidos em regime de transição ( $Re_w = 5780$ ) para quatro ângulos diferentes ( $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  e  $135^\circ$ ), a 22 m da entrada. O grau de assimetria varia significativamente com o ângulo  $\theta$ , sendo de 7% para  $\theta = 45^\circ$ . Para 0.0125% PAA, também em regime de transição ( $Re_w = 10140$ ), a **Figura 7** mostra ainda mais claramente que  $\alpha$  varia bastante com o ângulo  $\theta$ , entre 1.8% para  $\theta = 120^\circ$  e 18% para  $\theta = 45^\circ$ . A variação de  $\alpha$  com  $\theta$  para os dois casos é representada na **Figura 8**. Os perfis de velocidade para 0.15% XG, também em regime de transição ( $Re_w = 10260$ ) mostram um comportamento similar aos observados para as duas concentrações de PAA (**Figura 9**), uma vez mais, com o valor máximo do coeficiente de assimetria a verificar-se para  $\theta = 45^\circ$ .

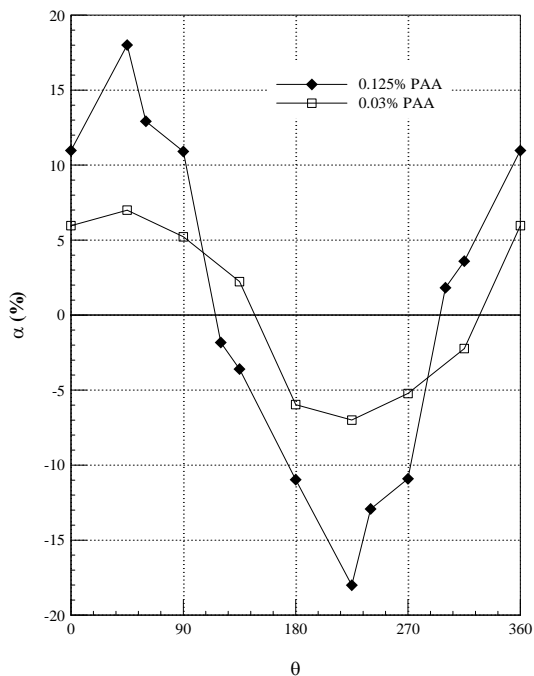
Os resultados representados nas Figuras 6 a 9 levantam uma série de questões. A primeira consiste em saber se o aparecimento da assimetria se deve a alguma perturbação no escoamento a montante e se esta se desenvolve com a distância axial. Se existe essa perturbação que influencie a assimetria do escoamento, ela não se manifesta para o caso de 60% glicerina e portanto perturbações a montante não originam escoamentos assimétricos de líquidos Newtonianos. As **Figuras 10** e **11** mostram diferenças significativas entre os três líquidos não-Newtonianos em relação à localização mais próxima da entrada ( $x/D = 15$ ). O primeiro perfil de velocidade para 0.15% XG (**Figura 10(c)**) é praticamente plano no centro da conduta, enquanto que as duas soluções de PAA, particularmente a concentração de maior concentração mostram uma diminuição da velocidade no centro da conduta (**Figura 10(b)**). Nos três casos verificam-se pequenas assimetrias mas que se desenvolvem à medida que a distância axial ao longo do escoamento aumenta. Esta evolução é quantificada em termos de  $\alpha$  ( $\theta, x/D$ ) na **Figura 11**. A principal conclusão é que a assimetria varia, quer em relação ângulo, quer em relação à distância axial. A solução 0.125% PAA exibe níveis de assimetria desprezáveis até à distância  $x/D = 200$ , a partir da qual a forma de variação da assimetria com o ângulo  $\alpha$  ( $\theta$ ) é similar à solução 0.03% PAA, mas com magnitudes consideravelmente mais elevadas. Para 0.15% PAA a assimetria aparece um pouco mais cedo do que para 0.125% PAA. Da análise dos resultados, nada sugere que a assimetria dos perfis de velocidade é devida a perturbações no escoamento a montante, no entanto, a influência de alterações no escoamento, quer a montante, quer a jusante, foi investigada.



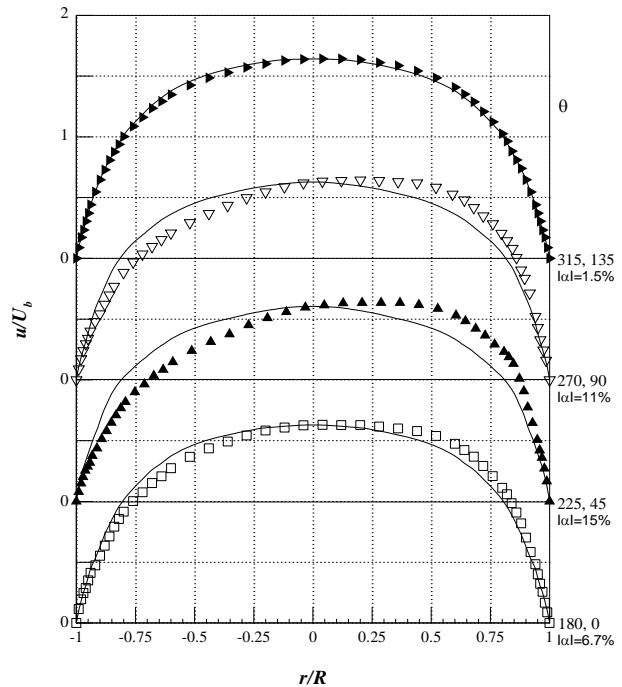
**Figura 6** - Distribuições da velocidade para diversos ângulos  $\theta$ , a 22 m da entrada, em regime de transição ( $Re_W = 5780$ ), para 0.03% PAA



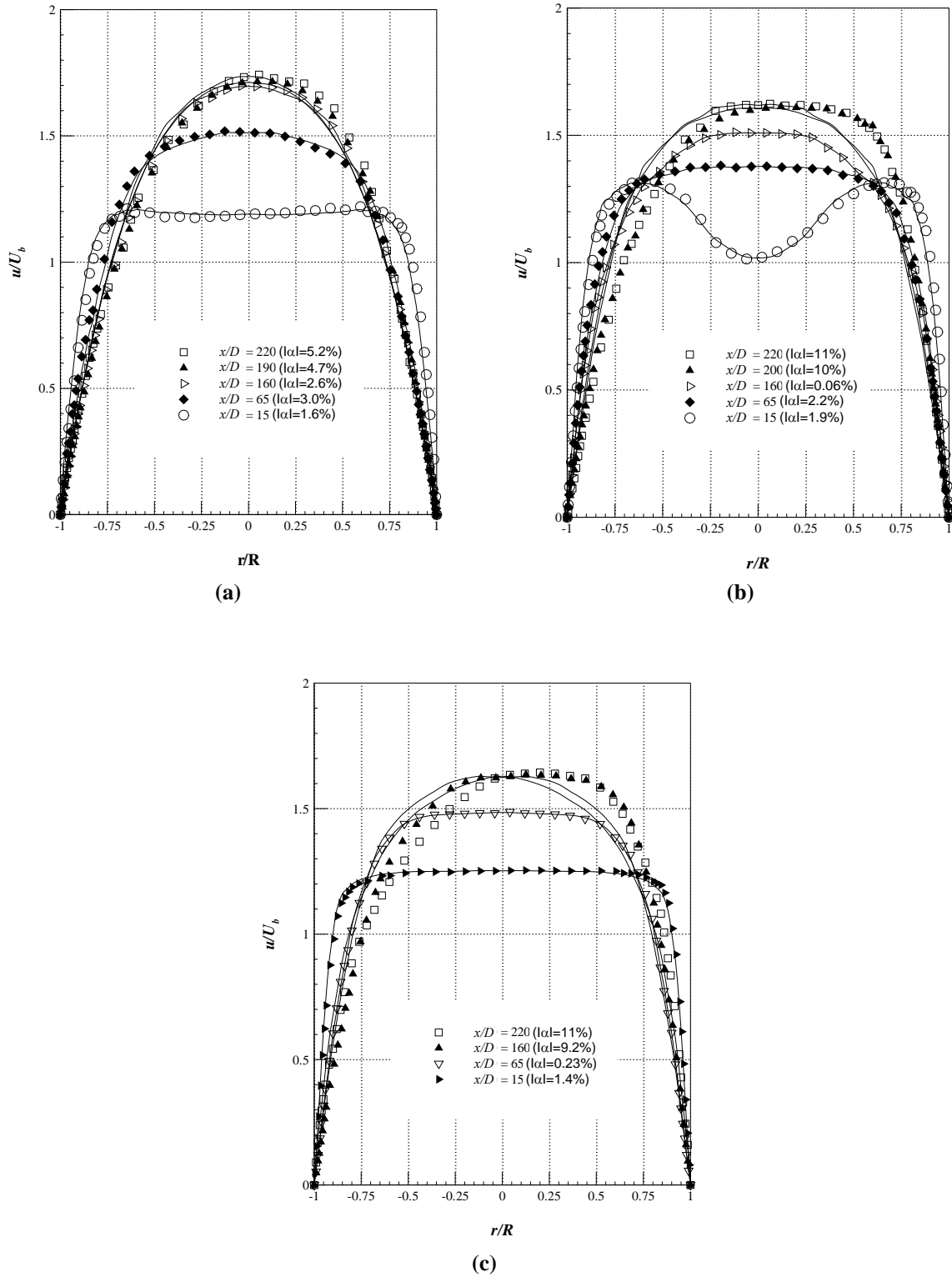
**Figura 7** - Distribuições da velocidade para diversos ângulos  $\theta$ , a 22 m da entrada, em regime de transição ( $Re_W = 10140$ ), para 0.125% PAA



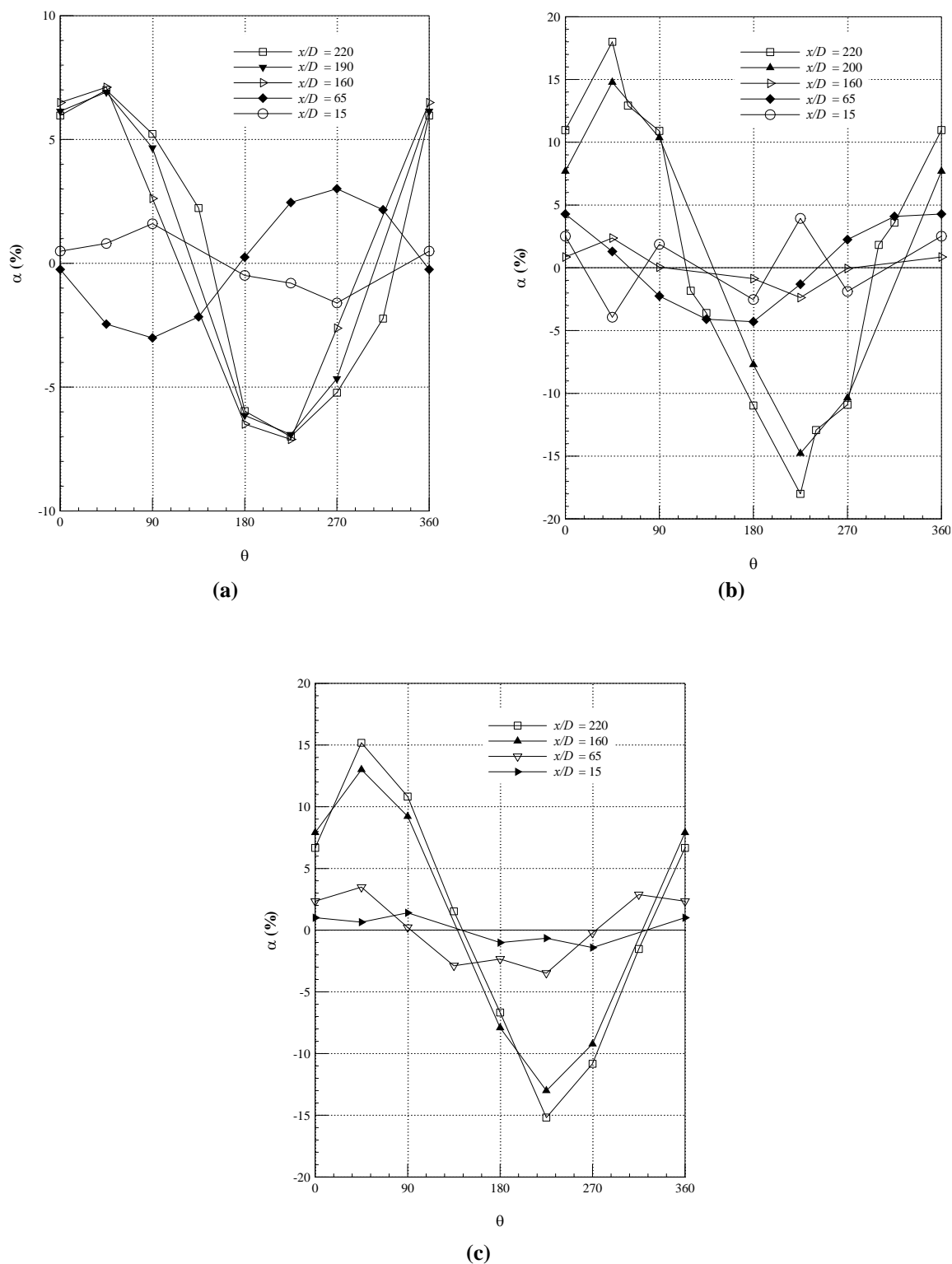
**Figura 8** – Variação do coeficiente de assimetria  $\alpha$  com o ângulo  $\theta$ , a 22 m da entrada, em regime de transição para 0.03% PAA ( $Re_W = 5780$ ) e 0.125% PAA ( $Re_W = 10140$ )



**Figura 9** – Distribuições da velocidade para diversos ângulos  $\theta$ , a 22 m da entrada, em regime de transição ( $Re_W = 10260$ ), para 0.15% XG



**Figura 10** – Evolução dos perfis de velocidade horizontais ( $\theta=90^\circ$ ) com a distância axial em regime de transição.  
 (a) 0.03% PAA com  $Re_W = 5780$ ; (b) 0.125% PAA com  $Re_W = 10140$ ; (c) 0.15% PAA com  $Re_W = 10260$

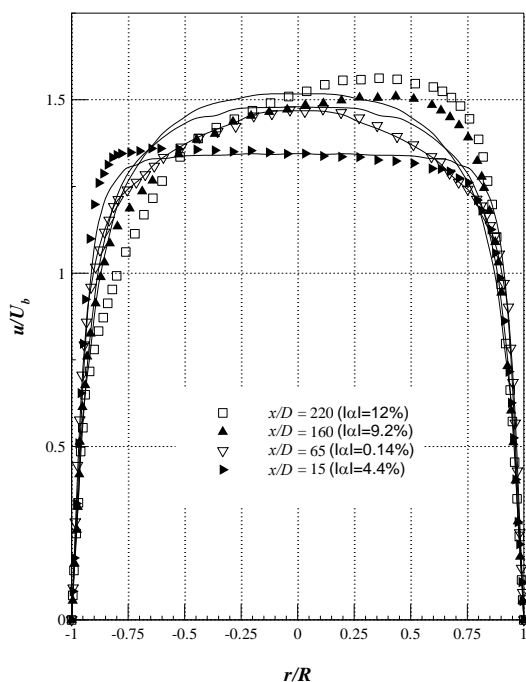


**Figura 11** – Evolução do coeficiente de assimetria  $\alpha$  com o ângulo  $\theta$  em regime de transição.  
**(a)** 0.03% PAA com  $Re_W = 5780$ ; **(b)** 0.125% PAA com  $Re_W = 10140$ ; **(c)** 0.15% PAA com  $Re_W = 10260$

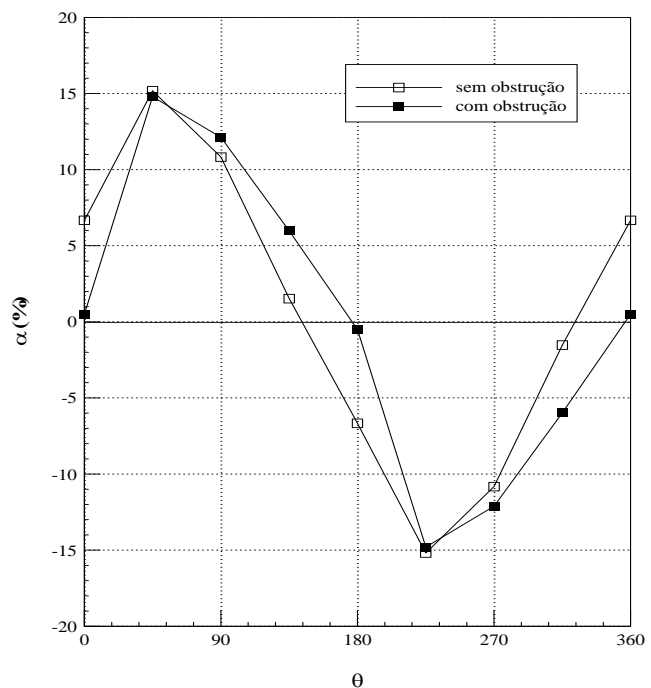
Com a intenção de provocar a alteração das condições do escoamento a montante, foram tapados os buracos do disco na câmara localizados entre  $315^\circ$  e  $135^\circ$  (**Figura 1**), uma vez que o “pico” da assimetria verifica-se sempre para  $45^\circ$ , obstruindo-se assim a passagem do líquido na zona de maior assimetria. Tal como esperado, este procedimento alterou a zona de transição, movendo-a para menores valores de  $Re_W$ . O método de detecção do regime de transição através da análise da turbulência perto da parede indicou uma antecipação do regime de transição. Para 0.15% XG e  $Re_W = 10260$ , enquanto que sem a obstrução o regime é de transição, com a obstrução dos buracos o regime é, para esse  $Re_W$ , turbulento. O  $Re_W$  correspondente aos perfis mais assimétricos e portanto em regime de transição, é agora de 7100, e não 10260.

A **Figura 12** mostra uma série de perfis de velocidade horizontais para 0.15% XG e  $Re_W = 7100$ , de onde se pode concluir que a evolução da assimetria com a distância axial não sofreu alterações significativas com a obstrução à entrada. Também a evolução da assimetria com o ângulo permanece inalterada com o “pico” a verificar-se para valores próximos de  $45^\circ$  (ver **Figura 13**).

A alteração a jusante, consistiu em rodar  $90^\circ$  a saída da conduta que faz a ligação de retorno ao tanque. De referir que a saída da conduta se situa 1,3 m após a última secção de medida. Verificou-se que após uma série de experiências não houve qualquer propagação desta perturbação a montante, obtendo-se perfis de velocidade semelhantes, dentro dos limites de incerteza, aos obtidos antes de modificar as condições de saída.



**Figura 12** – Evolução dos perfis de velocidade horizontais ( $\theta = 90^\circ$ ) com a distância axial em regime de transição ( $Re_W = 7100$ ) para 0.15% XG com o disco parcialmente obstruído



**Figura 13** – Comparação do coeficiente de assimetria  $\alpha$ , em regime de transição, entre duas condições de entrada diferentes (com e sem disco parcialmente obstruído,  $Re_W = 7100$  e  $Re_W = 10260$ , respectivamente), a 22 m da entrada, para 0.15% XG

## 5 Conclusões

Assimetrias do escoamento no interior de tubos, em regime de transição, de fluidos não-Newtonianos foram documentadas por diversos investigadores [2, 3, 7, 8, 9], após a primeira observação uma década atrás [1], sendo agora incontornável a existência de tal fenómeno. O presente estudo é, até à data, o mais extenso e dedica-se exclusivamente ao estudo deste fenómeno. O mecanismo físico que provoca a assimetria do escoamento não pôde ser explicado neste trabalho, no entanto, os resultados experimentais acabam por excluir como causa das assimetrias dos perfis de velocidade as perturbações do escoamento à entrada e à saída da conduta.

## Referências

- [1] M. P. Escudier, F. Presti. Pipe flow of a thixotropic liquid. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 62 (1996) 291-306
- [2] M. P. Escudier, R. J. Poole, F. Presti, C. Dales, C. Nouar, C. Desaubry, L. Graham, L. Pullum. Observations of asymmetrical flow behaviour in transitional pipe flow of yield-stress and other shear-thinning liquids. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 127 (2005) 143-155
- [3] J. Peixinho, C. Nouar, C. Desaubry, B. Théron. Laminar transitional and turbulent flow of yield stress fluid in a pipe. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 128 (2005) 172-184
- [4] S. Eliahou, A. Tumin, I. Wygnanski. Laminar-turbulent transition in Poiseuille pipe flow subjected to periodic perturbation emanating from a wall. *J. Fluid Mech.* 361 (1998) 333-349
- [5] J. M. J. den Toonder, F. T. M. Nieuwstadt. Reynolds number effects in a turbulent pipe flow for low to moderate Re. *Phys. Fluids.* 9 (11) (1997) 3398-3409
- [6] F. Presti. Investigation of transitional and turbulent pipe flow of non-Newtonian fluids. University of Liverpool PhD thesis (2000)
- [7] B. Güzel, I. Frigaard, D. M. Martinez. Predicting laminar-turbulent transition in Poiseuille pipe flow for non-Newtonian fluids. *Chem. Eng. Sci.* 64 (2009) 254-264
- [8] B. Güzel, T. Burghelea, I. Frigaard, D. M. Martinez. Observations of laminar-turbulent transition of a yield stress fluid in Hagen-Poiseuille flow. *J. Fluid Mech.* (in press)
- [9] A. Esmael, C. Nouar. Transitional flow of a yield-stress fluid in a pipe: Evidence of a robust coherent structure. *Phys. Rev. E* 77 057302 (2008)
- [10] K. Walters, A. Q. Bhatti, N. Mori. The influence of polymer conformation on the rheological properties of aqueous polymer solutions. In "Recent developments in structured continua." 2 Eds D. de Kee, P. N. Kaloni, Pitman (1990)
- [11] K. Yasuda, R. C. Armstrong, R. E. Cohen. Shear flow properties of concentrated solutions of linear and star branched polystyrenes. *Rheol. Acta* 20 (1981) 163-178