

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Solução Numérica do Escoamento de Fluido Viscoplastico Através de uma Contração Abrupta

AUTORES:

Pedro Henrique Vitorassi, Admilson T. Franco, Rigoberto E. M. Morales
pedrovitorassi@utfpr.edu.br, admilson@utfpr.edu.br, rmorales@utfpr.edu.br

INSTITUIÇÃO:

Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC,
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR,
Av. Sete de Setembro, 3165 – CEP: 80230-901, Curitiba – PR

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

SOLUÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE FLUIDO VISCOPLÁSTICO ATRAVÉS DE UMA CONTRAÇÃO ABRUPTA

Abstract

The present numerical study evaluates the effects of varying the governing parameters on the laminar flow of a non-Newtonian viscoplastic fluid (Herschel-Bulkley) through a sudden contraction in a pipe. The flow is assumed to be steady, incompressible and isothermal. In spite of its simple geometry, there is no analytical solution to the flow through a sudden contraction. Thus there were realized numerical simulations on the commercial program PHOENICS-CFD (Computational Fluid Dynamics). The governing parameters are the Reynolds number, Re , the Hedstrom number, He , and the power index, n . The contraction ratio used was $\beta = 4$. As results, are presented pressure, velocity and stress fields, beyond graphics showing the influence of varying the governing parameters on the non-dimensional pressure drop (ΔP^*). For the simpler cases ($He = 0$), present results agree with those found in literature. The value of ΔP^* was noticed to decrease as Re gets lower and He gets higher. In relation to n , its reduction produces also a decrease in ΔP^* , until certain value of He (depending on Re), after which ΔP^* increases. It was also observed that a correlation of ΔP^* to Power Law fluids is adapted to viscoplastic fluids until $He = 10^4$, as long as used the generalized Reynolds number (Re_g). It was also noticed that Re_g represents better the behavior of viscoplastic fluids.

Keywords: CFD, non-newtonian fluid, viscoplastic fluid, sudden contraction.

Introdução

O escoamento de fluidos não-newtonianos através de uma contração abrupta está presente em inúmeras aplicações industriais. Como exemplo, destacam-se a indústria de processamento de polímeros e a indústria petrolífera. A necessidade de explorar petróleo em águas cada vez mais profundas já ocorre há décadas no Brasil. No entanto, a recente descoberta de petróleo na região do pré-sal introduziu o país a uma nova realidade. Para tornar possível a utilização do óleo dessas imensas reservas, é preciso superar os novos desafios relacionados à sua extração. Tendo em vista que essas dificuldades encontradas no processo de exploração aumentam o tempo e, consequentemente, os custos de operação, denota-se que é imprescindível uma evolução tecnológica a fim de assegurar a viabilidade econômica da exploração.

Assim, as condições atuais de exploração de petróleo têm impulsionado estudos para solucionar problemas encontrados na perfuração de poços, gerando grandes desafios para a engenharia. Os fluidos de perfuração desempenham papel fundamental durante o processo de perfuração, carrear os cascalhos e ajudar na sustentação do poço são algumas de suas inúmeras funções (THOMAS, 2004). Devido às propriedades necessárias para cumprir essas funções, destacam-se as formulações que descrevem o comportamento reológico desses fluidos utilizando modelos não-newtonianos.

Durante o processo de perfuração de poços para a produção de petróleo e gás, o fluido é bombeado através da broca de perfuração até o fundo do poço, escoando através de espaços que apresentam reduções bruscas em suas seções. Não obstante sua simples geometria, o problema do escoamento através de uma contração brusca com simetria axial é de grande complexidade dinâmica e

não possui solução analítica. Dessa forma, denota-se a necessidade e importância do estudo do escoamento de fluidos não-newtonianos através de geometrias como a contração abrupta.

Considerando a alta demanda tecnológica por estudos de escoamentos de fluidos não-newtonianos generalizados em contrações, denota-se que poucos trabalhos são efetivamente reportados na literatura aberta. Durst e Loy (1985) apresentaram e compararam resultados numéricos e experimentais para o escoamento newtoniano através da contração brusca, obtendo boa concordância.

Mattiusi (2007) implementou o modelo de Herschel-Bulkley no programa computacional PHOENICS-CFD e apresentou resultados para o escoamento na geometria anular entre um tubo externo elíptico e um tubo circular excêntrico. Também utilizando o fluido Herschel-Bulkley, Vitorassi *et al.* (2008) apresentaram um estudo inicial do escoamento de fluidos viscoplásticos através de uma contração abrupta. Uma das características desse fluido não-newtoniano é que deve ser atingida uma mínima tensão de cisalhamento a partir da qual o fluido começa a escoar, ou seja, para valores menores que esse limite, não há escoamento. Além disso, após estabelecido o escoamento, o fluido não apresenta uma viscosidade aparente constante, ela varia exponencialmente com a taxa de deformação aplicada ao fluido.

Dentre os vários modelos de fluidos não-newtonianos, deve-se escolher aquele que possua a expressão para a viscosidade que apresente maior correlação com os dados experimentais, permitindo uma representação mais precisa das características do fluido de perfuração. O presente trabalho tem por objetivo utilizar uma metodologia numérica para caracterizar o escoamento laminar, em regime permanente, incompressível e isotérmico, do fluido não-newtoniano viscoplástico de Herschel-Bulkley através de uma contração abrupta, por meio de uma análise paramétrica, obtendo, a partir de uma solução numérica, de campos de velocidade, pressão e tensão de cisalhamento a fim de avaliar a influência dos parâmetros governantes sobre o comportamento do escoamento.

A solução para o problema proposto é obtida por meio de métodos numéricos, os quais vêm conquistando crescente destaque e importância, tornando-se a melhor alternativa para resolver problemas similares, uma vez que não há solução analítica e, muitas vezes, é inviável resolver experimentalmente devido a diversos problemas como, por exemplo, dificuldades financeiras.

Metodologia

Devido à geometria do problema, ilustrada na Figura 1, utiliza-se o sistema de coordenadas cilíndricas, localizado no encontro entre o eixo de simetria dos tubos e o plano da contração. A razão entre os raios maior e menor é definida como razão da contração β . No problema proposto, $\beta = 4$.

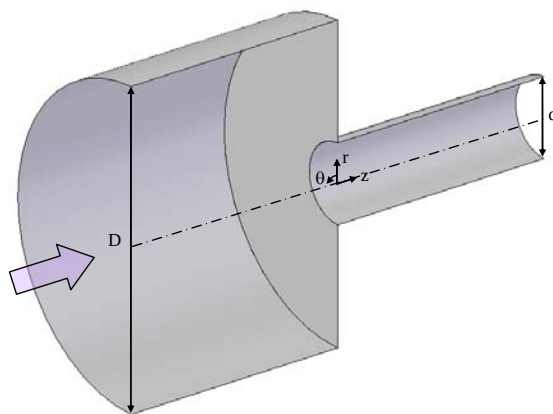


Figura 1 – Geometria e sistema de coordenadas utilizados

A solução do problema será obtida resolvendo as equações governantes (FOX e MCDONALD, 1995), de conservação da massa e da quantidade de movimento, e ainda, a equação reológica do fluido, que relaciona os campos de tensão e velocidade. Com o intuito de simplificar o problema, serão aplicadas as seguintes considerações: escoamento laminar, em regime permanente, incompressível, axissimétrico e bidimensional, e desprezam-se os efeitos gravitacionais. Assim, são obtidas as seguintes equações simplificadas, sendo a equação (1) de conservação da massa e as equações (2) e (3), de conservação da quantidade de movimento, nas direções r e z , respectivamente.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV_r) + \frac{\partial}{\partial z} V_z = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{rz} \right] - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

$$\rho \left(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

Sendo ρ a massa específica, V_i a componente da velocidade na direção i , p a pressão dinâmica, e τ_{ij} a tensão de cisalhamento atuante no plano i e na direção j . Ainda é necessária a equação reológica do fluido Herschel-Bulkley (BIRD *et al.*, 1987) para que o sistema possa ser resolvido. Esse modelo de fluido representa um comportamento viscoplástico, ou seja, não há escoamento caso a magnitude do tensor de tensões, τ , seja inferior a um valor limite, denominado tensão limite de escoamento, τ_0 . Nessa situação, a taxa de deformação, $\dot{\gamma}_{ij}$, será nula, equação (4). Do contrário, a tensão será definida pela equação reológica do fluido Herschel-Bulkley, (5), na qual k é o índice de consistência do fluido e n , o índice de potência.

$$\dot{\gamma}_{ij} = 0 \quad \text{se} \quad \tau \leq \tau_0 \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \dot{\gamma}^{n-1} \right) \dot{\gamma}_{ij} \quad \text{se} \quad \tau > \tau_0 \quad (5)$$

O número de Reynolds é um importante parâmetro adimensional que representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas do escoamento. Para o fluido Herschel-Bulkley, o número de Reynolds modificado, Re' , foi definido conforme mostrado na equação (6), de acordo com Gratão (2006), sendo $\bar{V}$ a velocidade média de escoamento, e D o diâmetro do tubo.

$$Re' = \frac{\rho \bar{V}^{(2-n)} D^n}{k 8^{n-1}} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (6)$$

Também será utilizado o número de Hedstrom (MALIN, 1998), de acordo com a equação (7), que representa a relação adimensional entre as magnitudes das forças plásticas e viscosas do escoamento. Para pequenos valores desse parâmetro, o fluido assume o comportamento newtoniano.

$$He = \frac{D^2 \rho \tau_0^{\left(\frac{2}{n}-1\right)}}{k^{2/n}} \quad (7)$$

Boger (1987) apresenta uma expressão (8) para prever a queda de pressão adimensional na contração (ΔP^*) para os fluidos newtoniano e Lei de Potência, válida para razão de contração igual

ou superior a quatro ($\beta \geq 4$). Sendo C' e n'_c o coeficiente de perda e a correção de Couette, respectivamente, que variam com o índice de potência n . Ainda é utilizado Re_g , o número de Reynolds generalizado, que, para os fluidos citados acima, é igual ao número de Reynolds modificado, $Re_g = Re'$. τ_p representa a tensão de cisalhamento na parede do tubo menos, e ΔP_{EN} , a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessar a contração. Essa queda de pressão é medida pela total queda de pressão entre um ponto anterior aos efeitos da contração e outro posterior, descontando a perda de carga que existiria entre os dois pontos caso o escoamento fosse completamente desenvolvido.

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P_{EN}}{2\tau_p} = (C' + 1) \frac{Re_g}{32} + n'_c \quad (8)$$

Kempinski (2006) define o número de Reynolds generalizado Re_g para o fluido Herschel-Bulkey, conforme pode ser observado na equação (9), na qual ψ é o coeficiente adimensional de correção do fator de atrito, expresso na equação (10).

$$Re_g = Re' \psi \quad (9)$$

$$\psi = (3n + 1)^n (1 - \xi_0)^{n+1} \psi_1^n \quad (10)$$

Sendo ψ_1 o componente do coeficiente de correção, mostrado na equação (11), e ξ_0 , a razão entre o raio da região central não cisalhada (r_0) e o raio do tubo (R), que também é igual à razão entre a tensão limite de escoamento e a tensão de cisalhamento na parede do tubo (τ_p), conforme equação (12).

$$\psi_1 = \left[\frac{(1 - \xi_0)^2}{3n + 1} + \frac{2\xi_0(1 - \xi_0)}{2n + 1} + \frac{\xi_0^2}{n + 1} \right] \quad (11)$$

$$\xi_0 = \frac{r_0}{R} = \frac{\tau_0}{\tau_p} \quad (12)$$

O número de Reynolds foi calculado para o tubo de menor diâmetro, e o número de Hedstrom, para o tubo maior, pois nessas condições que se encontram seus maiores valores. Foram utilizados quatro valores para o índice de potência: $n = 1,0; 0,8; 0,6; 0,4$ e cinco para o número de Hedstrom: $He = 0; 10^3; 10^4; 10^5; 10^6$. A fim de garantir o regime laminar do escoamento, foram utilizados cinco valores de Re' para cada combinação dos parâmetros He e n inferiores ao Reynolds crítico (Re_c) de acordo com a correlação proposta por Slatter (1997).

A discretização das equações governantes foi realizada pelo método numérico dos Volumes Finitos (PATANKAR, 1980), com o esquema de interpolação HCUS. O acoplamento pressão-velocidade faz-se pelo método SIMPLEST. Para assegurar a convergência, adotou-se o critério de controle dos resíduos de Spalding (1994).

A solução das equações discretizadas foi obtida utilizando o software comercial PHOENICS-CFD (1991). Esse programa possui um código semi-aberto que permite ao usuário realizar modificações em suas rotinas. Uma vez que o PHOENICS-CFD não contém o modelo de viscosidade do fluido de Herschel-Bulkley, foi necessário realizar a implementação de sua equação reológica.

As condições de contorno utilizadas foram: componentes nulas da velocidade junto às paredes (condição de não-deslizamento), perfil de velocidade desenvolvido de um fluido Lei de Potências na entrada do tubo, e escoamentos completamente desenvolvidos antes de se aproximarem tanto da contração, quanto da saída do tubo.

Como já foi mencionado, apesar de geometricamente simples, o problema apresenta grande complexidade dinâmica, sendo assim, torna-se necessário controlar as oscilações numéricas a fim de garantir a convergência, e utilizar uma malha bastante refinada para obter resultados precisos. Foram realizados testes com diferentes malhas a fim de assegurar a independência de seu nível de refinamento. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos utilizando uma malha irregular em ambas as direções, concentrando um maior número de volumes de controle próximo às paredes e à contração, onde se espera encontrar os maiores gradientes de velocidade.

Para apresentação dos resultados, serão utilizadas as seguintes variáveis adimensionais (Coradin, 2007): $R^* = 2r/D$, $z^* = z/D$, $V_z^* = V_z/\bar{V}$.

Resultados e Discussão

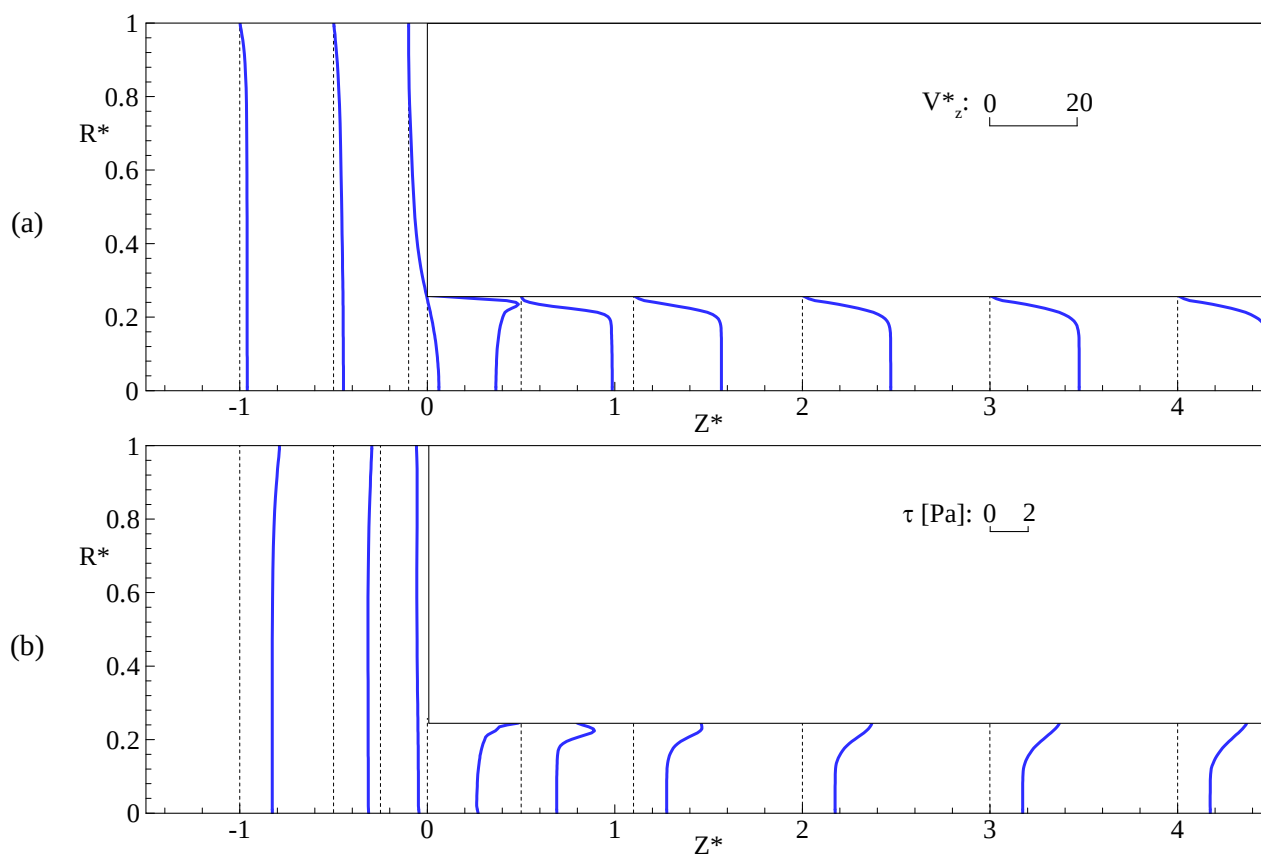
Inicialmente, foram realizadas simulações com o fluido Herschel-Bulkley reduzido aos fluidos newtoniano e Lei de Potência com o intuito de comparar os resultados para a queda de pressão adimensional com a expressão de Boger (1987) da equação (8). A partir dessa comparação, também é possível verificar a coerência do cálculo da queda de pressão através da contração. Os resultados numéricos obtidos no presente trabalho apresentaram boa concordância com a expressão de Boger (1987), conforme pode ser observado a partir do erro médio e do desvio padrão percentuais, apresentados na Tabela 1 para cada n . Denota-se que as soluções numéricas realizadas e a metodologia de cálculo da queda de pressão adimensional utilizada são coerentes.

Tabela 1 – Erro médio e desvio padrão percentuais dos resultados de ΔP^* para $He = 0$

	$n = 1,0$	$n = 0,8$	$n = 0,6$	$n = 0,4$
Erro médio (%)	1,89	0,91	1,32	3,72
Desvio padrão (%)	1,13	0,76	0,34	2,07

Na Figura 2, pode ser observada a evolução dos perfis de velocidade (a) e da magnitude do tensor de tensões (b). Nota-se a elevada aceleração sofrida pelo fluido e o pico de velocidade no perfil em $Z^* = 0$, relativo ao fenômeno da *vena contracta* (IUDICELLO, 2003), comum em escoamentos com redução de área. Quanto às tensões, percebe-se o elevado valor próximo à parede em $Z^* = 0$, onde ocorrem as maiores deformações. Ainda nota-se, onde há escoamento desenvolvido, parte plana do perfil de tensões que representa a região onde não há cisalhamento, sendo que a magnitude do tensor de tensões assume o valor da tensão limite de escoamento. Também é possível observar o desenvolvimento de ambos os perfis.

Apesar de Boger (1987) não fazer considerações sobre sua expressão (8) para a queda de pressão adimensional em escoamentos de fluidos viscoplásticos, decidiu-se aplicar o número de Reynolds generalizado $Re_g = Re' \psi$ nessa mesma correlação já utilizada, a fim de comparar com os resultados numéricos obtidos no presente trabalho. Os resultados podem ser observados na Figura 3, e o erro médio e o desvio padrão percentuais obtidos, na Tabela 2.



**Figura 2 –Evolução do perfil: (a) de velocidade; (b) da magnitude do tensor de tensões
($Re' = 5000$, $He = 10^6$ e $n = 0,4$)**

Percebem-se alguns pontos nitidamente fora da curva obtida pela expressão de Boger (1987), esses pontos possuem valores de $He = 10^5$ e $He = 10^6$. Quanto aos demais pontos ($He \leq 10^4$), denota-se boa concordância entre os resultados. A utilização de Re_g também propiciou outras observações interessantes. Todas as simulações que apresentaram problemas de convergência possuíam $Re_g > 5000$. Entre as demais, apenas em um dos casos o número de Reynolds generalizado era superior a esse valor.

Tabela 2 – Erro médio e desvio padrão percentuais dos resultados de ΔP^* em função de Re_g

		$n = 1,0$	$n = 0,8$	$n = 0,6$	$n = 0,4$
$He \leq 10^4$	Erro médio (%)	1,42	2,05	3,53	3,22
	Desvio padrão (%)	1,21	2,20	3,10	1,84
Todos os valores de He	Erro médio (%)	6,97	7,58	7,94	5,51
	Desvio padrão (%)	9,38	8,29	7,10	3,98

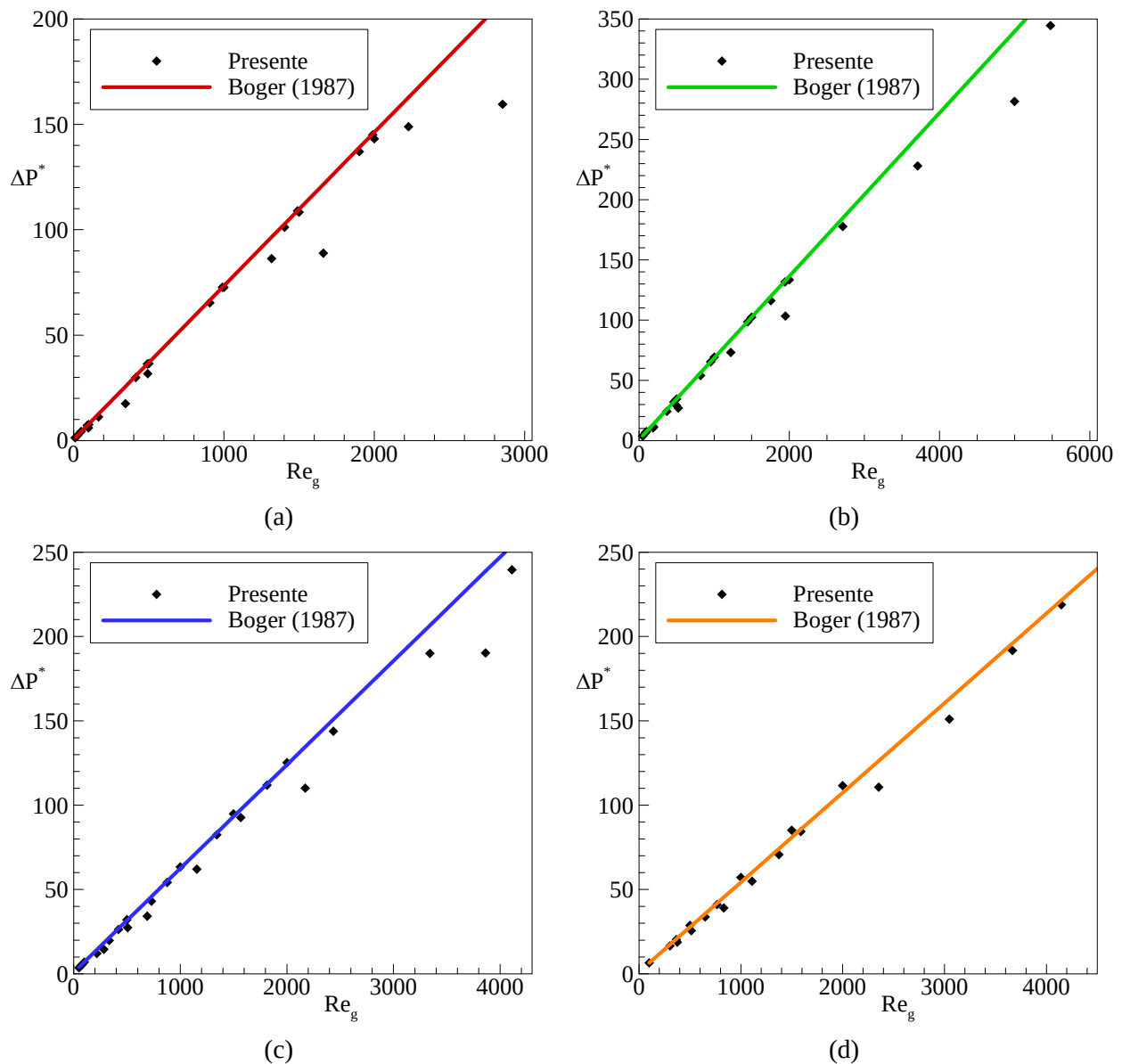


Figura 3 – Queda de pressão adimensional em função de Re_g para: (a) $n = 1,0$; (b) $n = 0,8$; (c) $n = 0,6$; (d) $n = 0,4$

Conclusões

O presente trabalho descreve o estudo numérico do escoamento de fluido não-newtoniano viscoplástico através de contração abrupta. A implementação numérica do fluido Herschel-Bulkley é considerada válida e a metodologia de medição da queda de pressão adimensional, coerente.

Variando os parâmetros governantes, observou-se que os incrementos dos números de Reynolds e de Hedstrom possuem efeitos opostos, enquanto o primeiro aumenta a queda de pressão adimensional, o segundo provoca uma diminuição. Já a alteração do índice de potência causou um efeito curioso: sua diminuição provoca também um decréscimo na queda de pressão adimensional, até que, a partir de determinado valor do número de Hedstrom, à medida que se diminui o índice de potência, a queda de pressão adimensional passa a aumentar.

Mesmo estando presente na literatura como aproximação apenas para fluido Lei de Potências, foi utilizada a expressão da queda de pressão adimensional em função do número de Reynolds

generalizado, realizando a alteração necessária nesse parâmetro. A comparação com os resultados numéricos mostrou que essa própria expressão pode ser utilizada como aproximação para a queda de pressão do escoamento de fluidos viscoplásticos através da contração, para números de Hedstrom até, aproximadamente, $He = 10^4$. Também foi possível observar que o número de Reynolds generalizado representa melhor o comportamento do escoamento de fluidos viscoplásticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da ANP e FINEP por meio do Programa de Recursos Humanos - PRH 10 da UTFPR e do TEP / CENPES / PETROBRAS.

Referências

- BIRD, R. Byron; ARMSTRONG, Robert C.; HASSAGER, Ole. **Dynamics of Polymeric Liquids**. 2ª ed., v. 1, Editora John Wiley & Sons, 1987.
- BOGER, D.V. **Viscoelastic Flows Through Contractions**. Annual Reviews Fluid Mechanics, v. 19, 2003. pp. 157-182.
- CORADIN, Henrique Toniolo. **Simulação Numérica do Escoamento de um Fluido Viscoelástico Através de uma Contração Brusca**. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- DURST, F.; LOY, T. **Investigation of Laminar Flow in a Pipe with a Sudden Contraction of Cross Sectional Area**. Computers & Fluids, v. 13, 1985, pp.15-36.
- FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2006.
- GRATÃO, Ana Carolina Amaral. **Termofluidodinâmica de Sucos de Frutas Pseudoplásticos em Dutos Cilíndricos e Ânulos Concêntricos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- IUDICELLO, F. **Flow in Pipes with Sudden Contractions: CFX5 Predictions against Experimental Data**. Ansys CFX, UK User Conference. Coventry, UK, 2003.
- KEMPINSKI, Jan. **Determination of Pressure Loss During Flow of Visco-Plastic Mixtures in Horizontal Pipelines in the Laminar Flow Zone**. Eletronic Journal of Polish Agricultural Universities, v. 9, 2006.
- MALIN, M.R. **Turbulent Pipe Flow of Herschel-Bulkley Fluids**. Int. Comm. Heat Mass Transfer, v. 25, 1998, pp. 321-330.
- MATTIUSI, Eveline Martins. **Escoamento Laminar de Fluidos Newtonianos Generalizados em Tubos de Seção Transversal Elíptica**. Dissertação (Mestre em Engenharia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- PATANKAR, S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- PHOENICS. **Reference Manual**. Bakery House, Londres, 1991.
- SLATTER, P.T. **The Effect of the Yield Stress on the Laminar/Turbulent Transition**. International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles. Cracow, 1997. pp. 547-561.
- SPALDING, D.B. **The PHOENICS Encyclopedia**. CHAM Ltda., Londres, 1994.
- THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed., Editora Interciência, 2004.
- VITORASSI, Pedro Henrique; FRANCO, Admilson T.; MORALES, Rigoberto E. M. **Solução do Escoamento de Fluido Não-Newtoniano Através de uma Contração Abrupta Utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC)**. XV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2008.