

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO DE PERFURAÇÃO VISCOELÁSTICO ATRAVÉS DE UMA CONTRAÇÃO BRUSCA

Henrique T. Coradin¹ (UTFPR), Wellington M. Brondani² (UTFPR), Eveline M. Mattiussi³ (UTFPR), Admilson T. Franco⁴ (UTFPR), Rigoberto E. M. Morales⁵ (UTFPR), André L. Martins⁶ (CENPES/PETROBRAS)

¹Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba-PR. Cep: 80230-901 – Bloco D-005,
henrique_coradin@yahoo.com.br

²Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba-PR. Cep: 80230-901 – Bloco D-005,
w.brondani@gmail.com

³Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba-PR. Cep: 80230-901 – Bloco D-005,
evelinemattiussi@yahoo.com.br

⁴Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba-PR. Cep: 80230-901 – Bloco D-005,
admilson@utfpr.edu.br

⁵Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba-PR. Cep: 80230-901 – Bloco D-005,
rmorales@utfpr.edu.br

⁶aleibsohn@cenpes.petrobras.com.br

Resumo: O escoamento de fluidos não-newtonianos através de uma contração brusca está presente em inúmeras aplicações industriais. Por exemplo, podem-se destacar as indústrias de processamento de polímeros e a indústria petrolífera. Nesta última, durante o processo de perfuração de poços para a produção de petróleo e gás, o fluido de perfuração escoar através de espaços que apresentam reduções bruscas em suas seções. O comportamento reológico dos fluidos de perfuração, em função das inúmeras propriedades desejadas, é descrito por modelos de fluidos não-newtonianos. Entre os modelos de fluidos não-newtonianos, os modelos viscoelásticos permitem uma representação mais detalhada das características do fluido de perfuração. O presente trabalho tem por objetivo elaborar uma metodologia numérica para avaliar o escoamento do fluido não-newtoniano viscoelástico de Phan-Thien e Tanner (PTT) através de uma contração brusca axissimétrica. Para a solução do problema é utilizado o programa comercial de dinâmica de fluidos computacional PHOENICS CFD, o qual é baseado no Método dos Volumes Finitos. Foi feita a implementação do modelo PTT no programa PHOENICS CFD. Com a metodologia desenvolvida, é possível a caracterização e determinação, utilizando simulações numéricas, do comportamento hidrodinâmico e de propriedades reológicas, tais como a primeira e segunda diferença de tensões normais e a viscosidade extensional do escoamento, durante a passagem do fluido pela contração.

Fluido de Perfuração, Contração Brusca, Fluido Viscoelástico, Modelo PTT, Simulação Numérica.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos de fluidos não-newtonianos através de contrações bruscas representam situações industriais comuns, sendo foco de pesquisas e estudos principalmente pelas indústrias químicas, alimentícias e petrolíferas. Tais escoamentos podem ser aplicados, por exemplo, na injeção de plásticos, processos de extrusão de forma geral e na extração de petróleo. Como exemplo desses fluidos, pode-se citar tintas, graxas, plásticos, alimentos líquidos, fluido para perfuração e completação de poços de petróleo, e até mesmo o próprio petróleo.

Dentre as aplicações citadas, na indústria petrolífera é grande o interesse na caracterização do comportamento dos fluidos de perfuração e completação. Devido às condições adversas, como o cenário de águas profundas e óleos pesados, o desenvolvimento de processos mais eficientes no setor tem motivado investimentos e pesquisas em todas as etapas da exploração do petróleo.

Durante a perfuração de poços para a produção de petróleo e gás, fluidos são empregados para auxiliar no processo. O fluido de perfuração tem por principais funções o controle da pressão, a remoção de cascalhos, a refrigeração e a lubrificação da broca (Machado, 2002). Modelos de fluido não-newtoniano podem representar adequadamente o comportamento dos fluidos de perfuração, por exemplo, o modelo de Herschel-Bulkey.

Modelos de fluidos não-newtonianos estão disponíveis na literatura em diversas formulações, podendo apresentar inúmeras características (Bird, 1987). Entre as características dos fluidos não-newtonianos, encontra-se a variação da viscosidade com a taxa de deformação. O fluido também pode apresentar características elásticas e variações da viscosidade com o tempo de deformação. Entre os fluidos não-newtonianos com essas características citadas, os modelos viscoelásticos são aqueles que melhor representam o comportamento real do fluido (Tanner, 2000).

Durante o processo de perfuração de poços, o fluido de perfuração é bombeado através da coluna de perfuração até o fundo do poço, passando pela broca e retornando pelo espaço anular formado pela coluna e a

formação rochosa do poço. A Figura 1 ilustra alguns dos casos mais comuns em que o escoamento do fluido passa por contrações durante o processo de perfuração de poços de petróleo e gás. O entendimento dos fenômenos envolvendo a contração permite direcionar os projetos de fluido de perfuração, garantindo, por exemplo, o controle dos parâmetros do fluido para exercer suas funções principais e, que ao mesmo tempo, não ocasiona desmoronamento ou infiltrações na formação rochosa.

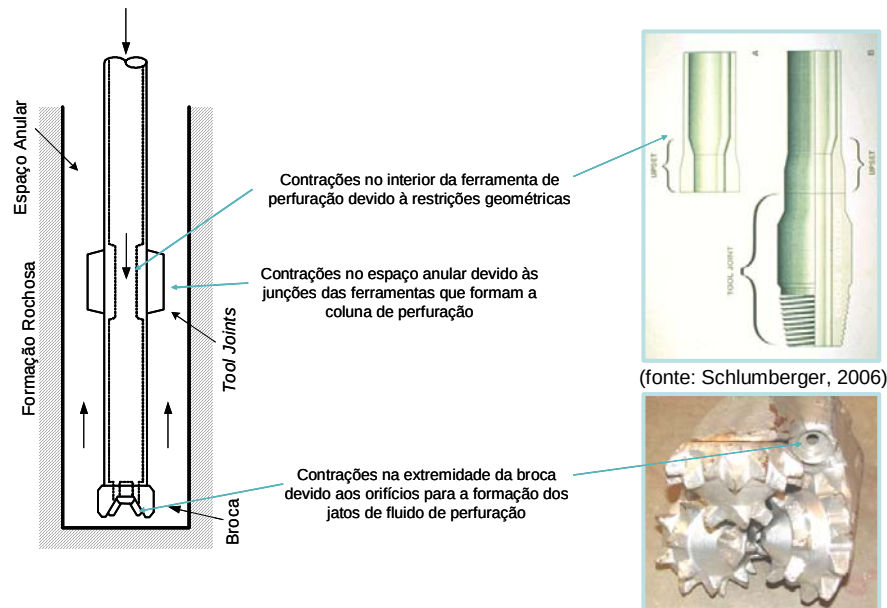


Figura 1 – Contrações encontradas durante o processo de perfuração de poços de petróleo e gás.

O escoamento através de uma contração brusca, apesar de se tratar de um problema geometricamente simples, apresenta grande complexidade hidrodinâmica e não possui solução analítica. Desta forma, a solução do problema por métodos numéricos torna-se de grande importância, pois permite a caracterização do escoamento.

No presente trabalho é proposta uma estrutura de suporte para a implementação e simulação de equações constitutivas diferenciais viscoelásticas dentro de um programa comercial, no caso o PHOENICS CFD. São apresentados alguns resultados preliminares para o escoamento de um fluido viscoelástico tipo PTT através de uma contração abrupta axissimétrica.

A presente estrutura computacional já foi testada e validada com soluções da literatura, Pinho e Oliveira (2000), para o caso do escoamento permanente de um fluido viscoelástico PTT através de um tubo anular concêntrico (Brondani, 2006)

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os modelos constitutivos diferenciais que vêm sendo utilizados para a resolução do escoamento viscoelástico em uma contração brusca são muitos. Entre os trabalhos realizados, os principais modelos empregados são: Phan-Thien e Tanner (PTT), Oldroyd-B, FENE-P, POM-POM, Upper Convected Maxwell (UCM), Giesekus e K-BKZ. Entre os modelos citados, o de maior destaque é o PTT. A seguir, serão comentados alguns trabalhos realizados sobre escoamentos viscoelásticos através de contrações bruscas.

Azaiez (1996) realiza a simulação numérica do escoamento viscoelástico através de uma contração plana. Os modelos de fluido utilizados são os de Giesekus, o FENE-P e o PTT. Ambos os campos de tensões e velocidades são examinados em diferentes seções do escoamento, sendo os resultados numéricos comparados com dados experimentais. Os resultados apresentaram boa concordância qualitativa, porém, principalmente para a primeira diferença de tensões, há discrepâncias nos resultados quantitativos.

Phillips e Williams (2002) estudaram a diferença no desenvolvimento das estruturas dos vórtices gerados pelo escoamento de um fluido viscoelástico Oldroyd-B, quando comparadas às geometrias de contração plana e axissimétrica. Os resultados numéricos alcançados demonstram que há grande diferença entre os escoamentos através das duas geometrias. No caso de escoamento axissimétrico, os vórtices gerados são maiores tanto em tamanho quanto em intensidade.

Mompean (2002) realizou a simulação numérica do escoamento através de uma contração plana para baixo número de Reynolds com fluidos newtonianos e viscoelásticos. Um modelo com tensões extras algébricas derivadas do modelo diferencial Oldroyd-B estendido ao modelo de Phan-Thien e Tanner é utilizado. Esse modelo apresentou excelentes resultados.

Aboubacar et. al. (2002) examinam o escoamento viscoelástico através de contrações axissimétricas e planares. O escoamento apresenta condições de *creeping flow* ($Re=0$) e a razão da contração é 4 para todos os escoamentos. Os modelos de fluidos viscoelásticos são o Oldroyd-B e o modelo PTT com coeficiente linear e exponencial para as tensões. Os resultados são mostrados em forma de comparação das linhas de corrente apresentadas pelo escoamento, sendo dada atenção especial ao tamanho dos vórtices em função das propriedades do fluido.

Alves et. al. (2002) apresentaram uma solução de referência no escoamento de fluidos viscoelásticos através de contrações bruscas planas bidimensionais. Para a modelagem do fluido é utilizado o modelo não-linear de Phan-Thien e Tanner. Um esquema de diferenças de ordem superior, especialmente concebido para fluidos viscoelásticos, é aplicado conjuntamente com a utilização de malhas muito refinadas, contendo um número superior a um milhão de graus de liberdade, de forma a se obter resultados passíveis de serem utilizados como referência. Em outro trabalho feito pelos mesmos autores (Alves et. al, 2003), foi proposta a solução de referência para o escoamento viscoelástico através de uma contração, porém, utilizando os modelos Oldroyd-B e PTT com as funções linear e exponencial. Nesse estudo, pode-se constatar que o modelo Oldroyd-B não apresenta resultados confiáveis para valores do número de Deborah maiores que 3. Para o modelo PTT, utilizando a forma linear para a função de tensão, um limite de aproximadamente 200 foi encontrado no número de Deborah, enquanto que para a forma exponencial nenhum limite superior foi encontrado. Alves et. al. (2004) ainda realizaram um trabalho que aborda o efeito da razão da contração (razão entre os diâmetros) no escoamento viscoelástico através de contrações axissimétricas. Foi utilizado o modelo de fluido de Phan-Thien e Tanner com coeficiente linear para as tensões, sendo desprezados os efeitos inerciais no escoamento (*creeping flow*). Os autores concluem que, ao contrário do escoamento de fluido newtoniano, em que a razão de contração não apresenta influência para valores maiores do que 4, para escoamentos viscoelásticos o comportamento dos vórtices são alterados tanto com a variação da razão da contração quanto com a variação da elasticidade do fluido.

Entre as propriedades de interesse no escoamento viscoelástico através de uma contração brusca, a viscosidade extensional apresenta grande importância. Portanto, é necessário utilizar um modelo que permita bons resultados para essa propriedade. Porém, resultados para outras propriedades do fluido, tais como a primeira e segunda diferença de tensões normais, também devem apresentar resultados satisfatórios.

Após a observação dos trabalhos realizados para o escoamento de fluidos viscoelásticos através de contrações bruscas pode-se notar que o modelo de fluido apresentado por Phan-Thien e Tanner (1977) representa de forma eficaz as características deste escoamento. Em seu trabalho, Quinzani et al. (1995) apresentaram os resultados de um estudo experimental para avaliar a capacidade de diversos modelos constitutivos diferenciais. Os autores concluem que o modelo de Phan-Thien e Tanner é o que melhor caracteriza a viscosidade extensional, podendo representar satisfatoriamente, além do comportamento extensional, outras propriedades do escoamento.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Ao longo desta seção serão apresentadas as equações governantes e as condições de contorno utilizadas para definir o problema. As equações a resolver em um problema de escoamento com fluido viscoelástico são habitualmente as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, acrescidas de um conjunto de equações constitutivas que representam o transporte das componentes do tensor das tensões (Alves et. al., 2002).

Considerando as hipóteses de escoamento isotérmico, permanente, axissimétrico, laminar e incompressível, e também desprezando os efeitos gravitacionais, as equações governantes da conservação da massa e da conservação da quantidade do movimento assumem a forma mostrada nas Equações (1), (2) e (3), respectivamente.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

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

onde v_r e v_z são as componentes radial e axial da velocidade, respectivamente, r e z são as coordenadas radial e axial, respectivamente, ρ a massa específica do fluido, p a pressão termodinâmica do escoamento e $\tau_{\theta\theta}$, τ_{rr} , τ_{zz} e τ_{rz} as componentes do tensor de tensão.

O modelo de fluido viscoelástico a ser utilizado é o modelo PTT (Phan-Thien e Tanner, 1977), representado pela Equação (4).

$$\lambda \left[\frac{D}{Dt} \boldsymbol{\tau} - \ell \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau} \ell^T \right] + Y \boldsymbol{\tau} = 2\lambda G \mathbf{d} \quad (4)$$

onde λ é o tempo característico de relaxação do material, $\boldsymbol{\tau}$ o tensor de tensões, ℓ o tensor efetivo do gradiente de velocidade, Y é função do traço do tensor de tensões, G o módulo de relaxação do fluido e $\mathbf{d}$ está relacionado com o tensor taxa de deformação.

A função linear, Equação (5), será considerada para representar a função Y .

$$Y = \left(1 + \frac{\varepsilon}{G} \text{tr} \boldsymbol{\tau} \right) \quad (5)$$

onde ε é o parâmetro responsável pelo fluxo extensional do escoamento e $\text{tr} \boldsymbol{\tau}$ o traço do tensor de tensões.

Também é assumido o modelo PTT *affine*, ou seja, será desprezado qualquer deslizamento relativo entre as moléculas que compõem o fluido. Desta forma, a equação constitutiva para representar o fluido viscoelástico PTT assume a seguinte forma:

$$(\mathbf{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{\tau} - \mathbf{L} \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau} \mathbf{L}^T + \left(1 + \frac{\varepsilon}{G} \text{tr} \boldsymbol{\tau} \right) \frac{\boldsymbol{\tau}}{\lambda} = 2G \mathbf{d} \quad (6)$$

onde $\mathbf{v}$ é o vetor velocidade e $\mathbf{L}$ o gradiente do vetor transposto da velocidade.

As condições de contorno utilizadas para representar o escoamento através de uma contração brusca e o sistema de coordenadas adotado podem ser observados na Figura 2.

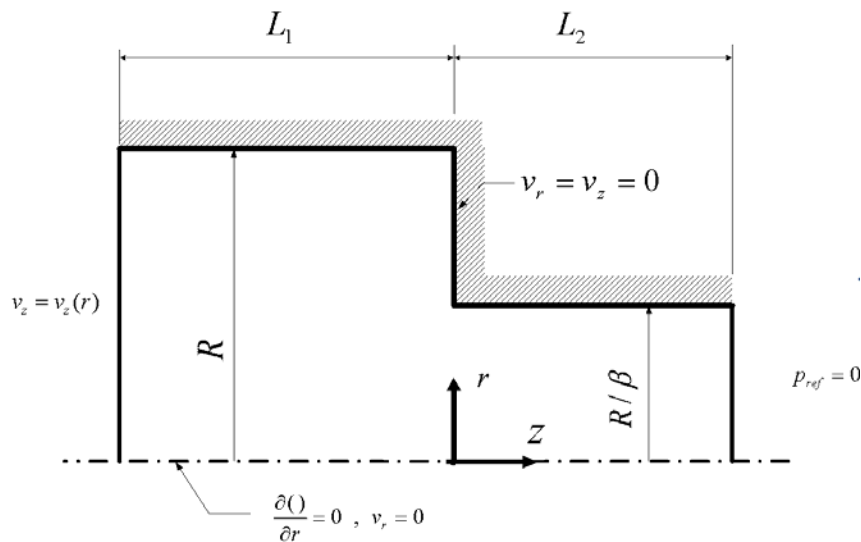


Figura 2 – Condições de contorno na contração e sistema de coordenadas para a contração brusca axissimétrica.

As variáveis adimensionais para os raios antes e depois da contração e para a cota z são, respectivamente, expressas nas equações (7), (8) e (9).

$$r_1^* = \frac{r}{R} \quad (7)$$

$$r_2^* = \frac{r}{R/\beta} \quad (8)$$

$$z^* = \frac{z}{D} \quad (9)$$

onde $*$ indica a variável adimensional e β a razão entre os diâmetros da contração.

O número de Reynolds, Re , representa a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas presentes no escoamento. Para a contração, o Re pode ser expresso conforme a Equação (10).

$$Re = \frac{\rho v_{méd} d}{\eta_0} \quad (10)$$

onde η_0 é a viscosidade à taxa nula de cisalhamento, $v_{méd}$ se refere a velocidade média no tubo de menor diâmetro e d representa este diâmetro.

O número de Deborah, De , relaciona as forças elásticas com as forças viscosas do escoamento através da razão do tempo natural ou característico de relaxação do material e o intervalo de tempo no qual é aplicada a deformação ou tensão. O valor de De na contração é expresso por:

$$De = \frac{\lambda v_{méd}}{R/\beta} \quad (11)$$

onde R/β representa o raio do tubo de menor diâmetro.

4. METODOLOGIA NUMÉRICA

No programa PHOENICS CFD, as equações são implementadas conforme a equação generalizada dada pela equação (12) (Patankar, 1980). O primeiro termo do lado esquerdo da equação (12) é o termo temporal, o segundo representa a parcela convectiva, o terceiro é o termo difusivo e o termo do lado direito é o termo fonte, o qual representa todas as parcelas adicionais na equação.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{v} \phi) - \nabla (\Gamma \nabla \phi) = S \quad (12)$$

onde ϕ é a variável em questão, t o tempo, Γ o coeficiente de difusão e S o termo fonte.

Assim, as equações da conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e as equações constitutivas do modelo PTT, necessárias para descrever o escoamento viscoelástico, são implementadas no PHOENICS CFD conforme a Tabela 1.

4. RESULTADOS

Previamente, a estrutura implementada foi avaliada e validada através da simulação do escoamento newtoniano através de uma contração abrupta. Os resultados foram comparados com os dados experimentais obtidos por Durst e Loy (1985), apresentando boa concordância e indicando a validade da metodologia.

Em uma primeira análise do escoamento viscoelástico através de uma contração brusca, um teste de malha foi realizado para garantir que os resultados obtidos são independentes da malha computacional. Para comparar a influência da malha, optou-se por adotar como referência dois perfis de velocidade axial em função do raio: o primeiro posicionado em uma cota $z = -0,5D$ e o segundo em $z = 0,5D$. A tabela a seguir descreve as malhas utilizadas para o teste em questão.

Tabela 1 – Equações escritas na forma generalizada.

Equação	ϕ	Γ	S
Continuidade	1	0	0
Quantidade de movimento em r	v_r	0	$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{rz} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right] - \frac{\partial p}{\partial r}$
Quantidade de movimento em z	v_z	0	$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] - \frac{\partial p}{\partial z}$
Constitutiva em rr	$\frac{\tau_{rr}}{\rho}$	0	$G \left\{ 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right\} + 2 \left\{ \tau_{rr} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \tau_{rz} \frac{\partial v_r}{\partial z} \right\} - \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{G} (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} + \tau_{zz}) \right\} \tau_{rr} / \lambda$
Constitutiva em $\theta\theta$	$\frac{\tau_{\theta\theta}}{\rho}$	0	$G \left\{ 2 \left(\frac{v_r}{r} \right) \right\} + 2 \left\{ \tau_{\theta\theta} \left(\frac{v_r}{r} \right) \right\} - \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{G} (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} + \tau_{zz}) \right\} \tau_{\theta\theta} / \lambda$
Constitutiva em zz	$\frac{\tau_{zz}}{\rho}$	0	$G \left\{ 2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\} + 2 \left\{ \tau_{rz} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\} - \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{G} (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} + \tau_{zz}) \right\} \tau_{zz} / \lambda$
Constitutiva em $rz = zr$	$\frac{\tau_{rz}}{\rho}$	0	$G \left\{ \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right\} + \left\{ \tau_{zz} \frac{\partial v_r}{\partial z} + \tau_{rr} \frac{\partial v_z}{\partial r} - \tau_{rz} \left(\frac{v_r}{r} \right) \right\} - \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{G} (\tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} + \tau_{zz}) \right\} \tau_{rz} / \lambda$

Tabela 2 – Malhas numéricas.

Malha	Elementos em y	Elementos em z	Descrição
M1	20	50	Malha uniforme.
M2	40	50	Malha uniforme.
M3	60	50	Malha uniforme.
M4	60	40	Malha refinada em uma região que vai desde $-2D$ até $2D$.
M5	60	60	Malha refinada em uma região que vai desde $-2D$ até $2D$.
Malha com dois níveis de refinamento:			
M6	60	80	1° - Refinamento em uma região que vai desde $-2D$ até $2D$.
			2° - Refinamento ainda maior em uma região que vai desde $-1D$ até $1D$.
Malha com dois níveis de refinamento:			
M7	60	110	1° - Refinamento em uma região que vai desde $-2D$ até $2D$.
			2° - Refinamento ainda maior em uma região que vai desde $-1D$ até $1D$.

Conforme pode ser observado na Figura 3, os perfis de velocidade axial convergem para as malhas M6 e M7. Assim, como a malha M7 não apresenta um tempo computacional muito maior do que M6, optou-se por utilizar a malha M7 nas simulações.

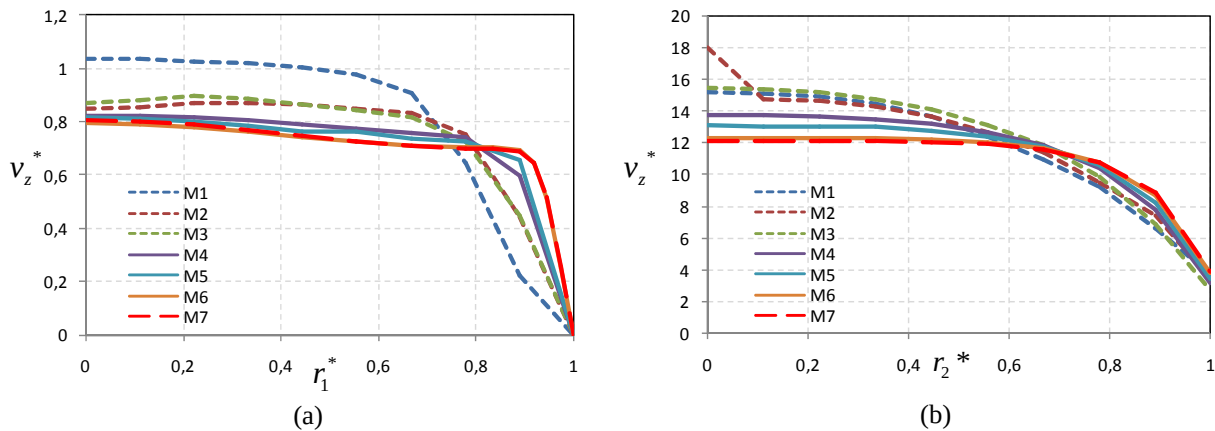


Figura 3 - Perfis de velocidade axial adimensional nas posições: a) $z^* = -0,5$, b) $z^* = 0,5$
($Re = 100$, $De = 1$, $\varepsilon = 0,25$).

Na sequência foi simulado o escoamento do fluido de Phan-Thien e Tanner (PTT) nas condições de: $De = 1$, $Re = 100$ (escoamento laminar) e a razão entre diâmetros igual a quatro ($\beta = 4$).

A variação da pressão ao longo do eixo central, para uma região próxima a contração, pode ser observada na Figura 4. Uma queda brusca na pressão pode ser observada na região da contração ($z^* = 0$), a qual é ocasionada pela passagem do escoamento de uma seção para outra com diâmetro quatro vezes menor. Como consequência desta redução de seção e da queda abrupta na pressão, o fluido acelera, passando a escoar com velocidade média maior, como pode ser observado na Figura 5. Para o escoamento em questão, nota-se, através da análise da Figura 5, que para posições menores do que $z = -1D$ o escoamento não sofre influência da contração, mantendo o mesmo perfil desenvolvido aplicado na entrada do tubo.

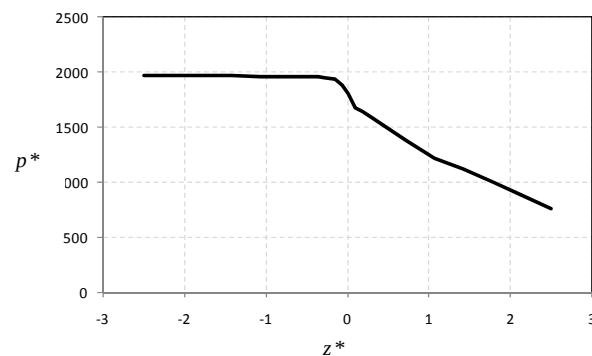


Figura 4 – Pressão adimensional ao longo da linha de centro ($De = 1$, $Re = 100$ e $\beta = 4$).

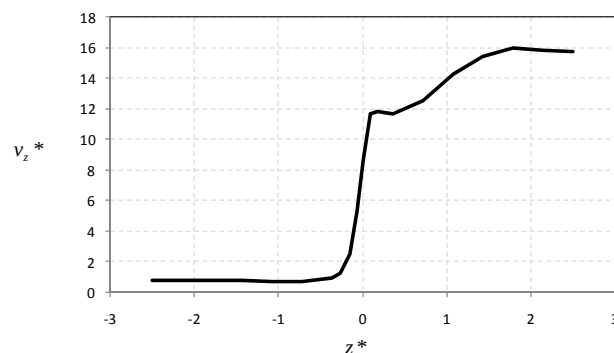


Figura 5 – Velocidade axial adimensional ao longo da linha de centro ($De = 1$, $Re = 100$ e $\beta = 4$).

A Figura 6 ilustra o campo de tensão cisalhante. Pode-se notar que τ_{rz} apresenta valores maiores no tubo de menor diâmetro comparado ao de maior diâmetro. O valor de $\tau_{rz} = -0,006418$, mostrado na Figura 6 abaixo da indicação “Probe value” se refere ao valor de τ_{rz} na parede, em uma região que o escoamento se encontra desenvolvido e ainda não foi afetado pela contração. Na Figura 7, Figura 8 e Figura 9 é possível observar os campos de tensões normais $\theta\theta$, rr e zz , respectivamente, resultantes do escoamento viscoelástico.

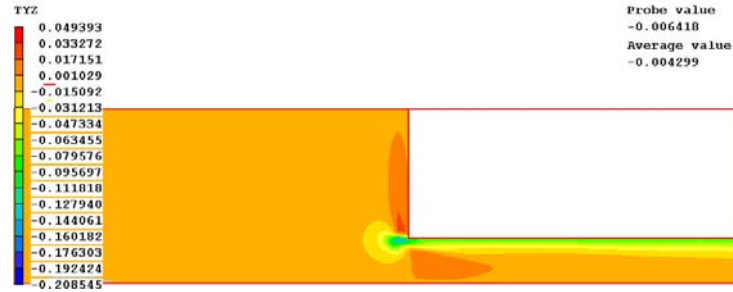


Figura 6 – Campo de tensão cisalhante, τ_{rz} ($De = 1$, $Re = 100$ e $\beta = 4$).

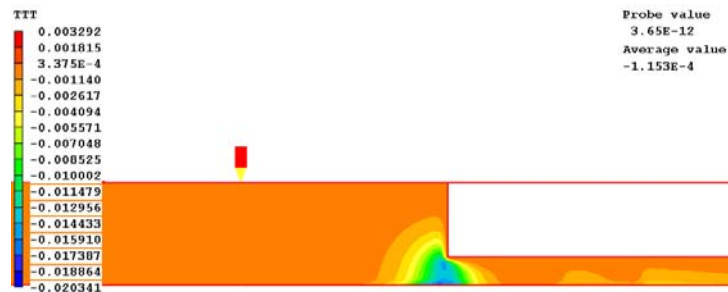


Figura 7 – Campo de tensão normal $\theta\theta$, $\tau_{\theta\theta}$ ($De = 1$, $Re = 100$ e $\beta = 4$).

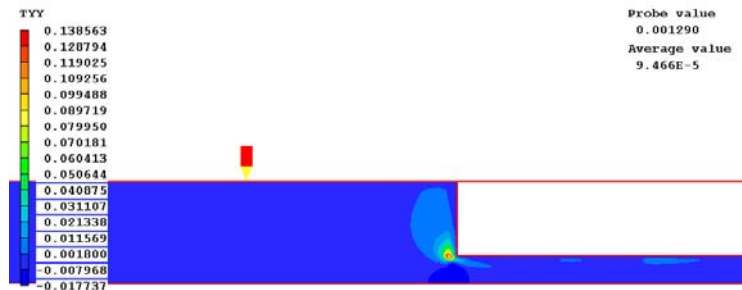


Figura 8 – Campo de tensão normal rr , τ_{rr} ($De = 1$, $Re = 100$ e $\beta = 4$).

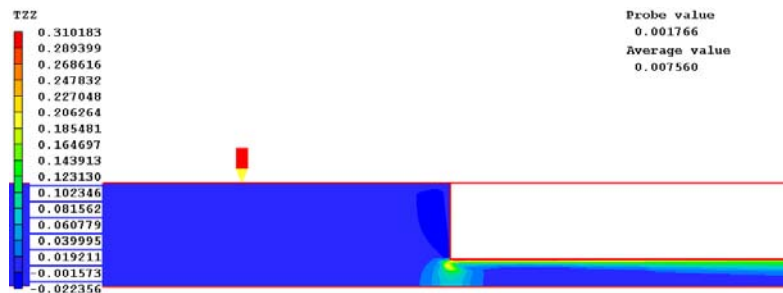


Figura 9 – Campo de tensão normal zz , τ_{zz} ($De = 1$, $Re = 100$ e $\beta = 4$).

Considerando ainda o escoamento através de uma contração com razão de diâmetros igual a 4 ($\beta = 4$), buscou-se observar a geração de vórtices na situação de baixos números de Reynolds ($Re = 0$ e $Re = 10$) e de Deborah ($De = 0$), Figura 10. Nota-se que com o aumento do Re há uma redução no tamanho de vórtice gerado.

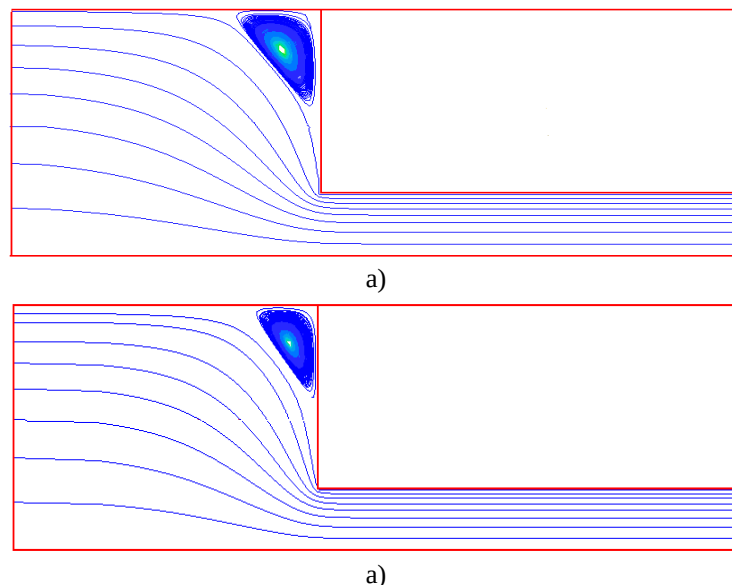


Figura 10 – Linhas de corrente. a) $Re = 0$. b) $Re = 10$.

O padrão de linhas de corrente para $Re = 0$, quando comparado com Alves (2004), apresenta excelente concordância.

Os resultados mostram de forma sucinta, a capacidade do programa PHOENICS CFD, através das equações constitutivas implementadas, de resolver problemas onde a elasticidade do fluido é importante.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma estrutura para realizar o estudo do escoamento de um fluido não-newtoniano viscoelástico através de uma contração brusca. Para a aplicação da metodologia numérica foi utilizado o programa comercial PHOENICS CFD, baseado no Método de Volumes Finitos. O programa foi escolhido por permitir que o usuário implemente suas próprias rotinas, como as equações do modelo PTT, no código padrão utilizado na solução do problema.

Durante a realização das simulações, observou-se que é necessário utilizar um controle de convergência apurado quando se tem o escoamento através de uma contração brusca. Este controle é agravado se for utilizado o modelo de fluido viscoelástico. Também, o efeito da malha numérica é de grande importância, sendo necessário utilizar malhas muito refinadas, fato este que aumenta o tempo de simulação e também dificulta a convergência da solução.

A estrutura desenvolvida é válida e permite realizar a simulação do escoamento de um fluido não-newtoniano viscoelástico através de uma contração brusca. Na atual implementação, a utilização de um programa comercial, o PHOENICS CFD, permite flexibilidade na simulação de outras geometrias, não sendo necessária a construção de um novo código computacional. Além desta flexibilidade, é possível utilizar outros modelos de fluido viscoelásticos que apresentem equações constitutivas diferenciais.

6. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT (PRH10-UTFPR).

7. REFERÊNCIAS

ABOUBACAR, M.; MATALLAH, H. H. R.; TAMADDON, J. e WEBSTER, M.F. **Numerical prediction of extensional flows in contraction geometries: hybrid finite volume/element method.** . J. Non-Newtonian Fluid Mech, vol. 104, pp. 125–164, 2002.

- ALVES, M. A.; OLIVEIRA, P. J. e PINHO, F. T. **Soluções de referência para escoamento de fluidos muito elásticos através de contrações**. Métodos Numéricos en Ingeniería V. Espanha, 2002.
- ALVES, M. A.; OLIVEIRA, P. J. and PINHO, F. T. **Benchmark solutions for the flow of Oldroyd-B and PTT fluids in planar contraction**. J. Non-Newtonian Fluid Mech, vol. 110, pp. 45–75, 2003.
- ALVES, M. A.; OLIVEIRA, P. J. and PINHO, F. T. **Viscoelastic flow in axisymmetric contraction: the effect of contraction ratio**. Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, CIT04-0341, Brasil, 2004.
- AZAIEZ, R. G.; AIT-KADI, A. **Numerical simulation of viscoelastic flows through a planar contraction**. J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol. 62, 253-277, 1996.
- BIRD, R.B., ARMSTRONG, R.C. e HASSAGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids - Fluid Dynamics**. EUA: Ed. John Wiley e Sons, vol.1, 1987.
- BRONDANI, W.M., CORADIN, H.T., FRANCO, A.T. e MORALES, R.E.M. Numerical Simulation of Laminar Flow of a Viscoelastic Fluid through Concentric Annular. Anais do 4º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Recife, 2006.
- DURST, F. and LOY, T. **Investigation of laminar flow in a pipe with a sudden contraction of cross sectional area**. Computers & Fluids, vol. 13, pp.15-36, 1985.
- MACHADO, J.C.V. **Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria de Petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2002.
- MOMPEAN, G. **On predicting abrupt contraction flows with differential and algebraic viscoelastic models**. Computers & Fluids, vol 31, pp. 935–956, 2002.
- PATANKAR, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Hemisphere Publishing Corp, 1980.
- PHAN-THIEN, N. e TANNER, R.I. **A New Constitutive Equation Derived from Network Theory**. J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol.2, pp. 353-365, 1977.
- PHILLIPS, T. N. and WILLIAMS, A. J. **Comparison of creeping and inertial flow of an Oldroyd B fluid through planar and axisymmetric contractions**. J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol. 108, pp. 25-47. 2002.
- PINHO, F.T. e OLIVEIRA, P.J. Axial Annular Flow of a Nonlinear Viscoelastic Fluid – An Analytical Solution. J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol.93, pp. 325-337, 2000.
- QUINZANI, L.; ARMSTRONG, R.C., and BROWN, R.A. **Use of coupled birefringence and LDV studies of flow through a planar contraction to test constitutive equations for concentrated polymer solutions**. J. Rheol., vol.39, pp. 1201–1228, 1995.
- SCHLUMBERGER. **Diagram of tool joints**. Disponível em: < <http://www.glossary.oilfield.slb.com/DisplayImage.cfm?ID=361> >. Acesso em: 26 de outubro de 2006.
- TANNER, R.I. **Engineering Rheology**. EUA: Oxford University Press, 2 ed, 2000.

NUMERICAL SIMULATION OF A VISCOELASTIC DRILLING FLUID FLOW THROUGH AN ABRUPT CONTRACTION

The non-Newtonian flow through an abrupt contraction is very common in many industrial applications. For example, the polymer processing industry and the petroleum industry. In this last one, during the drilling process of wells to product petroleum and gas, the drilling fluid flows through spaces with abrupt contractions in the transversal section. The rheological behavior of these fluids, as a function of the desired properties, is described by non-Newtonian fluids models. Among the non-Newtonian fluids models, the viscoelastic model can present a more detailed representation of the drilling fluids characteristics. This work has for objective to elaborate a numerical methodology to evaluate the non-Newtonian viscoelastic flow, fluid of Phan-Thien and Tanner (PTT), through an axisymmetric abrupt contraction. The commercial software, PHOENICS CFD is used for the solution of the problem, which it is structured in the Finite Volumes Method. The PTT model implementation at the PHOENICS CFD was done. With this new methodology, to characterize and to determine the hydrodynamic behavior, as the first and second normal stress differences and the extensional viscosity, during the passage of the fluid through an abrupt contraction, is possible.

Drilling Fluid, Abrupt Contraction, Viscoelastic Flow, PTT Model, Numerical Simulation

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.