

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE FUNDAMENTAL DO COMPORTAMENTO EXTENSIONAL- CISALHANTE DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UM PONTO DE ESTAGNAÇÃO APLICADO A MEIOS POROSOS

COM-2016-0275

COM-2016-0275

Resumo: Nos escoamentos em meios porosos, como os que ocorrem em rochas reservatório, existem incontáveis pontos de estagnação. Conhecer o comportamento do fluido nessas regiões é de grande interesse para prever os mecanismos de resistência ao escoamento. Assim o objetivo deste trabalho foi investigar as taxas de deformação extensional e cisalhante e a razão entre elas ao longo das linhas de corrente de um escoamento simples próximo a um ponto de estagnação contra uma parede plana sob um número de Reynolds muito menor que um. A análise do escoamento foi feita ao longo de diferentes linhas de correntes através do método dos elementos finitos utilizando o software Fluent. Observou-se que o comportamento extensional do escoamento tende a zero quando as suas linhas de corrente ficam aproximadamente paralelas à parede, e é mais significativo naquelas mais próximas à linha de simetria do escoamento. O comportamento cisalhante aumenta ao longo das linhas de corrente mais próximas ao ponto de estagnação e diminui ao longo daquelas mais distantes. O estudo mostra que o escoamento extensional tende a ser predominante (cerca de três vezes maior que o em cisalhamento) antes do ponto de estagnação para as linhas de corrente localizadas mais ao centro. Já o escoamento em cisalhamento é mais relevante para as linhas de corrente mais afastadas do ponto de estagnação e a razão entre as taxas extensional e cisalhante é praticamente constante para este caso. Assim, esse é o primeiro passo para a compreensão da mecânica e da resistência no escoamento de um fluido complexo em uma geometria complexa e como ele se divide.

Palavras-chave: Escoamento Extensional, Escoamento em Cisalhamento, Meios Porosos, Ponto de Estagnação.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento em meios porosos, como os que ocorrem em rochas reservatório, tem sido alvo de grandes estudos visando a melhor compreensão desse fenômeno. A maioria dessas pesquisas são motivadas pela indústria do petróleo, que tem buscado maiores índices de recuperação dos poços. Para isso tem sido desenvolvido novas técnicas como, combustão *in situ*, injeção de fluidos aquecidos, adição de soluções poliméricas. Todos esses processos envolvem fenômenos complexos que necessitam de um melhor entendimento no que tange a mecânica dos fluidos.

A existência de pontos de estagnação no escoamento em meios porosos resulta no surgimento de efeitos não uniformes. Uma maneira de interpretar esses efeitos é considerar que o fluido escoar através de uma seção de área menor que a área total do meio, gerando caminhos preferenciais para o escoamento. O comportamento do escoamento nesses pontos tende a dificultar o processo de recuperação de petróleo. Assim, uma das técnicas utilizadas para melhorar a eficiência de deslocamento do óleo retido no espaço poroso de reservatório é a adição de polímeros de elevado peso molecular na água usada para inundação de reservatório de petróleo. Isso acontece devido ao aumento da viscosidade aparente da fase aquosa gerado pela presença de moléculas de polímeros dissolvidos, fazendo o deslocamento da fase aquosa e da fase orgânica terem um valor próximo. Isso implica que ambas as fases terão mobilidade similar e portanto a formação de uma frente de deslocamento estável é mais fácil (Rodríguez *et al.*, 1993).

Escoamentos de soluções de polímeros de elevado peso molecular onde os componentes rotacionais do gradiente de velocidade predominam sobre os componentes extensionais são geralmente pseudoplásticos, ou seja, a viscosidade de cisalhamento diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Em escoamentos extensionais, o contrário ocorre: um

aumento na taxa de extensão pode levar a um aumento dramático da viscosidade aparente (Saringer 1980; Rodriguez, Romero e Sargenti 1993).

Polímeros com elevado peso molecular podem apresentar esse comportamento não-Newtoniano conforme já estabelecido empiricamente. Dois exemplos desse comportamento são o dramático afinamento do escoamento além de uma taxa de escoamento crítica em um meio poroso e a redução do arrasto em um escoamento turbulento. Esses polímeros tem uma propriedade física fundamental que é sua extensibilidade. Em escoamentos extensionais pode-se esperar uma transição de um estado “enrolado” ou “bobinado” das moléculas (que será identificado nesse texto como “contraído”) para um estado esticado, o que pode modificar o comportamento do escoamento de forma significativa (Carrington, 1997). O aumento da resistência ao escoamento de uma solução de polímero diluída observado em um meio poroso pode ser resultante do aumento da viscosidade extensional da solução. Isso acontece devido extensão das moléculas de polímeros no campo de escoamento que ocorre em um meio poroso que é predominantemente extensional (James, 1975).

Um comportamento não-newtoniano de afinamento é um efeito memorável que uma quantidade diminuta de polímeros de elevado peso molecular pode ter em uma solução de polímeros em um meio poroso. Se o escoamento de um polímero de elevado peso molecular é forte o suficiente para esticar as moléculas de polímeros, uma quantidade pequena de polímeros terá um forte efeito sobre o escoamento, pois o aumento da viscosidade extensional levará ao aumento da resistência hidrodinâmica do escoamento (Dyakonova et al., 1996).

O fenômeno de mudança de um estado contraído para um estado esticado em soluções diluídas em escoamento extensionais pode apresentar um ponto crítico, com uma repentina transição do estado contraído para o estado quase completamente esticado com o aumento da taxa de deformação. As interações hidrodinâmicas entre monômeros diminui à medida que a molécula é esticada. Em um polímero contraído, apenas a sua parte externa está sujeita ao escoamento, por outro lado em um polímero esticado todos os segmentos ficam expostos ao escoamento (De Gennes, 1974).

Para uma molécula de polímeros alcançar um grande alongamento em um escoamento extensional, deve haver uma taxa de deformação e tempo suficientes para o elemento fluido atinja um alongamento considerável. Um escoamento que contém um ponto de estagnação mante parte dos elementos fluidos presos por um longo período de tempo dentro de um escoamento extensional, onde os elementos fluidos são submetidos a altas deformações necessárias para que as bobinas dos polímeros sejam esticadas. Outros pesquisadores como (Cathey; Fuller, 1990) analisaram a transição do estado contraído para o estado esticado medindo a intensidade ótica em relação a taxa de deformação em um escoamento extensional bem definido. Estes resultados estão de acordo com a hipótese apresentada por Gennes a respeito de um alongamento crítico (Carrington; Odell, 1996).

O escoamento estudado neste trabalho é um escoamento permanente e laminar com número de Reynolds (Re) muito menor que um de um fluido newtoniano, pois este estudo é o primeiro passa na compreensão de como as taxas de deformação extensional e de cisalhamento se comportam nas proximidades de um ponto de estagnação. O escoamento flui em direção a uma parede plana com a condição de não deslizamento. Quando o fluido na linha de simetria do escoamento alcança a parede ele se divide e flui em direções opostas. Devido a condição de não deslizamento, todos os elementos fluidos em contato com a parede têm a velocidade igual à zero; no entanto, se a condição de não deslizamento fosse negligenciada o único lugar onde a velocidade seria igual à zero seria no ponto onde o fluido da linha de simetria se divide. Esse ponto também é conhecido como ponto de estagnação (Batchelor, 2000).

As taxas extensional e de cisalhamento são gradientes de velocidade. Em outras palavras, elas são derivadas da velocidade pelo espaço.

Começando com a definição da taxa extensional para um escoamento permanente planar, temos que:

$$\dot{\epsilon} = \frac{du}{dx} \text{ ou } \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Onde x e y são os eixos de coordenadas do plano de escoamento localizado no ponto de escoamento, u e v são as componentes da velocidade nas direções x e y respectivamente e $\dot{\epsilon}$ é a taxa extensional. A taxa extensional ou taxa de extensão indica quanto um elemento fluido se alonga em uma direção específica. Além disso, para um escoamento de um fluido incompressível a taxa de variação do volume do elemento fluido é zero, logo du/dx e dv/dy tem a mesma magnitude, mas um é positivo e o outro é negativo. Isto quer dizer que se o elemento fluido se alongar na direção x ele também se contrairá na direção y com a mesma razão. Em um escoamento puramente extensional, a distância entre dois elementos fluidos varia a uma taxa exponencial. Segundo Bird (1987), a equação que descreve a variação da distância entre dois elementos fluidos varia em função do tempo da seguinte maneira.

$$l = l_0 e^{\dot{\epsilon} \Delta t} \quad (2)$$

Onde l_0 é a distância inicial entre os elementos fluidos e l é a distância entre eles após um período de tempo Δt .

O movimento de um escoamento irrotacional solenoidal próximo a um ponto de estagnação é um movimento de extensional puro sem mudança no volume, e tem uma distribuição de velocidade linear dada por (BATCHELOR, 2000):

$$u = ky \quad (3)$$

$$v = -kx \quad (4)$$

Ainda segundo Batchelor (2000), o escoamento também pode ser descrito em função das suas linhas de corrente (ψ)

próximas a um ponto de estagnação, como na equação 5.

$$\psi = kxy \quad (5)$$

Onde k é uma constante, que no caso de um ponto de estagnação em uma corpo fixo em um escoamento, deve ser proporcional a velocidade do corpo em razão proporcional e também é dependente do formato do corpo.

Já a taxa de cisalhamento de um escoamento planar permanente pode ser definida como:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

Onde $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento. Em um escoamento planar ela é composta por dois componentes, um para cada eixo de coordenada. Em um escoamento cisalhante um elemento fluido desliza sobre outro elemento fluido, e isso faz com que os ângulos das arestas que definem as fronteiras de ambos elementos variar. Contudo, o volume de ambos os elementos não varia e eles apenas se alongam.

Trouton, em 1906, usou o termo “coeficiente de tração viscosa” em seu estudo onde ele teve a intenção de obter a viscosidade extensional de um fluido newtoniano incompressível. Trouton obteve uma relação entre viscosidade de cisalhamento e a o coeficiente de tração viscosa, ou viscosidade extensional. Segundo Trouton, a viscosidade extensional corresponde a três vezes a viscosidade de cisalhamento em um escoamento unidimensional para fluidos newtonianos. (Petrie, 2006) .

$$\eta_T = 3\eta_0 \quad (7)$$

Onde η_T é a viscosidade de Trouton ou viscosidade extensional e η_0 é a viscosidade de cisalhamento.

Uma extensão planar é algumas vezes chamada de “cisalhamento puro”, que é qualitativamente diferente do cisalhamento simples, pois o cisalhamento puro é irrotacional em relação aos eixos fixos de referência. Em um escoamento planar as taxas de deformação na direção dos eixos de referência podem ser estabelecidas como, $D_{11} = \dot{\epsilon}$ na direção x , $D_{22} = -\dot{\epsilon}$ na direção y e $D_{33} = 0$ na direção z . A viscosidade extensional planar que se refere a tensão de tração requerida para alongar o material na direção x é dada por:

$$\eta_p = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\dot{\epsilon}} \quad (8)$$

Onde σ_{11} e σ_{22} são tensões de tração nas direções x e y respectivamente e η_p é a viscosidade extensional para um escoamento planar.

A relação teórica entre a viscosidade extensional planar η_p e a viscosidade de cisalhamento η_0 é igual a quatro.

$$\eta_p = 4\eta_0 \quad (9)$$

Para fluidos newtonianos, a relação de 3 de Trouton é válida e a viscosidade extensional não é função da deformação, já para fluidos não newtonianos a viscosidade extensional poder ser função da deformação e da taxa de deformação (James; Yogachandran, 2006).

O principal objetivo deste trabalho foi de investigar as taxas de deformação extensional e cisalhante e sua razão ao longo das linhas de corrente. A análise do escoamento foi feita pelo método dos elementos finitos utilizando um software para realizar as simulações numéricas para a solução do escoamento. Este é um estudo fundamental de um escoamento de um fluido simples em uma geométrica simples que é o primeiro passo para a compreensão da mecânica e da resistência de um escoamento de um fluido complexo (polímeros) em uma geometria complexa e como ele se divide.

2. METODOLOGIA

2.1. Simulação Computacional

A análise do escoamento foi feita pelo método dos elementos finitos utilizando um software para realizar as simulações numéricas para a solução do escoamento. O software utilizado é um analisador de sistemas do software Workbench chamado de Fluent. A versão 15.0 do Workbench foi utilizada netas simulações. A técnica utilizada para implementar a simulação computacional e definir os parâmetros do escoamento consiste em quatro passos principais que são: desenhar a geometria, definir os parâmetros da malha, definir o fluido e as condições de fronteira e escolher os parâmetros de solução. Esta técnica de implementação foi utilizada previamente para resolver um escoamento afunilado ou *tapered* e um escoamento de lubrificação hidrodinâmica. As soluções numéricas obtidas para estes escoamentos foram comparadas com um método de resolução analítico, e o erro entre esses dois métodos foi aceitável e não variou muito na precisão dos resultados. A origem dos eixos de referência foi definida no ponto médio da região de entrada, como mostrado na Figura 1, para facilitar a criação das linhas de corrente e a obtenção dos dados, e não no ponto de estagnação.

A geometria foi o primeiro passo definido no Fluent para se obter o escoamento desejado. O escoamento estudado

é um escoamento planar no plano xy, o comprimento da parede (C) é igual a 30,0 mm, a altura (A) é igual a 20,0 mm e a largura da entrada (L_u) é igual a 5,0 mm, como pode ser visto na Figura 1.

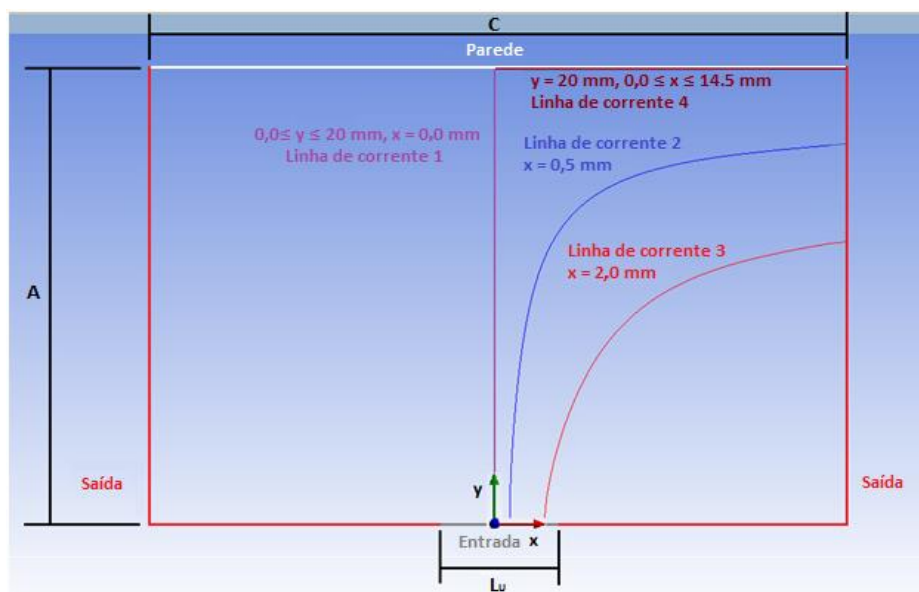


Figura 1. O esboço do campo do escoamento o qual foi calculado e os nomes de cada linha usada para definir as fronteiras do escoamento. A figura também mostra as linhas de corrente, onde as propriedades do escoamento foram analisadas, e o nome de cada linha de corrente.

O segundo passo foi definir o formato e o tamanho da malha e nomear as fronteiras. Sendo assim, o formato da malha foi definido com o formato de quadriláteros, o tamanho máximo da face da malha escolhido foi igual a 1×10^{-4} m, e o tamanho mínimo da face da malha escolhido foi igual a 5×10^{-5} m. Estes valores foram escolhidos a fim de que o erro obtido fosse pequeno e o tempo de processamento dos dados não fosse tão extenso. Por último, as seis linhas desenhadas para definir as fronteiras e a geometria do escoamento foram nomeadas. Elas foram nomeadas como Parede, Saída e Entrada, como referido na Figura 1.

Depois, o fluido utilizado na simulação e a condição de cada fronteira foram definidos para se obter o escoamento proposto. Com o objetivo de se obter um escoamento com número de Reynolds muito menor do que um, o fluido escolhido foi um óleo altamente viscoso. A viscosidade (μ) e a densidade (ρ) deste óleo são 1.06 Pa.s e 889 kg/m³ respectivamente. Estes valores foram obtidos do software Fluent para uma temperatura de 288.16 K. Após isto, as condições de fronteira foram definidas. As três condições foram definidas como: velocidade na entrada com velocidade média igual a 0.0024 m/s, pressão nas saídas igual a zero Pascal, e parede estacionária com a condição de não deslizamento. As fronteiras e suas respectivas linhas são mostradas na Figura 1. O fluido e as condições de fronteira escolhidos fazem com que o número de Reynolds desse escoamento seja de aproximadamente 0,01, que é bem menor que um.

Por último, os parâmetros utilizados na solução do escoamento foram determinados com o máximo de 20.000 iterações ou um resíduo de 1×10^{-6} . Antes disso, a opção de Método Inicialização de Solução foi selecionada como Inicialização Híbrida. A Inicialização Híbrida é um método que resolve as equações de Laplace para determinar os campos de velocidade e pressão.

2.2. Coleta de Dados

Após definir os parâmetros do escoamento, implementar o programa e calcular a solução, o próximo passo foi a coleta de dados. Os dados foram obtidos nas linhas de corrente mostradas na Figura 1.

Para começar, a linha de corrente 1 é uma linha reta que começa em $x_1 = 0,0$ mm e $y_1 = 0,0$ mm e termina em $x_2 = 0,0$ e $y_2 = 20,0$ mm. Após a criação desta linha, as funções “Derivatives ou derivadas” $-\frac{du}{dx}$, $\frac{dv}{dx}$, e $\frac{du}{dy}$, foram selecionadas no menu “Plots”, e então os valores calculados para estas três variáveis ao longo da linha de corrente 1 foram escritos em três arquivos textos.

Depois, as linhas de corrente 2 e 3 foram criadas no menu “Pathlines” através da determinação de dois pontos, um para cada linha de corrente. A posição do primeiro ponto foi estabelecida nas coordenadas $x = 0,5$ mm e $y = 0,0$ mm e o segundo ponto nas coordenadas $x = 2,0$ mm e $y = 0,0$ mm. O primeiro e o segundo ponto correspondem à posição inicial das linhas de corrente 2 e 3 respectivamente. Logo após as funções “Derivatives ou derivadas” $-\frac{du}{dx}$, $\frac{dv}{dx}$, e $\frac{du}{dy}$, foram selecionadas no menu “Plots”, e três arquivos de texto foram escritos com os valores calculados para estas três variáveis ao longo das linhas de corrente 2 e 3.

Por último, a linha de corrente 4 é uma linha na parede, e ela foi criada utilizando os mesmos procedimentos utilizados

para criar a linha de corrente 1. Os pontos usados para definir a linha de corrente 4 foram $x_1 = 0,0$ mm, $y_1 = 20$ mm e $x_2 = 15$ mm e $y_2 = 20$ mm. Diferentemente das outras linhas de corrente, onde três funções de derivadas foram utilizadas, na linha de corrente 4 apenas duas funções de derivadas, $-\frac{dv}{dx}$, and $\frac{du}{dy}$, foram selecionadas para serem escritas nos arquivos de texto com seus valores ao longo da linha de corrente 4.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

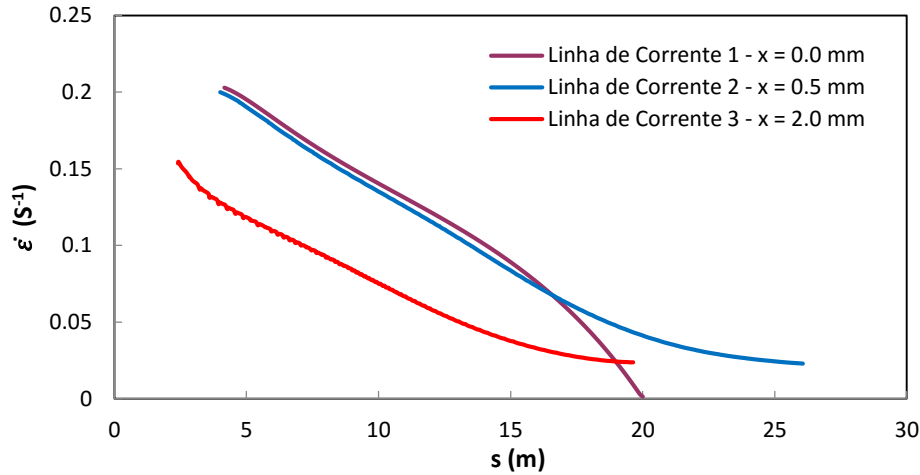


Figura 2. Taxa extensional calculada ao longo das linhas de corrente 1, 2 e 3.

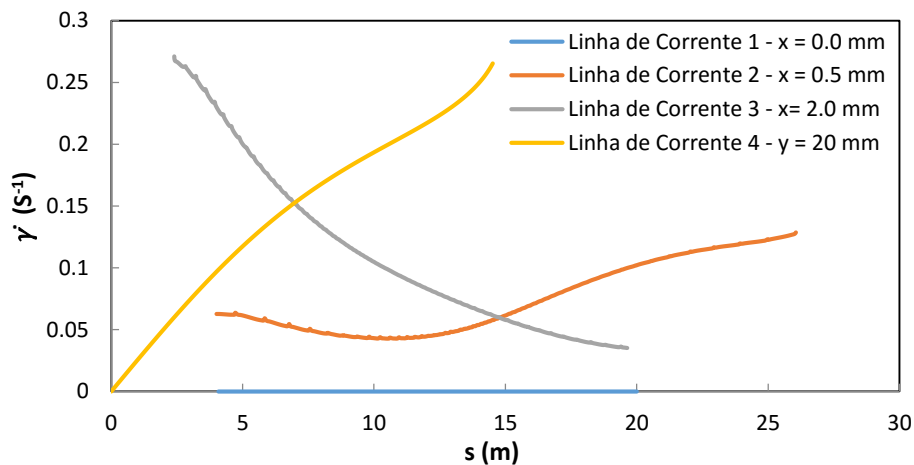


Figura 3. Taxa de Cisalhamento calculada ao longo das linhas de corrente 1, 2, 3 e 4.

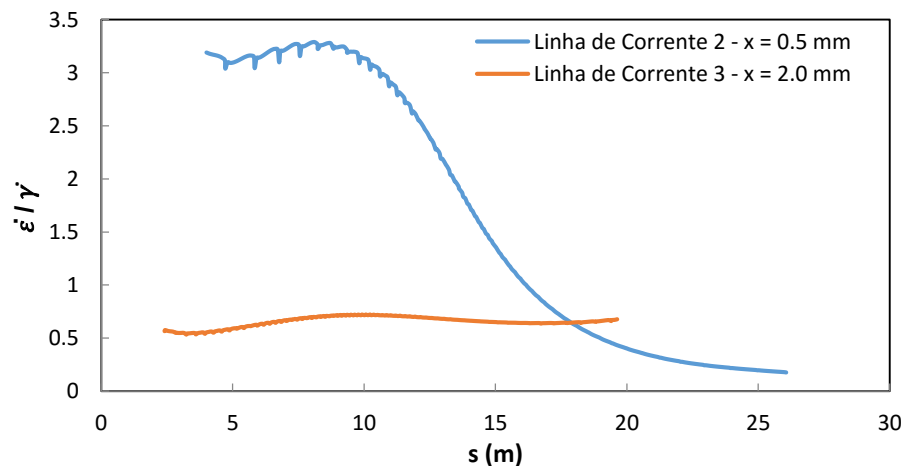


Figura 4. A razão entre as taxas extensional e de cisalhamento ao longo das linhas 2 e 3.

Através dos dados adquiridos as Figuras 2, 3 e 4 foram obtidas. Estas figuras mostram as taxas extensional, de cisalhamento e a razão entre essas duas taxas respectivamente.

Os comprimentos, s , expressos nos gráficos representam uma distância nas direções x ou y , mas sim o comprimento ao longo das linhas de corrente; em outras palavras, ou comprimento das linhas de corrente.

Embora a coordenada x varie de -15,0 a 15,0 mm na geometria desenhada, os dados plotados foram tomados para valores de x entre 0,0 e 14,05 mm. Isto porque, perto da fronteira de saída, o escoamento se corrige para poder se ajustar as condições da fronteira de saída. Consequentemente, os dados obtidos para valores de x entre 14,5 mm e 15,0 mm não representam o escoamento que se deseja analisar neste trabalho, logo considerar estes valores criaria um resultado incorreto. O escoamento próximo a região de entrada também não representa o escoamento extensional proposto. Isso se deve ao fato de a velocidade na entrada ser uniforme e nesta região o escoamento não está completamente desenvolvido, e os gráficos mostrariam o fluido se ajustando as condições de entrada e não o escoamento extensional. As regiões de entrada das linhas de corrente 1, 2 e 3 tem um comprimento de aproximadamente 4,01, 4,00 e 2,43 mm respectivamente.

3.1. Taxa Extensional

A taxa extensional foi plotada para as linhas de corrente 1, 2 e 3, como pode ser visto na Figura 2. Como a linha de corrente 4 está em contato com a parede e a condição de não deslizamento faz a velocidade ser igual a zero ao longo desta linha de corrente, du/dx é igual a zero ao longo desta linha, o que faz a plotagem desta linha de corrente ser trivial.

A taxa extensional foi calculada para as linhas de corrente 1, 2 e 3. A componente da velocidade u de um elemento fluido no início de qualquer linha de corrente é muito pequeno se comparado ao componente v da velocidade, mas com o avanço do escoamento as linhas de corrente mudam de direção e elas começam a ficar paralelas a parede. Como o escoamento é permanente, completamente desenvolvido e vai se tornando paralelo a parede, o componente da velocidade u tende a um valor constante e o componente da velocidade v tende a zero. Como resultado disso, primeiramente, du diminui e dx aumenta, logo du/dx diminui ao longo das linhas de corrente de maneira mais ou menos constante, e depois a medida que o escoamento vai se tornando paralelo a parede e se afastando do ponto de estagnação du/dx continua diminuindo mas muito mais lentamente, de maneira a tender a um valor constante e pequeno.

3.2. Taxa de Cisalhamento

A taxa de cisalhamento foi plotada no gráfico da Figura 3 para as linhas de corrente 1, 2, 3 e 4. O comportamento da taxa de cisalhamento depende da posição da linha de corrente; em outras palavras, a distância da linha de corrente em relação a parede determinará se a taxa de cisalhamento aumentará ou diminuirá ao longo da linha de corrente.

A taxa de cisalhamento foi plotada para as linhas de corrente 1, 2, 3 e 4. Ela é zero ao longo da linha de corrente 1, isto porque essa linha coincide com a linha de simetria do escoamento, logo dv/dx é zero. Além disso a componente da velocidade u é zero para qualquer valor de y ao longo dessa linha de corrente, então du/dy também é igual a zero. Para as outras linhas de corrente, que não a linha de corrente 1, a taxa de cisalhamento pode aumentar ao longo de algumas linhas de corrente ou diminuir ao longo de outras linhas de corrente. Quando o escoamento tende a ficar paralelo a parede, o componente da taxa de cisalhamento dv/dx tende a zero porque v tende a zero para qualquer valor de x . Relembrando o escoamento clássico em dutos, o componente du/dy da taxa de cisalhamento é maior para as linhas de corrente que estão mais próximas às paredes do duto; portanto, similarmente quando o escoamento vai ficando paralelo a parede, a taxa de cisalhamento aumenta de forma mais acentuada ao longo do comprimento das linhas de corrente mais próximas à parede, como pode ser visto para as linhas de corrente 4 e 2 na Figura 3. Isso acontece porque du/dy aumenta mais rapidamente do que dv/dx diminui para essas linhas de corrente. Um aspecto interessante da linha de corrente 2 é que a taxa de cisalhamento diminui levemente no início da linha de corrente e depois aumenta. De maneira diferente, a taxa de cisalhamento para as linhas de corrente mais afastadas da parede diminui porque du/dy tende a zero e dv/dx não aumenta suficientemente rápido para as linhas de corrente que passam mais afastadas do ponto de estagnação. Este fato pode ser visto para a linha de corrente 3 na Figura 3, que é a linha de corrente que passa mais longe do ponto de estagnação entre as linhas de corrente analisadas.

3.3. Razão entre as Taxas Extensional e de Cisalhamento

A Figura 4 mostra a razão entre as taxas extensional e de cisalhamento ao longo das linhas de corrente 2 e 3. A razão das taxas mostra o grau de importância de cada taxa para um determinado local do escoamento. Para a linha de corrente 3 a taxa de cisalhamento é sempre mais maior que a taxa extensional. De maneira diferente, a taxa extensional é maior que a taxa de cisalhamento para a linha 2, podendo ser a até três vezes maior, em mais da metade do comprimento analisado desta linha.

Pode ser visto na Figura 4 que a taxa extensional tem mais efeito que a taxa de cisalhamento no escoamento ao longo da linha de corrente 2 até uma distância de aproximadamente 16,0 mm da coordenada s dessa linha. A partir de s igual a 16,0 mm a componente da velocidade u começa a ter uma magnitude maior que a componente v . Após esta distância, a linha de corrente 2 se aproxima da parede e a taxa de cisalhamento aumenta enquanto a taxa extensional diminui. Agora analisando a linha de corrente 3, a taxa de cisalhamento é sempre maior que a taxa extensional, até mesmo no início da linha de corrente. Esta razão entre as taxas extensional e de cisalhamento mostra que nas proximidades anteriores ao ponto de estagnação a taxa extensional é mais significativa que a taxa de cisalhamento, e isto auxilia na formulação da descrição de como os elementos fluidos irão se mover um em relação ao outro nas proximidades do ponto de estagnação.

4. CONCLUSÃO

A análise das taxas extensional e de cisalhamento e a razão entre elas ao longo de algumas linhas de corrente de um escoamento nas proximidades de um ponto de estagnação mostrou que essas variáveis variam dependendo da localização da linha de corrente no escoamento. Foi observado que o escoamento extensional tende a ser predominante (cerca de três vezes maior que o em cisalhamento) antes do ponto de estagnação para as linhas de corrente localizadas mais ao centro. Já o escoamento em cisalhamento é mais relevante para as linhas de corrente mais afastadas do ponto de estagnação e a razão entre as taxas extensional e cisalhante é praticamente constante para este caso.

Portanto em um escoamento em um meio poroso, onde há regiões de estagnação e o número de Reynolds é muito menor que um, haverá uma região onde as forças extensionais serão significantes. Para um escoamento mais complexo, como o escoamento de um polímero de elevado peso molecular por exemplo, essas forças extensionais podem porventura serem grandes o suficiente para esticar o polímero e modificar o escoamento. Esta modificação no escoamento pode ser causada em grande parte pelo aumento da viscosidade extensional desses polímeros. Cabe agora investigar quantitativamente como escoamentos mais complexos podem ser influenciados por essas forças extensionais/cisalhantes.

5. REFERÊNCIAS

- Batchelor, G. K., 2000, "An Introduction to Fluid Dynamics", Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, pp. 105-106 e 285-286.
- Carrington, S. P., Tatham, S. P., Odell, J. A., 1997, "Macromolecular Dynamics In Extensional Flows : I . Birefringence and viscometry", Elsevier Science, vol 38, No. 16, pp. 4151–4164.
- Carrington, S. P., Odell, J. A., 1996, "How Do Polymers Stretch In Stagnation Point Extensional Flow-Fields?", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol 67, No 1-3, pp. 269–283.
- Cathey, A.; Fuller, G., 1990, "The optical and mechanical response of flexible polymer solutions to extensional flow", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 34, pp. 63–88.
- De Gennes, P. G., 1974, "Coil-stretch transition of dilute flexible polymers under ultrahigh velocity gradients", The Journal of Chemical Physics, Vol 60, No. 12, pp. 5030–5042.
- Dyakonova, N. E. et al., 1996, "Macromolecular strain in periodic models of porous media flows". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 67, No. 1-3, pp. 285–310.
- James, D. F., McLaren, D. R., 1974, "The laminar flow of dilute polymer solutions through porous media", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 70, pp. 733–752, 1975.
- James, D. F.; Yogachandran, N., 2006, "Filament-breaking length - A measure of elasticity in extension", Rheologica Acta, Vol. 46, No. 2, pp. 161–170.
- Petrie, C. J. S., 2006, "Extensional viscosity: A critical discussion". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 137, No. 1-3, pp. 15–23.
- Rodriguez, S.; Romero, C.; Sargenti, M. L., 1993, "Flow of polymer solutions through porous media". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 49, No. 1, pp. 63–85.
- James, D. F., Saringer, J. H., 1980, "Extensional flow of dilute polymer solutions", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 97, pp. 666–671.
- Bird R. B; Armstrong R. C., 1987, "Dynamics of Polymeric Liquids", Vol. 1, 2ª Edição New York. John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos, pp. 100-103
- Fox e McDonald's, 2011, "Introduction to Fluid Mechanics", 8ª edição, New York. John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos, pp. 190-197.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

FUNDAMENTAL ANALYSES OF THE SHEAR-EXTENSIONAL BEHAVIOR OF THE FLOW NEAR A STAGNATION POINT APPLIED TO A POROUS MEDIUM

COM-2016-0275

COM-2016-0275

Abstract: *There are countless stagnation points in porous medium flow; for instance, those that happen in the flows in a reservoir rock. The understanding of the fluid's behavior in these regions is a great deal when one is concerned about flow resistance. Therefore, the object of this study is to investigate the extensional e shear rates and their ration along the streamlines of a simple flow near a stagnation point at a rigid boundary at Reynolds number much less than one. The flow investigation was done along different streamlines and solved by a numerical solving method called Fluent that uses the infinite numerical method. It was observed that the extensional behavior of the flow tends to zero when the streamlines are becoming parallel to the wall, and it is greater for the lines nearer the flow symmetry line. Shear rate becomes greater along the streamlines nearer the stagnation point and it becomes smaller for the streamlines farther the stagnation point. It is shown that an extensional rate tends to be about three times greater than the shear rate in the flow region before the stagnation point for the streamlines more at the flow's center. On the other hand, the shear effects are more important for the streamlines farther the stagnation point, where it is approximately constant along those streamlines. That being said, this work is the first step to understand the flow mechanics and resistance of a more complex fluid in a more complex geometry and how it divides.*

Keywords: *Extensional Flow, Shear Flow, Porous Medium, Stagnation Point.*