

VICTOR CARREIRA PAULO DE BARROS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO PELO MÉTODO MOVING PARTICLE SEMI-IMPLICIT
(MPS)**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Cheng Liang Yee

**São Paulo
2011**

Dedicatória

Dedico esse trabalho a todos meus familiares, e em especial ao meu pai.

*"You can't always get what you want, but if
you try sometimes you just might find you get
what you need."*

(Sir Mick Jagger and Sir Keith Richards)

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha família pelo apoio e compreensão. Também agradeço a meus amigos pela ajuda acadêmica e psicológica.

Ao grupo MPS do TPN, sem sua ajuda esse trabalho não seria finalizado.

Resumo

A indústria petrolífera utiliza os chamados fluidos de perfuração durante a etapa de perfuração de um poço. Suas funções são bastante diversificadas incluindo equilíbrio do poço, lubrificação e resfriamento da broca e carregamento de cascalhos. Para que eles possuam as propriedades necessárias diversos materiais são utilizados em simultâneo, formando assim uma mistura fluída com um comportamento não newtoniano, o que usualmente dificulta seu estudo. Atualmente está sendo implementado o comportamento não newtoniano para fluidos pelo método MPS (*Moving Particle Semi-Implicit*) no TPN (*Tanque de Provas Numérico*), que é um laboratório multidisciplinar onde são realizados ensaios virtuais que simulam sistemas de extração de petróleo em alto mar.

Esse trabalho valida a utilização do MPS para fluidos não newtonianos utilizando ensaios do tipo rompimento de barreira com o fluido não newtoniano Carbopol 940. Os resultados obtidos mostram o potencial do simulador desenvolvido, que será para estudar o comportamento dos fluidos de perfuração em algumas condições que eles estão sujeitos, focando nas variações do diâmetro dos tubos que percorrem, ou seja, expansão e contração brusca. Os perfis de velocidade e a formação dos vórtices são mostrados para esses dois casos e comparados qualitativamente com a literatura, indicando boa aderência do código para a simulação de fluidos de perfuração.

Palavras-chave: fluidos não newtonianos, MPS, simulação numérica, fluidos de perfuração, escoamento de fluidos.

Abstract

The petroleum industry uses the so-called drilling fluids during the well drilling. The functions of the drilling fluids are quite diverse, that include well balance and cleaning and the lubrication and cooling of the bit. In order to provide the required properties, different materials are simultaneously used, forming a non-Newtonian mixture, which is quite complex to be studied analytically. The non-Newtonian version of a simulator based on MPS (*Moving Particle Semi-Implicit*) method is currently being implemented in the TPN (*Tanque de Provas Numérico*), which is a multidisciplinary laboratory where virtual tests are conducted to simulate the dynamic behaviors of the off-shore production systems.

This work validates the use of MPS for non-Newtonian fluids using the Dam-Break test with the non-Newtonian fluid Carbopol 940. The results show the potential of the simulator, which is used to study the behavior of drilling fluids in some conditions they are subject, focusing on variations in the diameter of the pipes that they run, such as the sudden expansion and sudden contraction. The velocity profiles and the formation of vortices are shown for these two cases and compared qualitatively with the literature, indicating good adhesion of the code for the simulation of drilling fluids.

Keywords: Non-Newtonian fluids, MPS, numerical simulation, drilling fluids, fluid flow.

Lista de Ilustrações

Figura 1-1 - Ciclo de um fluido de perfuração [Fonte: Schlumberger Excellence in Educational Development, 2011].	11
Figura 3-1 - Representação esquemática de partículas delimitando uma região de influência (de raio re) de uma partícula qualquer.	14
Figura 5-1 - Modelo reológico do Carbopol 940.	18
Figura 5-2 - Geometria do caso rompimento de barreira.	18
Figura 5-3 – Convergência dos resultados devido a resolução.	19
Figura 5-4 - Rompimento de barreira altura de 8 cm.	20
Figura 5-5 - Rompimento de barreira altura de 10 cm.	20
Figura 5-6 - Rompimento de barreira altura de 12 cm.	21
Figura 6-1 - Faixas médias para viscosidade aparente e tensão de escoamento segundo o modelo reológico de Bingham (Petrobras, 2002).	22
Figura 6-2 - Modelo reológico das lamas escolhidas.	23
Figura 6-3 - Geometria da expansão brusca.	24
Figura 6-4 - Geometria da contração brusca.	25
Figura 7-1 - Distribuição de pressões e a magnitude da velocidade no rompimento de barreira para a altura de 10 cm com as Lamas e o Carbopol.	26
Figura 7-2 - Frentes de onda para as lamas A, B, C, D, E e para o Carbopol 940.	26
Figura 7-3 - Velocidade na direção x do escoamento de um fluido newtoniano com $Re = 100$ (Kurokawa, 2010).	27
Figura 7-4 - Velocidade na direção x do escoamento de um fluido newtoniano com $Re = 800$ (Kurokawa, 2010).	27
Figura 7-5 - Movimentação das partículas durante o escoamento da Lama A com $v = 1 \text{ m/s}$.	28
Figura 7-6 - Campo de velocidade na direção x, Lama A e $v = 1,0 \text{ m/s}$.	28
Figura 7-7 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes velocidades de injeção.	28
Figura 7-8 - Variação da velocidade após a expansão em função do tempo para diferentes velocidades de injeção.	29
Figura 7-9 - (a) Previsão das linhas de fluxo (b) Linhas de fluxo observadas experimentalmente, ambos para fluido newtoniano em uma expansão planar de razão 4:1 (adaptado de Mitsoulis & Argyropaidas, 2009).	29
Figura 7-10 - (a) Previsão das linhas de fluxo (b) Linhas de fluxo observadas experimentalmente, ambos para fluido não newtoniano em uma expansão planar de razão 4:1 (adaptado de Mitsouli & Argyropaidass, 2009).	30
Figura 7-11 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes lamas para $v = 1,0 \text{ m/s}$.	30
Figura 7-12 - Linhas de corrente para a contração brusca (adaptado de Coradin et al., 2007).	31
Figura 7-13 - (a) Previsão das linhas de fluxo (b) Linhas de fluxo observadas experimentalmente, ambos para fluido não newtoniano em uma contração planar de razão 4:1 (adaptado de Mitsoulis & Argyropaidas, 2009).	31
Figura 7-14 - Linhas de fluxo no caso contração brusca para a Lama A e $v = 1 \text{ m/s}$.	32
Figura 7-15 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes velocidades de injeção da Lama A.	32
Figura 7-16 - Variação da velocidade na restrição durante o tempo para diferentes velocidades de injeção.	33
Figura 7-17 - Variação da vepressão na restrição durante o tempo para diferentes velocidades de injeção.	33
Figura 7-18 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes relações entre os diâmetros com a Lama A e $v = 1 \text{ m/s}$.	33
Figura 7-19 - Influência da relação dos diâmetros na velocidade no centro da restrição.	34
Figura 7-20 - Influência da relação dos diâmetros na pressão no centro da restrição.	34
Figura 7-21 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes Lamas com $v = 0,5 \text{ m/s}$.	34

Lista de Tabelas

Tabela 5-1 - Parâmetros reológicos do Carbopol 940 pelo modelo Herschel-Bulkley (Fonte: Leite, 2009).	18
Tabela 5-2 - Parâmetros reológicos do Carbopol 940 pelo modelo de Bingham.	18
Tabela 5-3 - Quantidade de partículas para o rompimento de barreira.	19
Tabela 6-1 - Propriedades reológicas das lamas de perfuração simuladas.	22
Tabela 6-2 - Quantidade de partículas para a contração brusca.	25

Lista de Símbolos

$w(r)$	Função peso
r_e	Raio da vizinhança (m)
r	Distância entre partículas (m)
\vec{u}	Velocidade da partícula $\left(\frac{m}{s}\right)$
ρ	Densidade do fluido $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
\mathbb{T}	Tensor das tensões (Pa)
\vec{f}	Forças externas (N)
t	Tempo (s)
pnd	Densidade do número de partículas
p	Pressão para a partícula (Pa)
λ	Parâmetro do operador Laplaceano
d	Número de dimensões
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação (s^{-1})
\mathbb{D}	Tensor taxa de deformação (s^{-1})
η	Viscosidade cinemática $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
τ	Tensão (Pa)
μ	Viscosidade dinâmica (Pa.s)
τ_o	Tensão de escoamento (Pa)
μ_∞	Viscosidade aparente (Pa.s)
K	Índice de consistência ($Pa.s^n$)
n	Índice Power Law (--)
v	Velocidade de Injeção (m/s)

Sumário

1.	Introdução	9
1.1	Fluidos de Perfuração	9
1.2	Objetivo	11
2.	Revisão Bibliográfica	11
3.	Método Computacional	13
3.1	Método Moving Particle Semi-Implicit (MPS)	13
3.2	Método de cálculo do termo viscoso	16
4.	Modelo Reológico	16
5.	Validação do Modelo	17
6.	Estudo de caso	21
6.1	Fluidos de Perfuração	21
6.2	Rompimento de barreira	23
6.3	Expansão brusca	23
6.4	Contração brusca	24
7.	Resultados	25
7.1	Rompimento de Barreira	25
7.2	Expansão brusca	27
7.3	Contração brusca	31
8.	Conclusões	35
	Bibliografia	36

1. Introdução

O desenvolvimento das sociedades trouxe uma crescente demanda por energia e atualmente a matriz energética mundial ainda está fundamentada sobre os combustíveis fósseis: o carvão e o petróleo. O primeiro deles, o carvão mineral, começou a ser utilizado em larga escala durante a revolução industrial, e era a maior fonte de energia durante muitos anos, mas atualmente perdeu espaço para outro combustível fóssil, o petróleo.

Os primeiros registros da utilização dessa matéria prima são datados na antiguidade pelos povos do oriente médio. Mas foi somente no século XIX que a indústria moderna de petróleo teve início juntamente com os primeiros processos de refinamento.

A demanda por essa matéria prima cresceu muito desde sua primeira utilização e atualmente é a base energética de quase todos os países modernos. Para atender essa demanda crescente foi necessário expandir os horizontes de exploração de petróleo. Existem diversos ambientes geológicos que permitem o acúmulo de óleo, os chamados reservatórios. No início da indústria a maior parte dos reservatórios de fácil acesso foram exauridos ou colocados em produção, por isso as indústrias do ramo optaram por explorar reservatórios cada vez mais profundos, avançar para regiões com lâminas de água cada vez maiores e até mesmo aventurarem-se no ambiente geológico do pré-sal, que é a promessa brasileira para a grande produção de óleo nacional.

Para que esses reservatórios de acesso mais difícil pudessem ser explotados novas tecnologias foram desenvolvidas, como brocas tricônicas e PDC (coroa de diamante policristalino), o sistema top drive de perfuração, e os fluidos de perfuração, que são o foco desse trabalho.

1.1 Fluidos de Perfuração

Segundo Thomas (2001): "Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes.", em sumo são misturas complexas de diferentes tipos, e são moldados visando fornecer às misturas algumas características desejáveis: estabilidade química, manter sólidos em suspensão quando estiverem em repouso, ser inerte em relação a danos às rochas dos poços, ser bombeável, não ser corrosivo aos equipamentos da sonda, apresentar custo de fabricação compatível com a operação, dentre outros.

Essas características são necessárias para que os fluidos de perfuração, ou lamas de perfuração como são conhecidos dentro da indústria, possam desempenhar algumas funções essenciais, dentre elas: Resfriar e lubrificar os componentes da coluna e a broca, retirar os detritos gerados na perfuração e exercer pressão hidrostática na formação impedindo a entrada de fluidos indesejáveis e estabilizando as paredes do poço antes de sua cimentação ser realizada.

Porém para que isso seja possível são misturados diversos componentes, como por exemplo a baritina ($BaSO_4$) e a bentonita, para que cada uma das propriedades do fluido seja controlada, elas são: Parâmetros reológicos, densidade, força gel, teor de sólidos e de bentonita, pH, salinidade, alcalinidade e parâmetros de filtração.

Uma dessas propriedades está diretamente ligada com o escopo desse trabalho, devido à heterogeneidade dessas misturas seu comportamento adota características não newtonianas, ou seja, sua viscosidade deixa de ser constante para qualquer taxa de deformação, o que dificulta consideravelmente a simulação de seu escoamento.

Os fluidos de perfuração não são os únicos fluidos de larga utilização da indústria moderna que possuem comportamento não newtoniano. O concreto utilizado na construção civil, por exemplo, no estado fresco é um fluido não newtoniano. A indústria alimentícia possui diversos exemplos em produtos finais como o *ketchup*, a maionese e diversas matérias primas como as soluções de amido de milho.

A própria indústria de petróleo possui mais exemplos de fluidos não newtonianos além dos fluídos de perfuração. Durante a cimentação de um poço é utilizado uma categoria particular de cimento de pega rápida, que possui comportamento não newtoniano. A etapa de completação, subsequente à perfuração, também utiliza se de fluidos dentro do poço para manter a estabilidade dele, os chamados fluidos de completação, esses, analogamente aos fluidos de perfuração, também são misturas complexas e podem ser do tipo não newtoniano.

Por esse motivo muitos estudos ligados a fluidos não newtonianos estão sendo realizados. Porém muitos dos trabalhos relacionados com a indústria de petróleo e seus fluidos de perfuração tendem a serem tratados como segredos industriais. Sendo assim, neste trabalho as simulações serão realizadas usando fluidos com características reológicas e densidades condizentes com alguns fluidos de perfuração, mas não necessariamente com todas as características dos fluidos comerciais.

Os fluidos de perfuração realizam um ciclo de atuação, viabilizando o reuso do fluido por questões ambientais e econômicas, e durante esse ciclo o fluido está sujeito a diferente geometrias e condições físicas. Cada sonda pode possuir ciclos particulares, a seguir está descrito um ciclo simplificado, também mostrado pela figura 1-1:

Fase de injeção:

1. A lama é misturada e armazenada no chamado tanque de lama (*Mud Pit*);
2. A lama é então bombeada por uma bomba (*Pump*) do tanque de lama até os tubos de perfuração (*Drill Pipes*), esse caminho é bastante tortuoso e há grande perda de carga nele.
3. Após o escoamento dentro dos tubos de perfuração ela é liberada para o fundo do poço através da broca (*Drill Bit*), entrando em contato com o espaço escavado pela broca (*Borehole*) e, portanto, com a formação;

Fase de retorno:

4. O caminho de retorno começa desempenhando uma das funções mais importantes para a lama, após a passagem pela broca o fluido carrega os cascalhos (detritos da perfuração) para a superfície, através do espaço anular (*Annulus*) formado pela coluna de perfuração e o poço escavado;
5. Em superfície a lama percorre a linha de retorno de lama (*Mud Return Line*), que basicamente consiste em um tubo que liga o poço até a peneira vibratória (*Shale Shaker*);

Fase de Tratamento:

6. A peneira vibratória consiste em uma série de telas metálicas que vibram para separar a lama dos cascalhos. Os cascalhos seguem seu caminho pelo sistema de remoção de sólidos (*Shale Slide*), e a lama retorna para o tanque de lama, podendo assim continuar seu ciclo.
7. Além da retirada de cascalhos outros tratamentos podem ser feitos, gases também pode ser incorporados na lama que retorna, e outros produtos químicos são adicionados, para que as propriedades básicas da lama sejam mantidas.

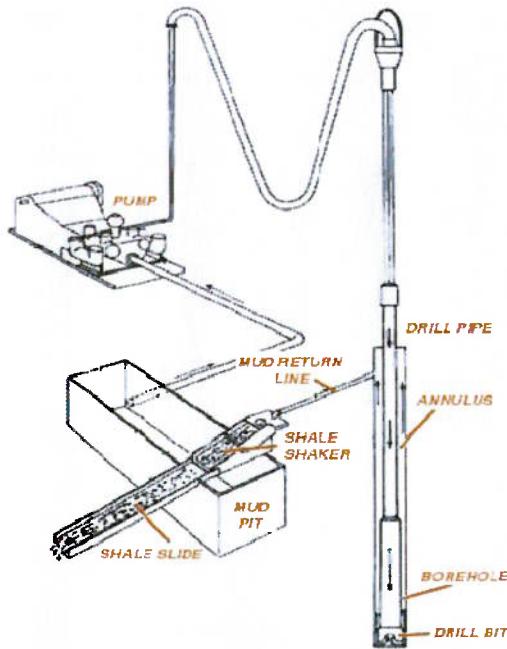


Figura 1-1 - Ciclo de um fluido de perfuração [Fonte: Schlumberger Excellence in Educational Development, 2011].

1.2 Objetivo

O objetivo primário deste trabalho é a simulação do escoamento de fluidos não newtonianos em condições semelhantes às que os fluidos de perfuração são sujeitos durante a perfuração de um poço de petróleo ou gás.

Como o ciclo completo é demasiadamente complexo para ser estudado nesse trabalho, foram escolhidas duas geometrias que se repetem diversas vezes durante esse ciclo: a expansão de fluxo e a restrição de fluxo.

2. Revisão Bibliográfica

Alguns fluidos, os chamados newtonianos, seguem um comportamento no qual sua tensão de cisalhamento é proporcional a sua taxa de deformação, porém a maior parte dos fluidos, por exemplo, os concretos e fluidos de perfuração não segue um comportamento tão ideal.

O primeiro estudo relacionado com fluidos não newtonianos foi realizado no começo do século XX, por E.C. Bingham (1916), e relacionava a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação, e considerava pela primeira vez o parâmetro chamado de tensão de escoamento, seus moldes eram baseados no modelo da época para fluidos, o chamado modelo

Newtoniano. O assunto teve tamanha repercussão que um livro foi publicado tratando somente desse assunto por Bingham (1922), porém esse modelo, chamado posteriormente de modelo de Bingham, não descreve o comportamento de todos os fluidos não newtoniano com exatidão, sendo assim, muitos outros modelos foram criados como, por exemplo, os modelos de Casson, de Robertson-Stiff, de Herschel-Bulkley, Power Law (modelo de potência), dentre muitos outros.

Os fluidos não newtonianos foram amplamente estudados e alguns métodos computacionais são utilizados para obter as características reológicas dos diferentes tipos de fluidos. Leite (2009), por exemplo, utilizou um fluido Carbopol 940 em um ensaio de rompimento de barreira (Dam Break) fazendo ensaios experimentais e simulações numéricas para comparações. Esse tipo de ensaio é muito utilizado para estudo de fluidos não newtonianos baseados em qualquer modelo reológico, e o Carbopol juntamente com o CMC (Carboximetil Celulose) são compostos costumeiramente ensaiados devido a suas características não newtonianas e sua fácil acessibilidade.

Já Cremonesi et al. (2010) focou seu trabalho em concretos frescos, que também podem ser considerados fluidos não newtonianos, e utiliza-se de ensaios dos tipos *Slump*, *mini-slump* e caixa em L, todos muito comuns nas áreas ligadas a engenharia civil.

O ciclo dos fluidos de perfuração como um todo é marcado por expansões e contrações, mas o estudo destes fenômenos é incipiente, e poucos trabalhos são divulgados aliando fluidos de perfuração com a alteração das geometrias tubulares.

A geometria de expansão brusca foi estudada por Castro (1994) utilizando soluções poliméricas que possuem comportamento de fluido não newtoniano pseudoplástico em ensaios físicos, Manica (2003) também estuda a expansão mas com metodologia computacional, além disso esse trabalho também avalia a influência da utilização de diferentes modelos reológicos na simulação numérica de fluidos não newtonianos, focando nos modelos de Bingham, Power-Law e no de Herchel-Bulkley.

Poole et al. (2009) concentrou-se em avaliar a influência do número de Deborah dos fluidos não newtonianos e da razão de expansão nesse tipo de geometria. Mitsoulis & Argyropaidas (2009) aliou a geometria de expansão brusca e contração brusca com o escoamento não newtoniano, por falta de resultados empíricos suas comparações são feitas utilizando resultados para escoamentos newtonianos. Kurokawa (2009) estuda para fluidos newtonianos ambas as geometrias de expansão e de contração brusca, além de introduzir também diversas outras geometrias e condições.

Especificamente para as lamas de perfuração alguns estudos numéricos e empíricos foram realizados. Normalmente cada pesquisador aborda um fenômeno ou geometria particular.

O transporte dos detritos é a principal função dos fluidos de perfuração desde que a água era utilizada no lugar desses fluidos para a perfuração de poços artesianos. Sá (1999) avalia a velocidade da decantação dos sólidos em um fluido não newtoniano, e estuda o chamado efeito parede, onde a velocidade de decantação cai proporcionalmente à distância das paredes do sistema. E Han et al. (2009) varia a composição do fluido não newtoniano buscando estudar experimentalmente sua influência no arraste de particulados sólidos, as soluções em questão variam em concentração de bentonita e de CMC (Carboximetil Celulose).

Outra das funções de maior importância é promover a estabilidade do poço impedindo desabamentos internos e fraturamento da formação, fato estudado por Calçada et al. (2009) que investigou a influencia de diferentes lamas de perfuração no controle de pressão do fundo do poço.

Dentro do ciclo a transição entre as etapas de injeção e retorno do fluido é marcada pela passagem dele pelas aberturas na broca, informações como perda de pressão e as velocidades de saída são muito importantes. Aboubacar et al. (2002) trabalha com diferentes geometrias de contração e expansão e utiliza o modelo constitutivo descrito por Phan-Thien e Tanner (1977) (PTT), e Coradin et al. (2007) trata especificamente da contração para a entrada em uma broca, mas não utiliza-se do modelo PTT.

O escoamento tubular e anular é certamente o mais estudado pela comunidade científica quando se trata de fluidos de perfuração. Os estudos compreendem desde tubos simples com fluidos não newtonianos sendo escoados internamente a até anulares com rotação do tubo interno para diversas excentricidades.

Martins (1990) modelou e simulou o escoamento de uma mistura sólido-fluido não-newtoniano em dutos horizontais e inclinados procurando se assemelhar ao máximo às lamas de perfuração. Já Queiroz Neto (1993) focou seu estudo na redução de fricção e do arraste de particulados sólidos e a influencia da parede para o escoamento, e a geometria escolhida foi a seção anular.

Singiner & Bakhtiyarov (1998), por exemplo, estudam empiricamente o escoamento de fluidos de perfuração em um anel excêntrico com o tubo interno em rotação. Enquanto Pinho & Oliveira (2000) definiram uma solução analítica para o escoamento de fluidos não newtonianos em seções anulares, e seus resultados foram utilizados por Brondani et al. (2006) que simulou com o programa PHOENICS CFD com o modelo PTT o escoamento axial anular desenvolvido em tubo anular com fluido viscoelástico.

Pereira (2006) aliou a análise experimental com simulações utilizando CFD (Computational Fluid Dynamics) para o escoamento em seções anulares.

Pode-se notar que o escoamento de fluidos de perfuração foi estudado para algumas geometrias, mas poucos são dedicados a expansão e a contração brusca, essa é exatamente a proposta desse trabalho, e para isso será utilizada a simulação computacional pelo método MPS.

3. Método Computacional

3.1 Método Moving Particle Semi-Implicit (MPS)

O MPS é um método computacional proposto por Koshizuka & Oka (1996). Originalmente desenvolvido para simular o comportamento dinâmico de um fluido incompressível, o método consiste em dividir o domínio do fluido em partículas e a utilização da descrição lagrangeana para formular as equações governantes de meios contínuos, que são: equações da continuidade e de conservação de quantidade de movimento.

Para a solução numérico-computacional destas equações levando-se em conta as condições iniciais e as condições de contorno, o método substitui os operadores diferenciais

das equações governantes por operadores derivados de um modelo de interação entre partículas, que consiste basicamente numa função peso $w(r)$:

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1, & \text{se } 0 \leq r \leq r_e, \\ 0, & \text{se } r > r_e, \end{cases} \quad (1)$$

na qual r_e é o raio efetivo que delimita a região de influência de uma partícula e r é a distância entre duas partículas:

$$r = |\vec{r}_j - \vec{r}_i|, \quad (2)$$

em que \vec{r}_i é o vetor posição da partícula i , \vec{r}_j é o vetor posição da partícula j . A partícula i é a partícula considerada centro da região de influência, enquanto a partícula j é uma partícula posicionada na vizinhança da partícula i , conforme ilustrada na figura 3-1.

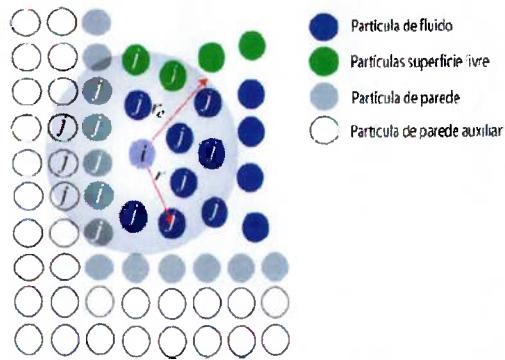


Figura 3-1 - Representação esquemática de partículas delimitando uma região de influência (de raio r_e) de uma partícula qualquer.

Adotando a descrição lagrangeana, a equação de conservação de quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{1}{\rho} (-\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T}) + \vec{f}, \quad (3)$$

e a equação da continuidade por:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \quad (4)$$

na qual \vec{u} é o vetor velocidade; p é pressão; \mathbb{T} é o tensor das tensões; \vec{f} é a resultante de outras acelerações; ρ é a densidade do fluido e t é o tempo.

Com base no modelo de interação entre partículas, o operador gradiente de uma função escalar φ é dado por:

$$\langle \nabla \varphi \rangle_i = \frac{d}{pnd^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\varphi_j - \varphi'_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right], \quad (5)$$

na qual φ'_i é o menor valor de φ das partículas que pertencem à região de influência da partícula i . O operador divergente de um campo vetorial Ψ é dado por:

$$\langle \nabla \cdot \Psi \rangle_i = \frac{d}{pnd^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\Psi_j - \Psi_i) \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right]. \quad (6)$$

Nestas equações, d é o número de dimensões e pnd^0 é o valor inicial da densidade do número de partículas - *particle number density* (pnd). O valor do pnd de uma partícula é definido como a soma dos pesos de todas as partículas j que estão na vizinhança da partícula i , e é dado por:

$$\langle pnd \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(\vec{r}_j - \vec{r}_i). \quad (7)$$

Como o valor do pnd é proporcional ao volume ocupado por uma partícula e suas vizinhas dentro do raio efetivo, é proporcional à densidade do fluido. Deste modo, a condição de incompressibilidade do fluido é assegurada quando o pnd é mantido a um valor constante e igual ao seu valor inicial, pnd^0 .

O algoritmo do método é dividido em duas partes principais:

- Parte I: as forças, acelerações, velocidades e posições das partículas são estimadas explicitamente usando a equação de conservação de quantidade de movimento, desprezando-se o termo do gradiente de pressão;
- Parte II: a pressão das partículas é calculada de forma implícita, por meio da solução de um sistema de equações de Poisson de pressão.

Tendo-se estimado explicitamente as forças, velocidades, acelerações e posições, avalia-se a densidade do número de partículas, e esta é comparada ao valor pnd^0 . A diferença entre os dois valores fornece uma correção dessa densidade, e a correção do pnd implica numa correção da velocidade (u'):

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{pnd'}{pnd^0} = -\nabla \cdot u', \quad (8)$$

em que pnd' é o valor de correção da densidade do número de partículas.

Essa correção, inserida na equação da continuidade, associada à conservação da quantidade de movimento, utilizando o modelo do laplaceano, resulta num sistema linear simétrico e esparso para calcular as pressões:

$$\sum_{j \neq i} [w(\vec{r}_j - \vec{r}_i)(p_i^{n+1} - p_j^{n+1})] = \frac{\rho \lambda (\langle pnd' \rangle_i - pnd^0)}{2d\Delta t^2}, \quad (9)$$

em que

$$\lambda = \frac{\int_V w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)^2 dv}{\int_V w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) dv}. \quad (10)$$

Uma vez determinados os valores das pressões, podem-se determinar as correções das velocidades:

$$u'_i = \frac{\Delta t}{\rho} \frac{d}{pnd^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{p_j^{n+1} - (p_i^{n+1})'}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right]. \quad (11)$$

Para avaliar se a partícula está na superfície livre do fluido, verifica-se a seguinte condição:

$$\langle pnd' \rangle_i < pnd^0 \beta, \quad (12)$$

na qual $\beta < 1,0$. Às partículas de superfície livre, a pressão é imposta como zero (pressão atmosférica) para atender à condição dinâmica. Koshizuka & Oka (1996) avaliaram β entre 0,8 e 0,99.

3.2 Método de cálculo do termo viscoso

O cálculo do termo viscoso no código MPS é realizado na etapa explícita do algoritmo. Uma das variáveis utilizadas no cálculo do termo viscoso é a taxa de deformação, dada por:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \mathbb{D} : \mathbb{D}}, \quad (13)$$

em que \mathbb{D} é o tensor das deformações. Por sua vez, o tensor das deformações é:

$$\mathbb{D} = \frac{1}{2} [(\nabla u) + (\nabla u)^T]. \quad (14)$$

Nesta expressão, aparece o gradiente das velocidades, dado por:

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Utilizando o conceito de Fluido Newtoniano Generalizado, a viscosidade aparente pode ser expressa como uma função da taxa de deformação:

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \quad (16)$$

na qual, η é a viscosidade dinâmica.

O tensor das tensões é:

$$\mathbb{T} = 2\eta \mathbb{D}. \quad (17)$$

O divergente das tensões será calculado utilizando o modelo do divergente do método MPS:

$$\langle \nabla \cdot \mathbb{T} \rangle_i = \frac{d}{pnd^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\mathbb{T}_j - \mathbb{T}_i) \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right]. \quad (18)$$

4. Modelo Reológico

O modelo para fluidos newtonianos considera que a tensão cisalhante é proporcional ao gradiente de velocidade na direção perpendicular ao cisalhamento, essa proporcionalidade é dada pelo parâmetro chamado viscosidade (μ).

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (19)$$

Mas esse modelo não é válido para todos os fluidos. Analogamente aos sólidos os fluidos também podem se deformar em regime elástico e não sofrem deformação plástica. Isso

está relacionada com uma tensão mínima a que o fluido deve ser submetido antes de sofrer deformação plástica. Essa tensão mínima é conhecida como tensão de escoamento (τ_o).

A união do modelo newtoniano com o conceito de tensão de escoamento gerou o modelo de Bingham para fluidos.

$$\tau = \tau_o + \mu_\infty \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (20)$$

Porém novamente nem todos os fluidos seguem tal formulação, em alguns casos a viscosidade aparente não é constante, para eles pode ser utilizado, por exemplo, o modelo Power Law, que mesmo desconsiderando a tensão de escoamento, descreve uma relação não linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n. \quad (21)$$

Existem diversos outros modelos como por exemplo o modelo Herschel-Bulkley, que agrupa as características dos modelos anteriores, de Bingham e Power Law, representado pela seguinte formulação:

$$\tau = \tau_o + K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n. \quad (22)$$

O fato é que atualmente não existe um modelo perfeito que seja condizente com todos os fluidos. Para a implementação no método do MPS foram utilizados os modelos de Bingham e Power Law. A adequação do modelo é essencial para o funcionamento do código. Na etapa descrita pela equação (17) a viscosidade dinâmica é introduzida no cálculo do tensor de tensões (\mathbb{T}). Essa viscosidade é uma característica do fluido e por se tratar de um fluido não newtoniano não é um valor constante, podendo até mesmo adquirir valores diferentes para cada partícula. Sendo assim, o valor da viscosidade em cada partícula é calculado a partir do modelo reológico utilizado e da taxa de deformação da partícula.

Para a simulação e investigação dos problemas de interesse ligados ao fluido de perfuração, foi utilizado o modelo de Bingham. Isso porque esse é o modelo reológico utilizado na referência, Petrobras (2002), que forneceu os dados sobre a reologia dos fluidos de perfuração para as simulações.

5. Validação do Modelo

A validação dos resultados numéricos com o MPS para fluidos não newtonianos com o modelo reológico de Bingham será feita baseada na dissertação de mestrado de Leite (2009). No trabalho em questão o fluido comercial Carbopol 940 foi utilizado no ensaio do tipo rompimento de barreira em 2D.

Esse tipo de ensaio é clássico em engenharia civil e no estudo de dinâmica de fluidos, o rompimento de barreira, ou "Dam Break" como também é conhecido foi estudado no passado por Martin & Moyce (1922) na ocasião investigou-se o espalhamento da coluna de água e taxa de decaimento da altura da coluna de fluido em relação ao tempo. Em diversas ocasiões o mesmo tipo de ensaio foi realizado.

Para a maioria dos pesquisadores o fluido sujeito ao escoamento possuía características newtonianas, mas Leite (2009) investigou o colapso da coluna de um fluido

não newtoniano, o Carbopol 940, que é um polímero poli acrílico utilizado costumeiramente na fabricação de géis que possuem comportamento reológico não newtoniano.

Os parâmetros reológicos desse composto utilizados nas simulações foram obtidos por Leite (2009) e estão explicitados na tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Parâmetros reológicos do Carbopol 940 pelo modelo Herschel-Bulkley (Fonte: Leite, 2009).

τ_0 [Pa]	K[Pa. s ⁿ]	n
4,4715	1,1849	0,5497

Para obter as propriedades do modelo reológico de Bingham foi realizada uma regressão linear, e os resultados são mostrados na tabela 5-2.

Tabela 5-2 - Parâmetros reológicos do Carbopol 940 pelo modelo de Bingham.

τ_0 [Pa]	μ_∞ [Pa.s]
33,26169	0,02175

A relação entre a deformação e a tensão dos modelos reológicos anteriormente expostos é mostrada pela figura 5-1.

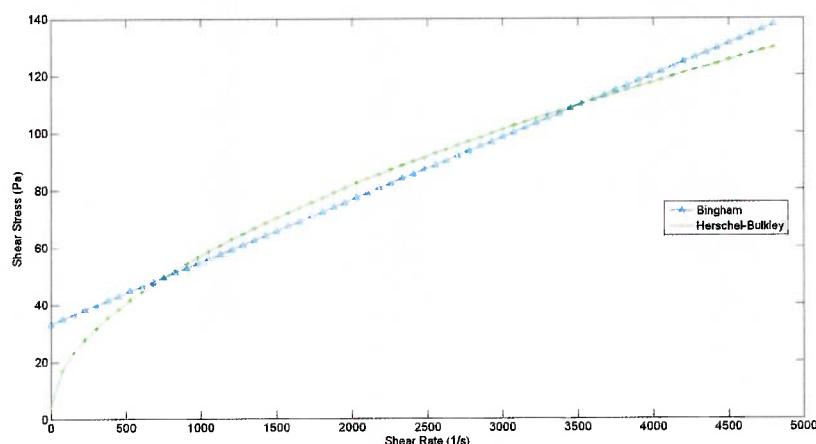


Figura 5-1 - Modelo reológico do Carbopol 940

Para a simulação deste problema, foi considerada uma coluna de fluido (Carbopol 940) rectangular de comprimento 50 cm e com diferentes alturas (h): 8, 10 e 12 cm.

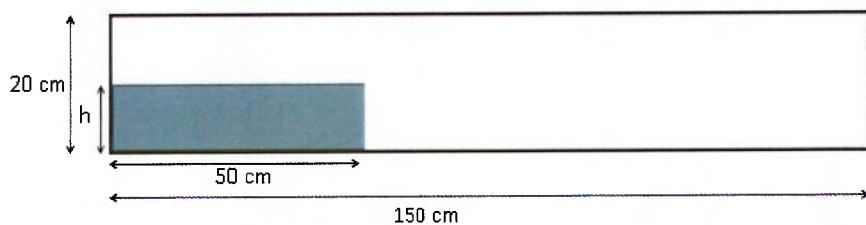


Figura 5-2 - Geometria do caso rompimento de barreira.

A figura 5-2 descreve a geometria do problema no caso 2D. No instante $t = 0$ s, a coluna de fluido é instantaneamente posta à ação da gravidade e, consequentemente, sofre o colapso deslizando na direção horizontal. Foram utilizados três tipos de resoluções (distâncias entre partículas) diferentes, que são: 5 mm (resolução baixa), 2 mm (resolução média) e 1 mm

(resolução alta). A tabela 5-3 mostra a quantidade de partículas geradas para cada altura da coluna de fluido (h). O valor do passo temporal utilizado nas simulações foi de 10^{-5} s.

Tabela 5-3 - Quantidade de partículas para o rompimento de barreira.

Distância entre Partículas (mm)	Quantidade de partículas		
	h = 8 cm	h = 10 cm	h = 12 cm
1	50156	59637	70116
2	15142	17642	20142
5	3660	4056	4452

A distância de partículas é um parâmetro muito importante para o MPS, distâncias muito pequenas geram quantidades muito grandes de partículas o que eleva o tempo de simulação já que todos os cálculos são realizados para cada uma das partículas, porém quanto menor ela for maior a resolução da simulação e melhor o comportamento do código, a figura 5-3 mostra que os resultados do MPS se aproximam da curva numérica e dos ensaios experimentais obtidos por Leite (2009).

Para as três alturas (8, 10 e 12 cm) notamos que a curva do MPS com distância de partículas de 5 mm (menor resolução) é a mais afastada e a de 1 mm (maior resolução), isso mostra que há convergência dos resultados a medida que a resolução aumenta. Devido a esses resultados a validação, assim como os casos estudados, será feita de modo que a resolução do problema seja suficientemente boa para que o código represente o fenômeno físico, mas sem elevar o tempo de simulação a patamares impraticáveis.

A comparação do resultado do MPS, para a distância de partículas de 1 mm, com os resultados divulgados por Leite (2009) para os instantes de tempo 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 é evidenciada pelas figuras 5-4 a 5-6.

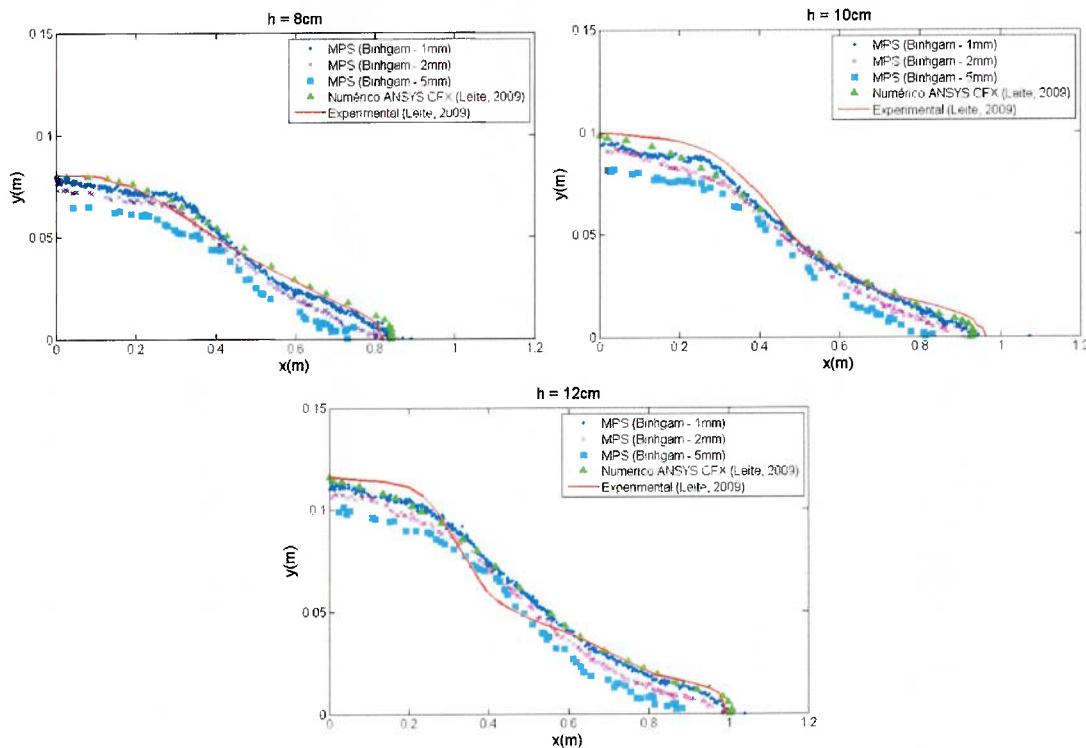


Figura 5-3 – Convergência dos resultados devido a resolução.

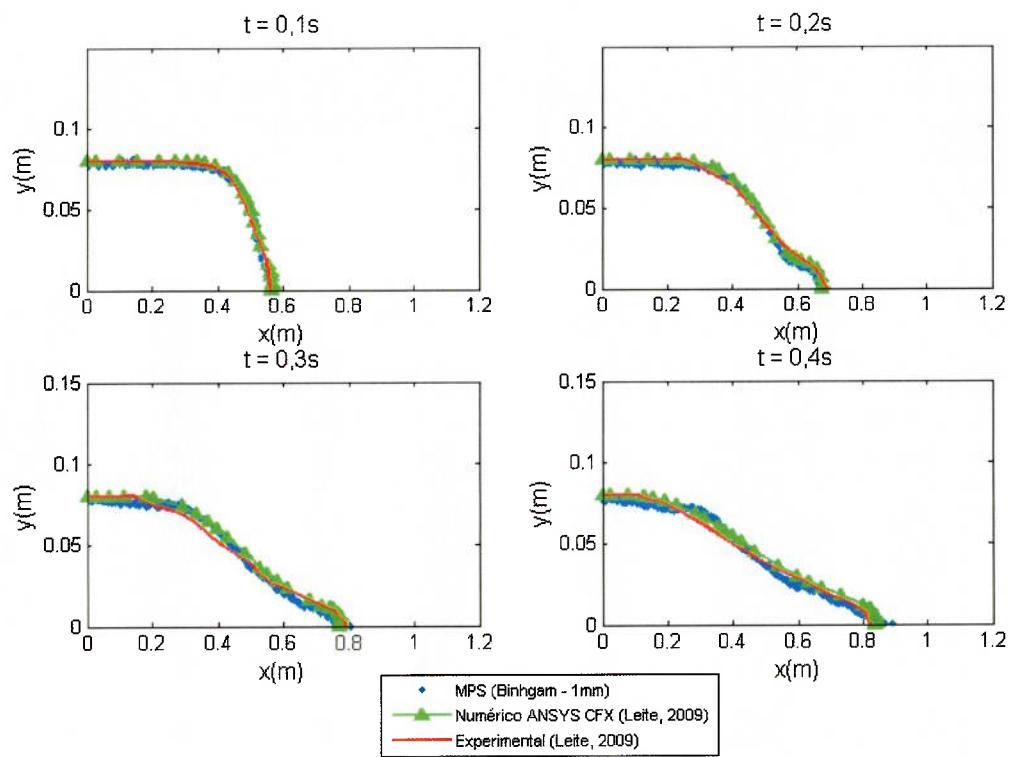


Figura 5-4 - Rompimento de barreira altura de 8 cm.

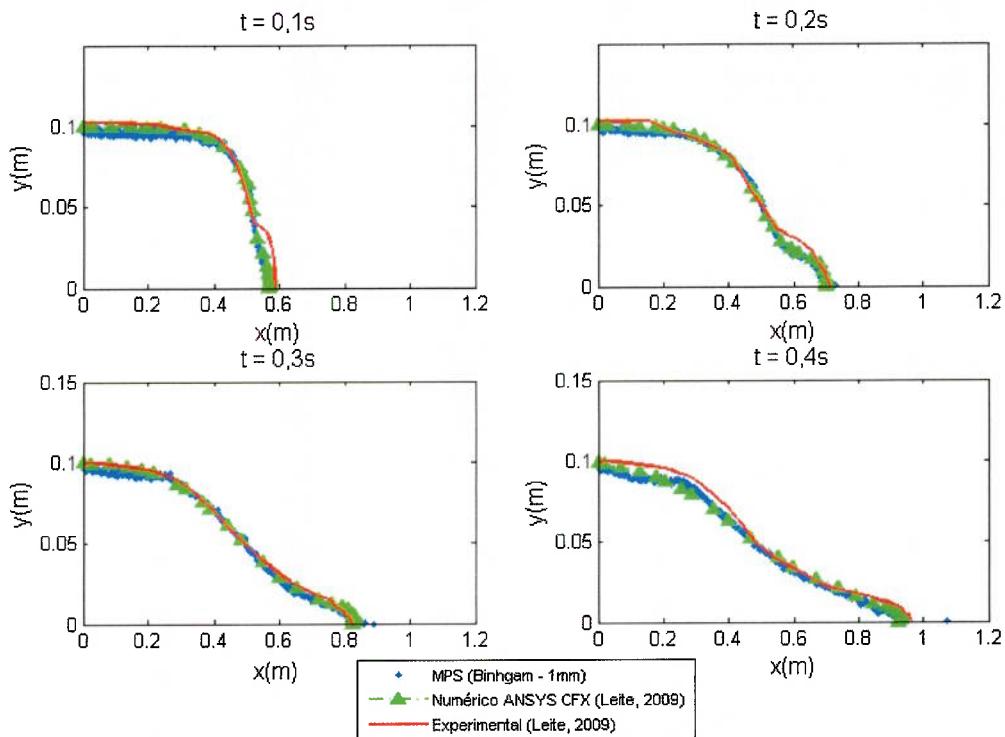


Figura 5-5 - Rompimento de barreira altura de 10 cm.

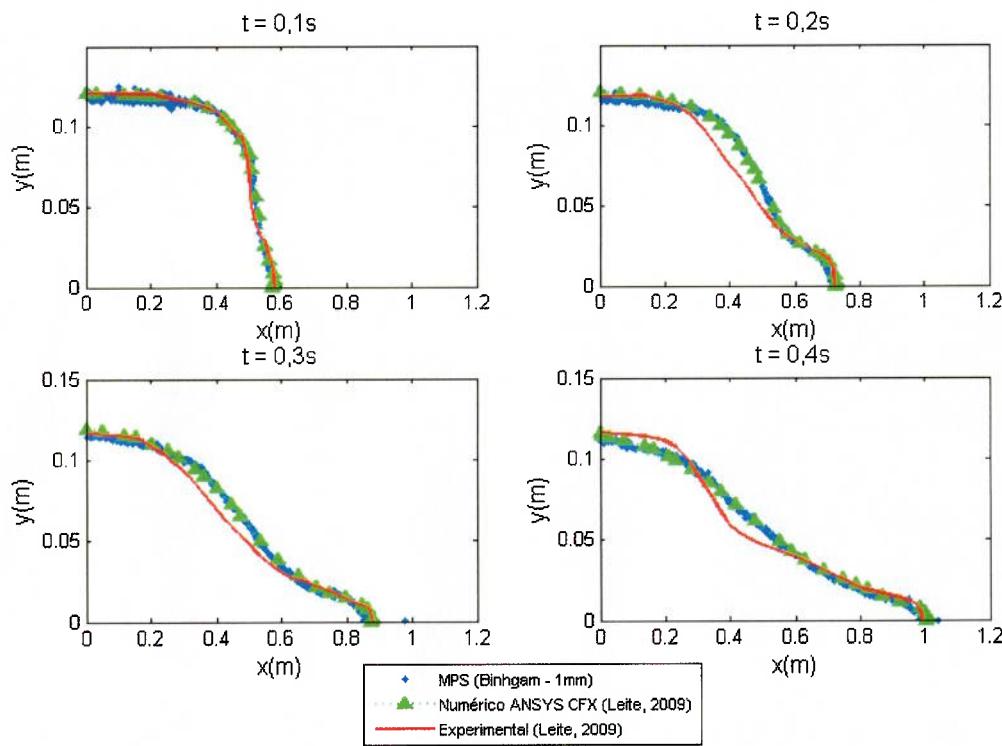


Figura 5-6 - Rompimento de barreira altura de 12 cm.

Pela comparação nas figuras pode-se afirmar que o MPS reproduz o resultado experimental obtido por Leite (2009), em geral a frente de onda gerada pelo MPS aderiu tanto a do ensaio experimental quanto pelo método numérico utilizado por Leite (2009). Com exceção de uma pequena inconsistência entre os resultados numéricos e a experimental na frente de onda a meia altura, o que ocorre tanto para os resultados obtidos em MPS quanto para os resultados numéricos do próprio Leite. Durante o experimento o fluido foi liberado manualmente utilizando uma comporta, é esperada que a aderência do fluido a parede da comporta e a velocidade de liberação dele influenciem os resultados, essa hipótese foi corroborada quando ambos os resultados numéricos, obtidos por métodos diferentes, apresentaram o mesmo resultado.

Tendo em vista esses resultados pode-se afirmar que o método MPS para fluidos não newtonianos é consistente com os resultados experimentais, validando sua utilização para simulação de escoamentos envolvendo fluidos não newtonianos. O passo seguinte é ensaiar numericamente casos mais ligados a indústria de petróleo.

6. Estudo de caso

Para estudar o comportamento das lamas de perfuração foram escolhidos alguns casos. O conceito é sujeitar diferentes lamas de perfuração às geometrias escolhidas e citadas anteriormente. E com isso analisar os parâmetros interessantes em cada caso.

6.1 Fluidos de Perfuração

Dentro da formulação para fluidos não newtonianos no MPS existem alguns parâmetros imprescindíveis relacionados ao fluido que se deseja simular, eles são:

- Densidade do fluido ($\frac{kg}{m^3}$);
- Tensão de escoamento;
- Viscosidade plástica.

Os dados para as lamas foram retirados do Petrobras (2002) e são mostrados pela figura 6-1.

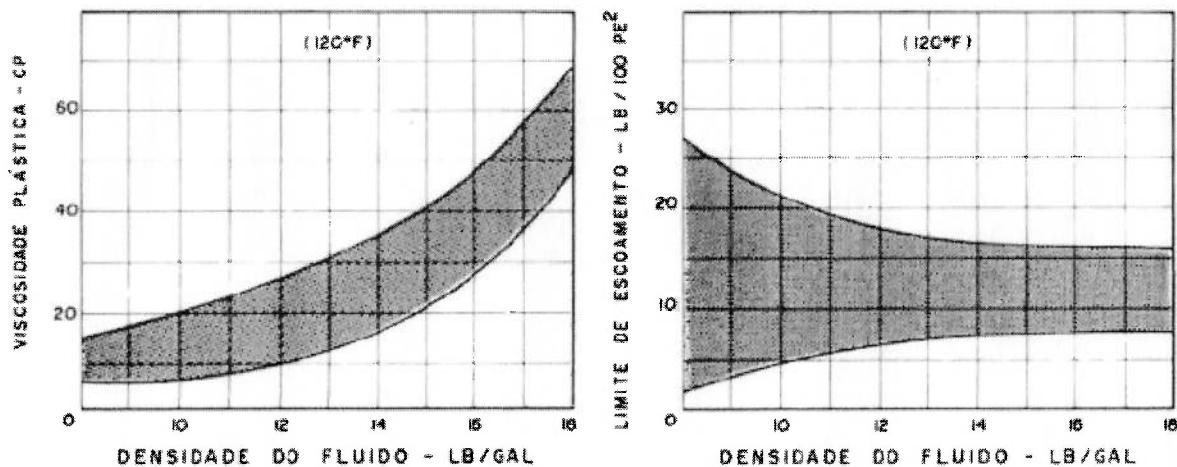


Figura 6-1 – Faixas médias para viscosidade aparente e tensão de escoamento segundo o modelo reológico de Bingham (Petrobras, 2002).

A partir desses dados foram escolhidas 5 lamas de diferentes densidades, isso para sujeitar o código a diferentes condições. Mas para uma mesma densidade existe uma grande faixa de parâmetros reológicos, sendo assim os valores escolhidos são os valores médios para a densidade em questão, é importante lembrar que a indústria do petróleo utiliza-se de unidades particulares e como o código utiliza o SI as conversões foram feitas, as propriedades finais estão explicitadas pela tabela 6-1 com propriedades reológicas diferentes para as simulações e as curvas reológicas estão na figura 6-2.

Tabela 6-1 - Propriedades reológicas das lamas de perfuração simuladas.

Lama	ρ [kg/m ³]	τ_0 [Pa]	μ_∞ [Pa.s]
A	1200,0	6,0	0,014
B	2400,0	5,9	0,019
C	3600,0	5,6	0,026
D	4800,0	5,4	0,038
E	6000,0	5,4	0,056

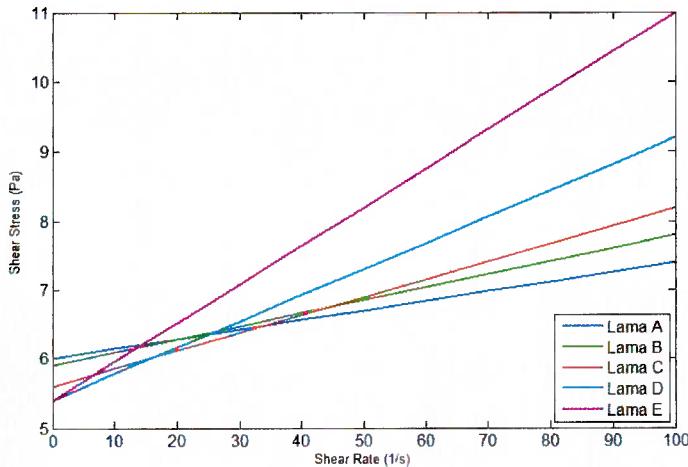


Figura 6-2 - Modelo reológico das lamas escolhidas.

6.2 Rompimento de barreira

O próximo passo é simular os casos propostos por Leite (2009) usando as cinco lamas escolhidas anteriormente substituindo o Carbopol 940. A resolução escolhida foi a de 1 mm de distância entre partículas, os parâmetros de simulação, como o passo temporal também foi mantido, 10^{-5} s.

O principal objetivo nessa etapa é observar se os corpos fluidos estão se comportando corretamente, sem perder o comportamento clássico encontrado nos ensaios de rompimento de barreira, as partículas devem manter-se relativamente próximas e as pressões devem ser distribuídas uniformemente.

6.3 Expansão brusca

É comum, durante o ciclo de um fluido de perfuração, que a seção transversal na qual ocorre o escoamento altere, podendo haver um acréscimo ou um decréscimo brusco de área, nessa seção será tratada a primeira situação.

A saída do fluido por uma broca, na transição da fase de injeção de retorno é outro exemplo desse tipo de geometria já que os jatos da broca possuem um pequeno diâmetro quando comparados ao do poço sendo perfurado.

Uma das principais características desse escoamento é a possível formação de vórtice logo após o alargamento, essa característica pode ser positiva por auxiliar na limpeza da broca, mas caso um vórtice muito poderoso seja formado dentro do *swivel* pode acelerar seu desgaste. Essa é a maior inspiração para o estudo desse tipo de escoamento.

Kurokawa (2009) simula a expansão dupla, porém para fluidos newtonianos, como o objetivo principal é avaliar o comportamento do fluido sob essas condições sua geometria será utilizada como base nesse trabalho. Para comparação especificamente para o comportamento não newtoniano podem ser utilizadas outras referências como Manica (2003).

A geometria do caso foi descrita como mostra a figura 6-3 (fora de escala), adaptado de Kurokawa (2009):

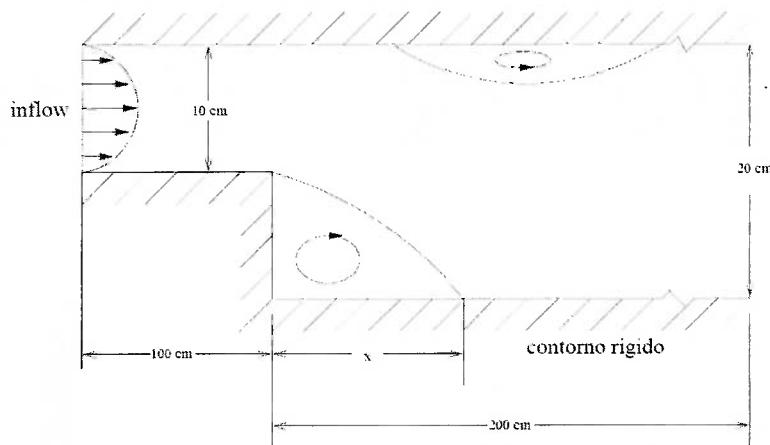


Figura 6-3 - Geometria da expansão brusca.

O primeiro passo simular o caso proposto por Kurokawa (2009) mas com o fluido A, e não com um fluido newtoniano, como realizado pelo autor. A velocidade de injeção é de 1 m/s, o tamanho das partículas é de 2,5 mm, esse foi escolhido por gerar uma boa resolução e um tempo computacional aceitável, cerca de 2,5 dias para uma simulação de 5 segundos. O número de partículas nessa resolução é de 87.464.

Para acrescentar dados a velocidade de injeção e fluido serão alterados, permitindo um estudo mais profundo do processo. Foram escolhidas quatro velocidades de injeção do fluido, elas são: 0,01 m/s; 0,1 m/s; 0,5 m/s e 1,0 m/s. E os fluidos simulados serão os mesmo cinco fluidos da etapa anterior.

O valor do passo temporal utilizado é o mesmo dos casos anteriores, 1.10^{-5} s, e sem influência da gravidade.

6.4 Contração brusca

O último caso escolhido trata-se da contração brusca, embora essa geometria esteja presente em diversas etapas do ciclo de um fluido de perfuração a entrada do fluido na broca é sem dúvida o mais importante. O fluido deve deixar o interior da coluna de perfuração e ser ejetado pela broca em direção ao poço perfurado, essa ejeção deve ser realizada com velocidade e vazão programadas permitindo a limpeza do poço e, em alguns tipos de brocas como as tri-cônicas, a vazão do fluido de perfuração é responsável pela rotação das partes móveis, sendo assim é necessário saber como se comporta o campo de velocidades nessa transição e se vórtices são formados.

Esse caso foi inspirado nos ensaios de Coradin et al. (2007), trata-se da situação oposta a descrita pelo caso de expansão brusca, haverá injeção na região de maior seção transversal e o escoamento será confinado em uma retração de diâmetros. Para facilitar a comparação entre esse e o caso anterior a geometria escolhida é a mesma da expansão brusca Kurokawa (2009), a única alteração trata-se do sentido de fluxo, vide figura 6-4 (fora de escala).

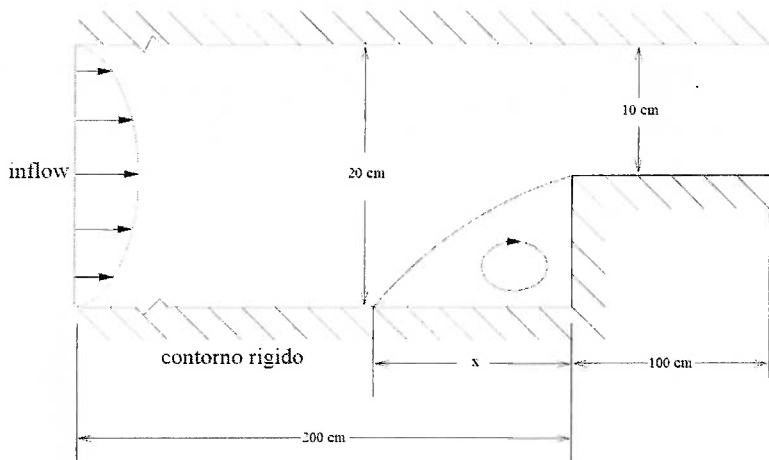


Figura 6-4 - Geometria da contração brusca.

A velocidade de injeção é de 1 m/s, e o será utilizado o mesmo tamanho de partículas da expansão, 2,5 mm. A quantidade de partículas para o caso de contração brusca é mostrado na tabela 6-2.

Tabela 6-2 - Quantidade de partículas para a contração brusca.

Distância entre Partículas (mm)	Quantidade de partículas		
	$h = 10\text{ cm}$	$h = 5\text{ cm}$	$h = 4\text{ cm}$
2,5	87584	77922	79604

A segunda etapa também será realizada alterando-se os parâmetros da mesma forma. Quatro velocidades de injeção do fluido, elas são: 0,01 m/s; 0,1 m/s; 0,5 m/s e 1,0 m/s. E as cinco lamas de perfuração. Todas essas simulações serão realizadas com a maior resolução, distância de partículas de 2,5 mm.

Também serão simulados casos com geometrias diferentes, o diâmetro do tubo estreito será alterada de 10 cm para 5 cm e 4 cm , alterando a relação entre os diâmetros de 1/2 para 1/4 e 1/5 respectivamente.

Os mesmos parâmetros da expansão serão avaliados, o perfil de velocidades na direção do escoamento em regime estabilizado e a existência de vórtice.

As simulações foram realizadas com passo temporal de 1.10^{-5} s, e sem influência da gravidade.

7. Resultados

7.1 Rompimento de Barreira

As principais propriedades do fluido que atuam no ensaio de rompimento de barreira são a viscosidade e a densidade, como pode ser notado na tabela 6-1, as viscosidades dos fluidos são bastante próximas, mas a densidade chega a ser cinco vezes maior no fluido E que no fluido A.

A figura 7-1 mostra a distribuição de pressões e a magnitude da velocidade para cada partícula no rompimento de barreira com altura de 10 cm com os 5 fluidos e com o Carbopol 940 (utilizado na etapa de validação), no instante de tempo 0,4s.

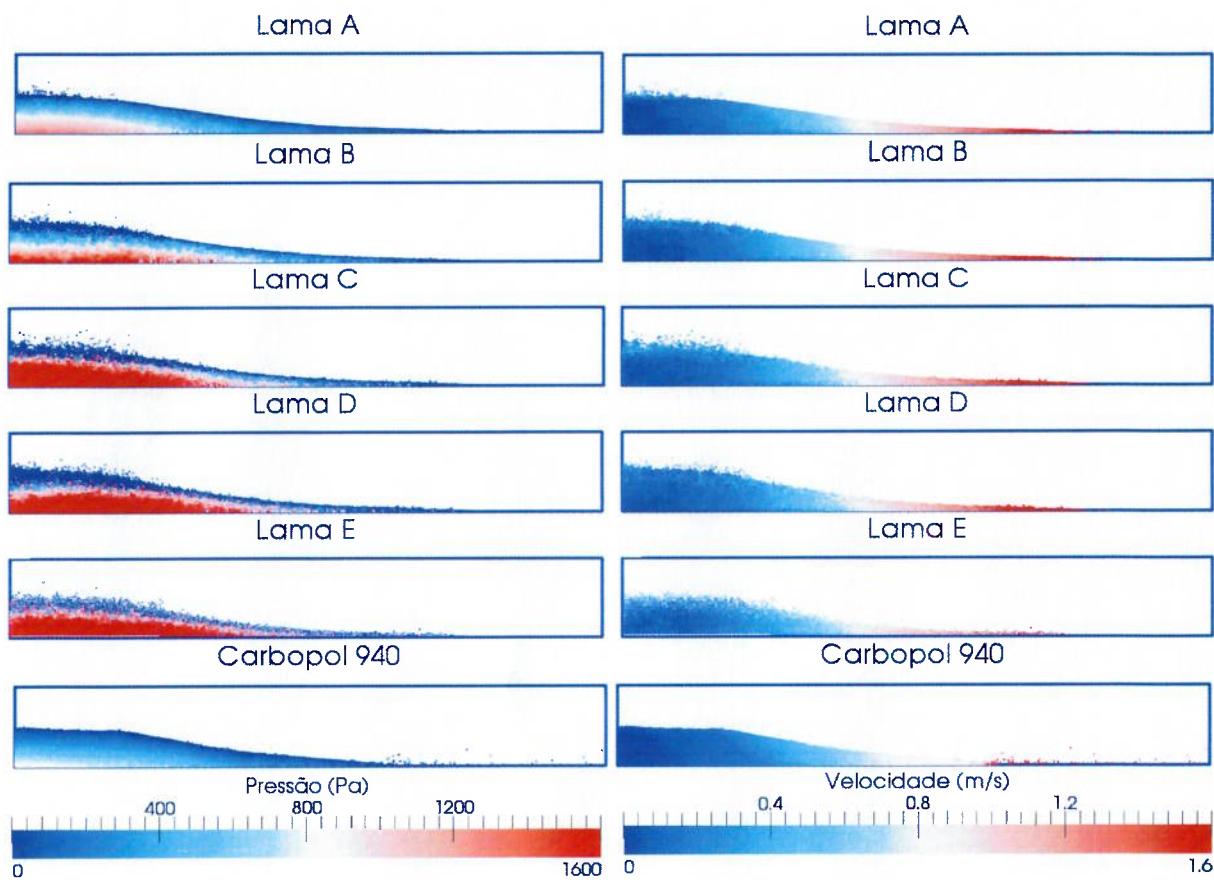


Figura 7-1 - Distribuição de pressões e a magnitude da velocidade no rompimento de barreira para a altura de 10 cm com as Lamas e o Carbopol.

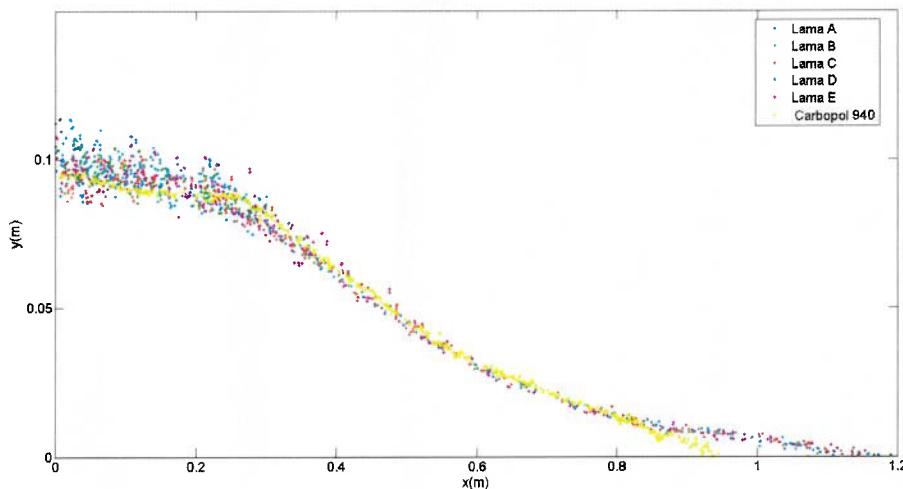


Figura 7-2 - Frentes de onda para as lamas A, B, C, D, E e para o Carbopol 940.

Nota-se que, a pressão aumenta consideravelmente conforme a densidade do fluido aumenta, correspondendo com a hidrostática dos fluidos. Porém a velocidade de escoamento de todas as lamas não parece sofrer alteração já que suas viscosidades aparentes são muito próximas, quando comparamos as frentes de onda, mostradas pela figura 7-2, percebe-se que as cinco lamas possuem a mesma frente, como era esperado já que a velocidade de escoamento é muito similar, mas o Carbopol apresenta uma frente mais compacta, isso pode ser explicado pela diferença de tensão de escoamento dos fluidos estudados. Embora as lamas e o Carbopol 940 possuam viscosidades diferentes elas ainda são muito próximas, já tensão de

escoamento do Carbopol 940 chega a ser cinco vezes maior que a das lamas, o que pode explicar a retração na onda..

Esses resultados mostram o potencial do MPS em simular escoamentos mais complexos com as lamas escolhidas.

7.2 Expansão brusca

Como dito anteriormente um dos principais objetivos é a identificação do vórtice, de maneira mais abrangente é interessante estudar o comportamento do campo de velocidades na direção do escoamento (x). De maneira análoga a realizada por Mitsoulis & Argyropaidas (2009), que estudaram a expansão e a contração do escoamento de fluidos não newtonianos e de newtonianos, as simulações feitas com o MPS para fluidos não newtonianos serão comparadas com o escoamento de fluidos newtonianos, cujos resultados foram obtidos por Kurokawa (2009).

Como as propriedades reológicas das lamas obtidas no guia de campo da Petrobras (2002) são muito similares a um fluido newtoniano, ou seja possuem baixa tensão de escoamento, cerca de 6 Pa, a comparação com fluidos newtonianos será suficiente para uma análise qualitativa dos resultados.

A figura 7-3 mostra o campo de velocidades na direção do sentido do escoamento para um fluido com $Re = 100$, enquanto a figura 7-4 para um fluido com $Re = 800$. No trabalho de Kurokawa (2009) o fluido estudado possui viscosidade uma ordem de grandeza acima das lamas simuladas quando a velocidade de injeção é de 1 m/s.

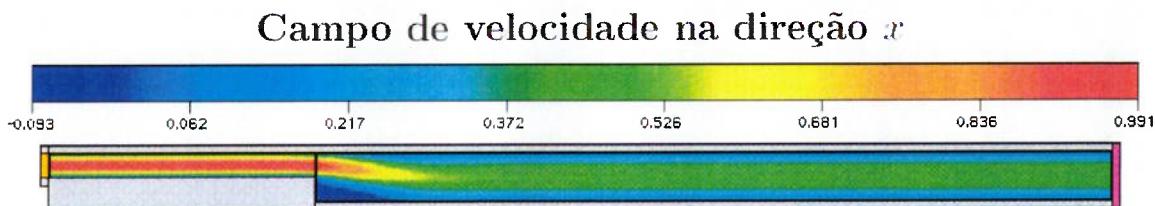


Figura 7-3- Velocidade na direção x do escoamento de um fluido newtoniano com $Re = 100$ (Kurokawa, 2010).

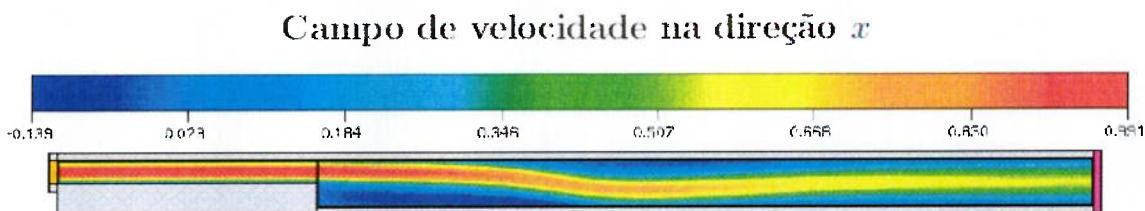


Figura 7-4 - Velocidade na direção x do escoamento de um fluido newtoniano com $Re = 800$ (Kurokawa, 2010).

Considerando a simulação do escoamento da Lama A com velocidade de injeção de 1 m/s, na mesma geometria de Kurokawa (2009), podemos ver na figura 7-5 que as partículas presentes na região inferior da expansão apresentam recirculação e o mesmo ocorre na região superior após a expansão, caracterizando o vórtice, ambas coloridas em tons próximos do azul, além disso o campo de velocidade mostrado na figura 7-6 retrata a velocidade na direção x (do escoamento) como negativa, ou seja contrária ao escoamento, característica marcante da presença de vórtice.

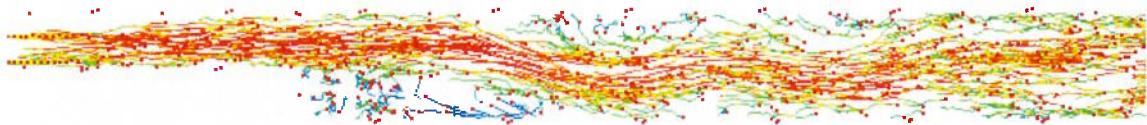


Figura 7-5 - Movimentação das partículas durante o escoamento da Lama A com $v = 1$ m/s.

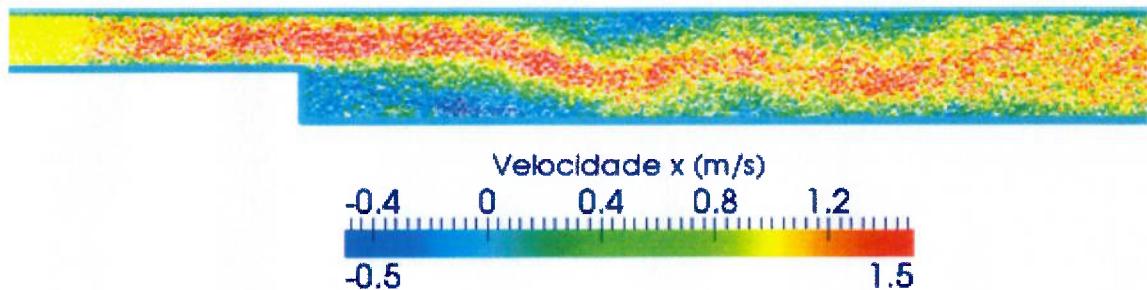


Figura 7-6 - Campo de velocidade na direção x, Lama A e $v = 1,0$ m/s.

Existe grande similaridade entre os campos de velocidades entre a simulação newtoniana com malhas feita por Kurokawa (2009) e a simulação em MPS utilizando o modelo de Bingham, evidenciando boa aderência da formulação de Bingham para o MPS. Os campos de velocidades para diferentes velocidades de injeção estão mostrados respectivamente na figura 7-7 as imagens estão aproximadas na região de maior interesse, a expansão. Além disso, a figura 7-8 mostra a variação da média entre as velocidades de cada partícula no centro do duto após a expansão durante o tempo. Nota-se que a estabilidade do regime é atingida em diferentes instantes para cada uma das velocidades de injeção, para o caso mais veloz ($v = 1,0$ m/s) em cerca de 1,5 segundos a velocidade já estava oscilando pouco, possibilitando então o encurtamento da simulação.

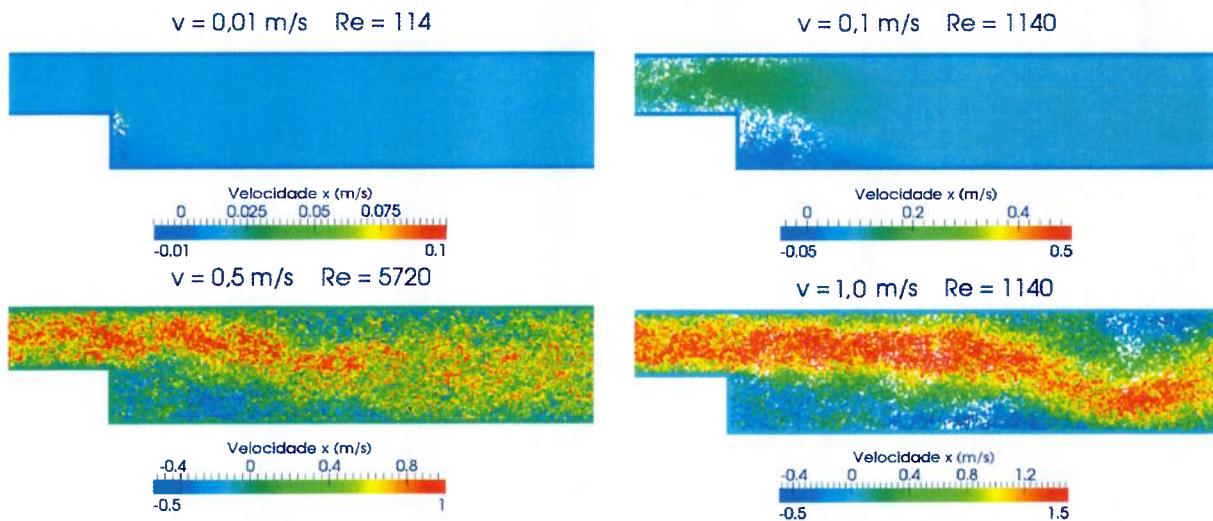


Figura 7-7 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes velocidades de injeção.

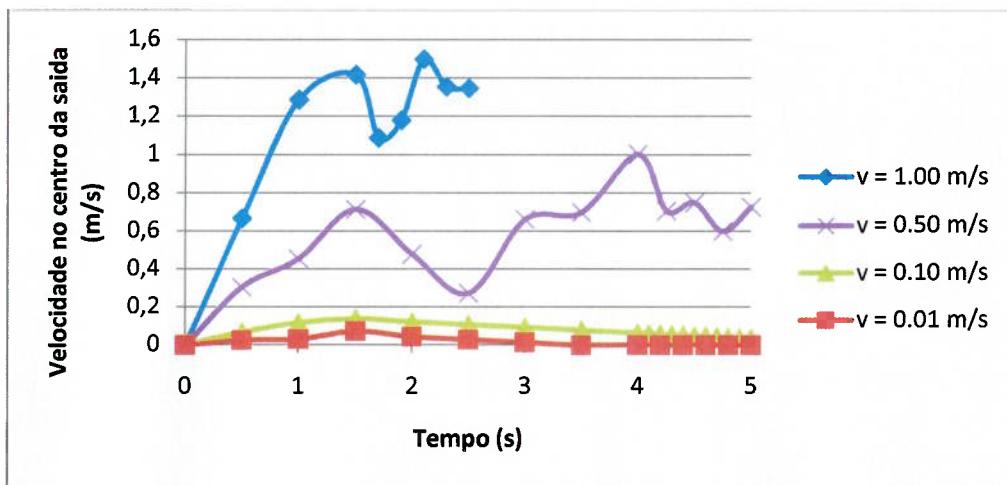


Figura 7-8 - Variação da velocidade após a expansão em função do tempo para diferentes velocidades de injeção.

O fluido simulado por Kurokawa (2009) é o mesmo nos dois casos mostrados, somente a velocidade de injeção foi alterada fazendo com que o número de Reynolds variasse. Comparando as figuras 7-3 e 7-4 observa-se que o aumento na velocidade de injeção (acarretando no aumento do número de Reynolds) expande o vórtice, o mesmo comportamento pode ser visto na figura 7-7 com o aumento da velocidade de injeção o tamanho do vórtice cresce, nota-se também que nas velocidades mais baixas (0,01 m/s e 0,1 m/s) somente o vórtice inferior é formado e o perfil de velocidades não é bem definido, já para as duas outras velocidades (0,5 m/s e 1,0 m/s) há formação dos dois vórtices e o perfil de velocidades é bem similar ao da referência. Kurokawa (2009) diz que dependendo do número de Reynolds do escoamento existe a possibilidade de não se formar vórtice, formar somente um, ou os dois, exatamente como aconteceu nos casos simulados com o MPS.

As figuras 7-9 e 7-10 mostram respectivamente os resultados de Mitsoulis & Argyropaidas (2009) com fluidos newtonianos e não newtonianos para a mesma taxa de cisalhamento sofrendo expansão planar em uma relação de 4 para 1, nota-se que o comportamento geral do fluido é o mesmo, mas que a dimensão dos vórtice diminui para o fluido não newtoniano, o autor atribui a tensão de escoamento do fluido não newtoniano por esse efeito, corroborando os resultados obtidos com o MPS.

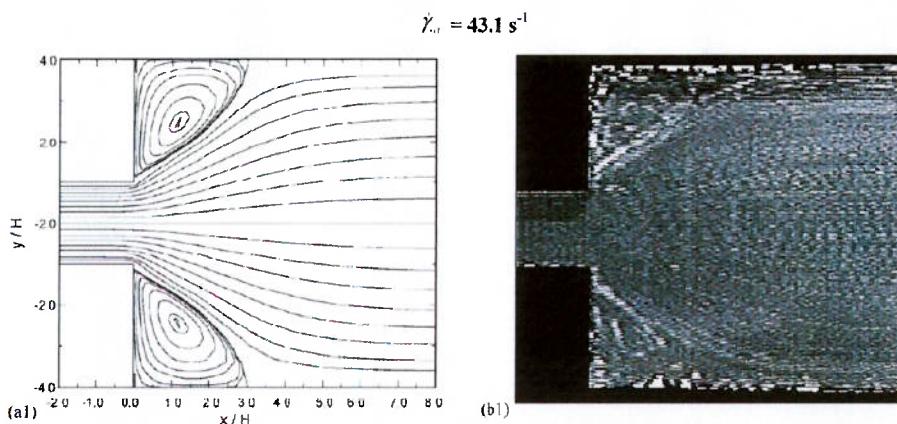


Figura 7-9 - (a) Previsão das linhas de fluxo (b) Linhas de fluxo observadas experimentalmente, ambos para fluido newtoniano em uma expansão planar de razão 4:1 (adaptado de Mitsoulis & Argyropaidas, 2009).

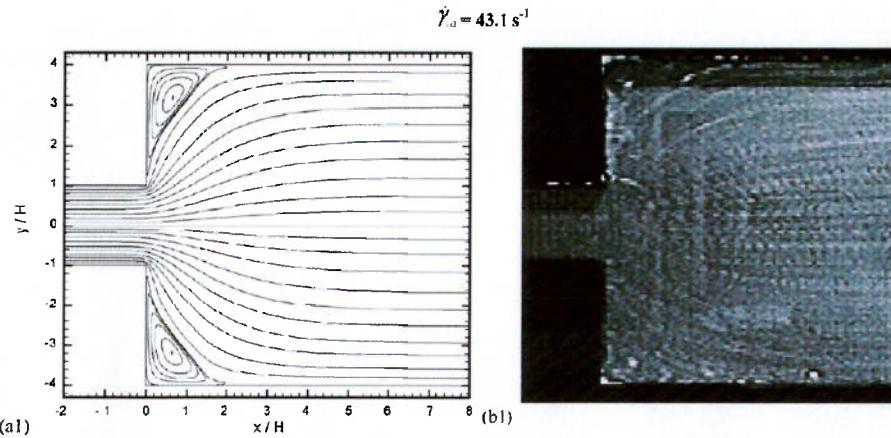


Figura 7-10 - (a) Previsão das linhas de fluxo (b) Linhas de fluxo observadas experimentalmente, ambos para fluido não newtoniano em uma expansão planar de razão 4:1 (adaptado de Mitsouli & Argyropaidass, 2009).

Comparando o escoamento para diferentes lamas nota-se, observando a figura 7-11, que o campo de velocidades tem poucas diferenças. Como os cinco fluidos possuíam viscosidade aparente e tensão de escoamento muito próximas era esperado que o escoamento fosse bastante similar, as pequenas alterações são efeito das diferentes densidades entre os fluidos. É interessante futuramente realizar simulações com outros tipos de fluidos, como por exemplo fluidos a base de óleo, ou fluidos com aditivos, para estudar melhor a influencia da reologia na expansão brusca.

Nos casos de maior velocidade é possível notar um afastamento das partículas esse problema poderá ser contornado com a utilização de um ejetor na saída do tubo de maior diâmetro, tal ejetor atualmente está sendo implementado no MPS, mas ainda não está pronto para utilização. A formação dessas lacunas é indesejável, o programa considera essas regiões como superfície livre, ou seja, zerando a pressão das partículas nessas regiões, o que afeta os resultados finais.

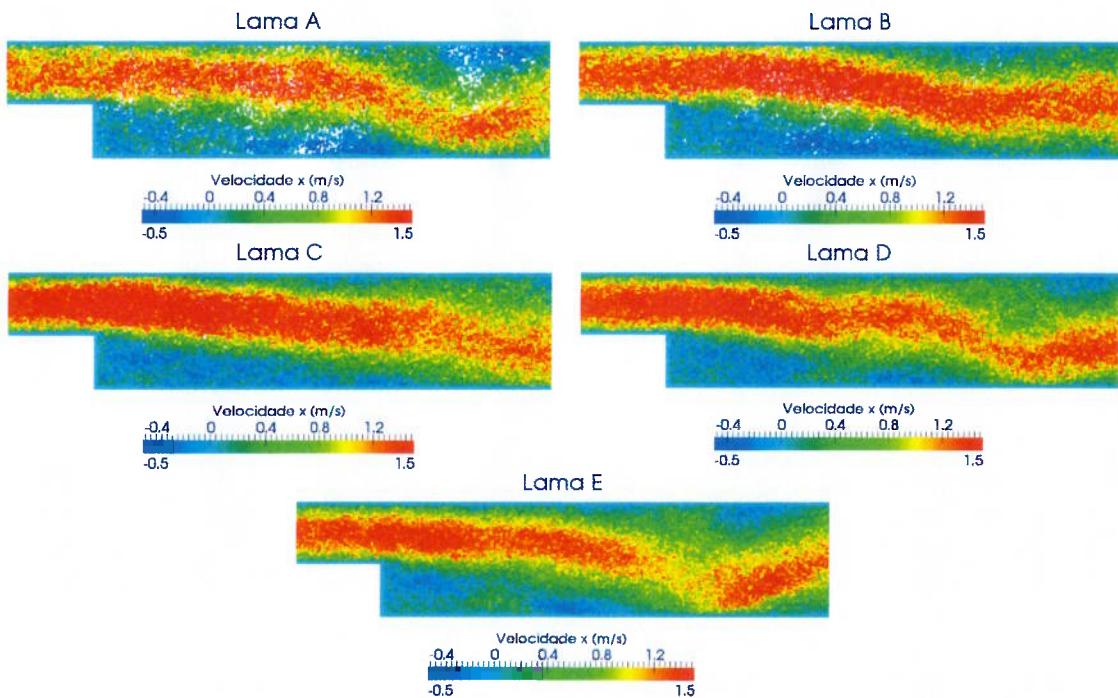


Figura 7-11 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes lamas para $v = 1,0 \text{ m/s}$.

7.3 Contração brusca

A mesma análise agora será realizada para a contração brusca, Coradin et al. (2007) fornece na figura 7-12 as linhas de corrente para seu estudo de contração brusca com fluidos não newtonianos, o que permitirá a comparação qualitativa do arranjo do campo de velocidades.

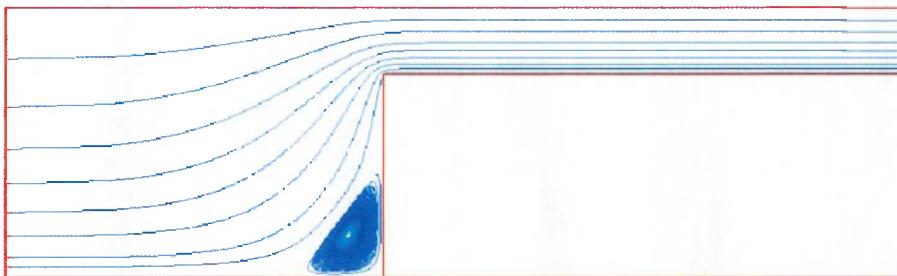


Figura 7-12 - Linhas de corrente para a contração brusca (adaptado de Coradin et al., 2007).

Novamente os resultados de Mitsoulis & Argyropaidas (2009) podem ser utilizados, a figura 7-13 mostra o comportamento do mesmo fluido não newtoniano do caso da expansão sendo submetido a contração brusca.

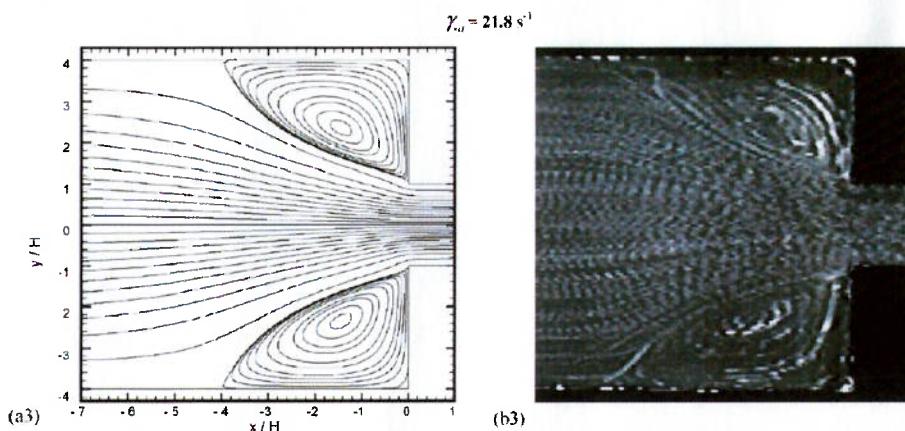


Figura 7-13 - (a) Previsão das linhas de fluxo (b) Linhas de fluxo observadas experimentalmente, ambos para fluido não newtoniano em uma contração planar de razão 4:1 (adaptado de Mitsoulis & Argyropaidas, 2009).

Ambas as referencias destacam a formação de um único vórtice, esse localizado na região anterior a contração, junto a parede, diferentemente da expansão que pode possuir até dois vórtices. Analisando os resultados do MPS representado pela figura 7-14, identifica-se o vórtice, da mesma forma que nas referências. Novamente a recirculação é evidenciada pela velocidade negativa na direção do escoamento. Para melhor ilustrar o escoamento em questão foram geradas as linhas de fluxo mostradas de forma semelhante ao realizado em ambas as referências.

Os resultados do MPS foram bastante satisfatórios também na contração. É evidente a similaridade das linhas de fluxo presentes na figura 7-14 com as figuras 7-12 e 7-13.

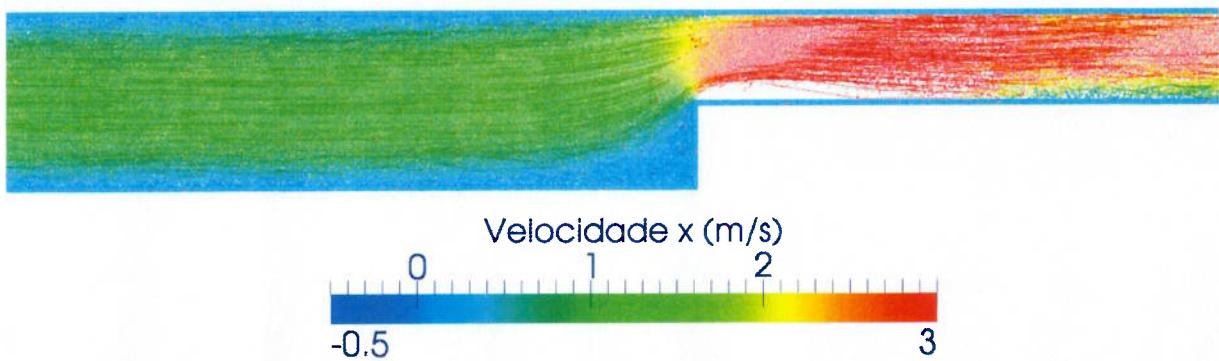


Figura 7-14 - Linhas de fluxo no caso contração brusca para a Lama A e $v = 1$ m/s.

As figuras seguintes mostram a influência da velocidade de injeção, da geometria da contração e do fluido utilizado no escoamento. A variação desses parâmetros é muito útil para o projeto de brocas, a escolha da lama em cada etapa e da determinação da potência das bombas de lama que são responsáveis pela injeção de lama na coluna, definindo assim todo o ciclo dos fluidos de perfuração.

O aumento da velocidade de injeção facilita a visualização do perfil de velocidades, as distribuindo mais uniformemente, como pode ser visto pela figura 7-15, a aceleração do escoamento influencia pouco o tamanho do vórtice, a estabilização da velocidade e das pressões para diferentes velocidades de injeção é mostrado pelas figuras 7-16 e 7-17

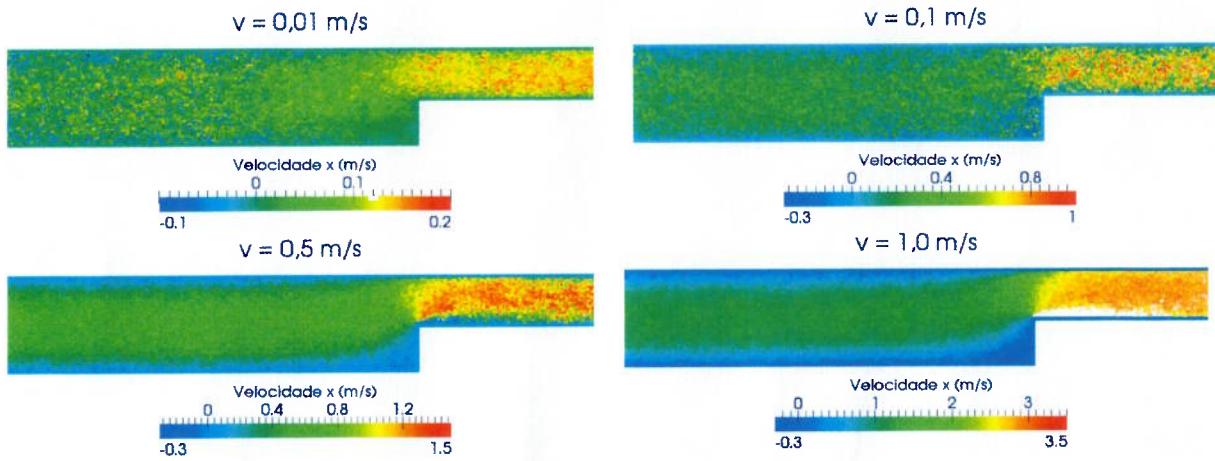


Figura 7-15 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes velocidades de injeção da Lama A.

O tamanho do vórtice sofre bastante alteração quando altera-se a geometria do caso, quanto maior a diferença entre o diâmetro do tubo de entrada (D) em relação ao tubo de saída (d) maior o vórtice formado como mostra a figura 7-18. A diferença da geometria acarreta em grandes alterações na distribuição de velocidades como de pressão. As figuras 7-19 e 7-20 mostra o comportamento da pressão e da velocidade no sentido do escoamento para a região da contração com velocidade de injeção de 0,5 m/s mostrando a influência que diminuir a relação entre os diâmetros tem com aumento de pressão e de velocidade. A maior restrição ao fluxo eleva bastante a pressão, principalmente antes da estabilização. Esse tipo de estudo é imprescindível para o projeto das brocas de perfuração, a interação delas com os fluidos de perfuração pode aumentar a eficiência da manobra.

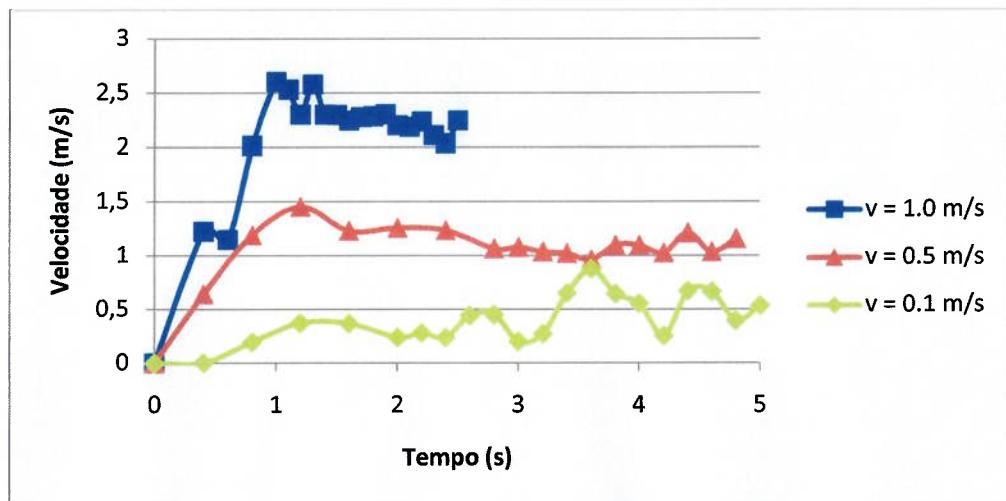


Figura 7-16 - Variação da velocidade na restrição durante o tempo para diferentes velocidades de injeção.

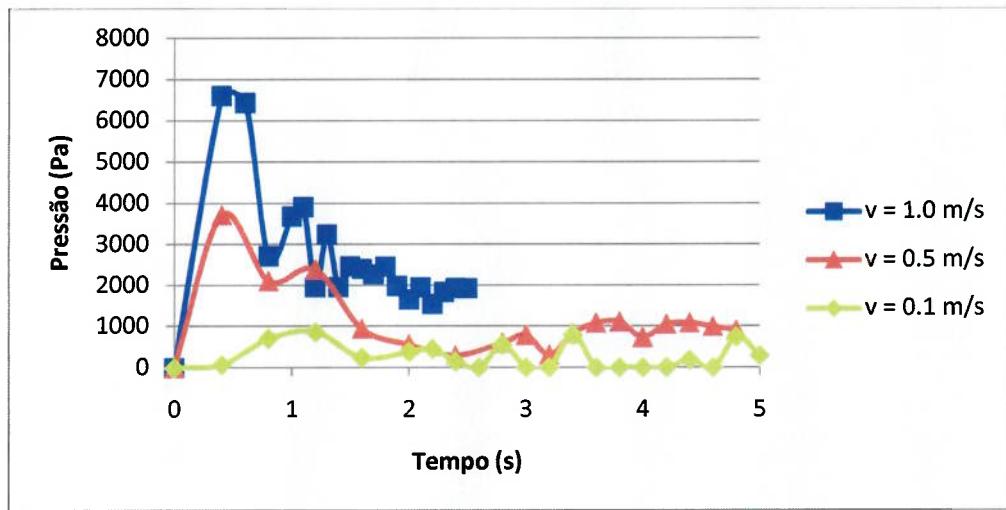


Figura 7-17 - Variação da vepressão na restrição durante o tempo para diferentes velocidades de injeção.

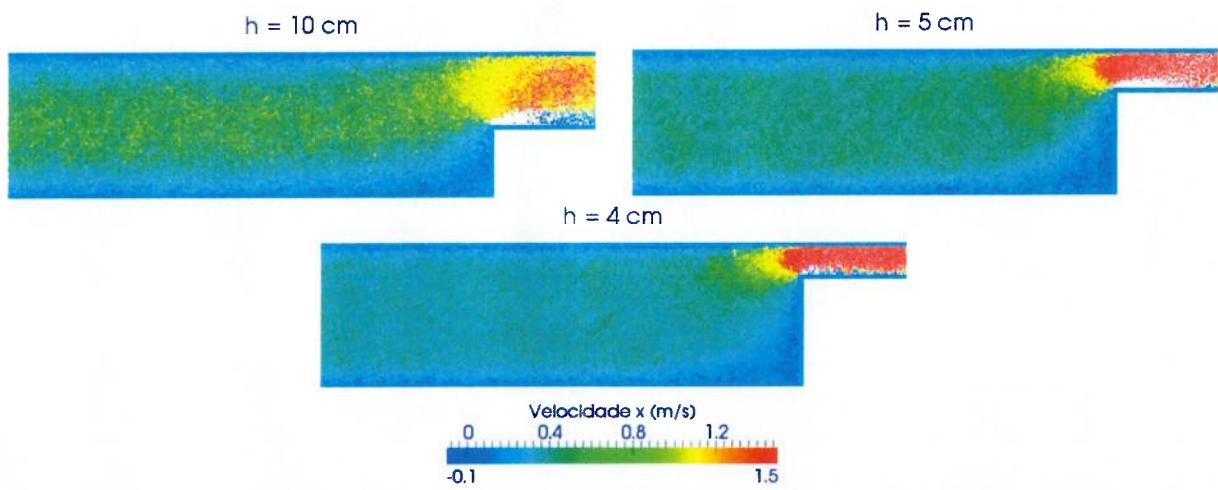


Figura 7-18 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes relações entre os diâmetros com a Lama A e v = 1 m/s

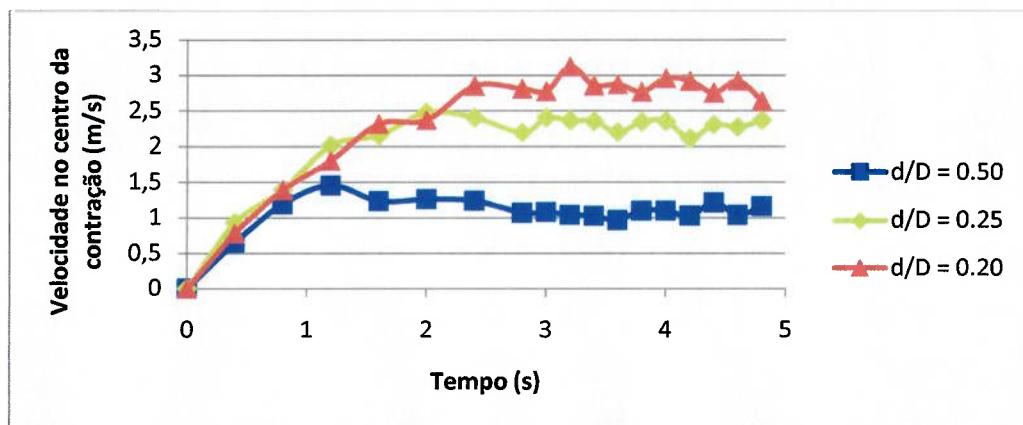


Figura 7-19 - Influência da relação dos diâmetros na velocidade no centro da restrição.

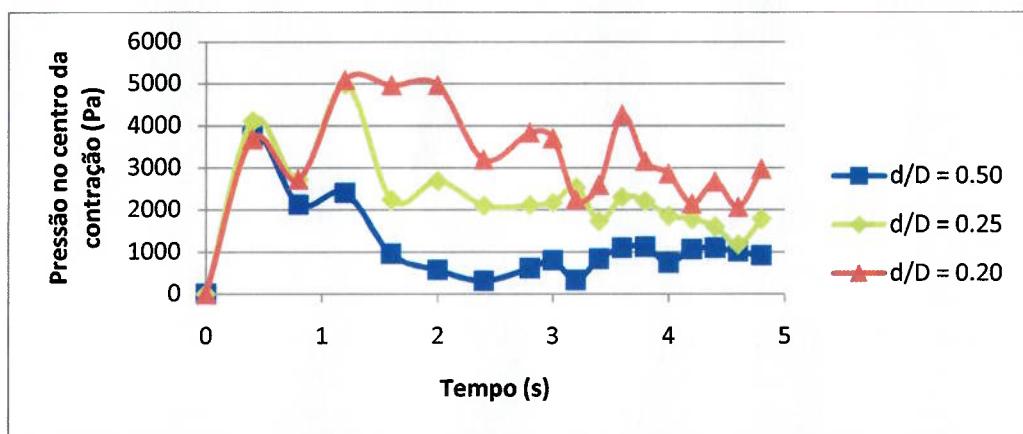


Figura 7-20- Influência da relação dos diâmetros na pressão no centro da restrição.

O escoamento de diferentes fluidos de perfuração na contração brusca gera resultados mais díspares do que na expansão. A figura 7-21 mostra que embora os perfis sejam bastante similares o aumento da densidade diminui a velocidade após a contração, além disso, a região de transição adquire velocidades menores para as lamas mais densas, fato mostrado pelo tamanho da região amarela na figura.

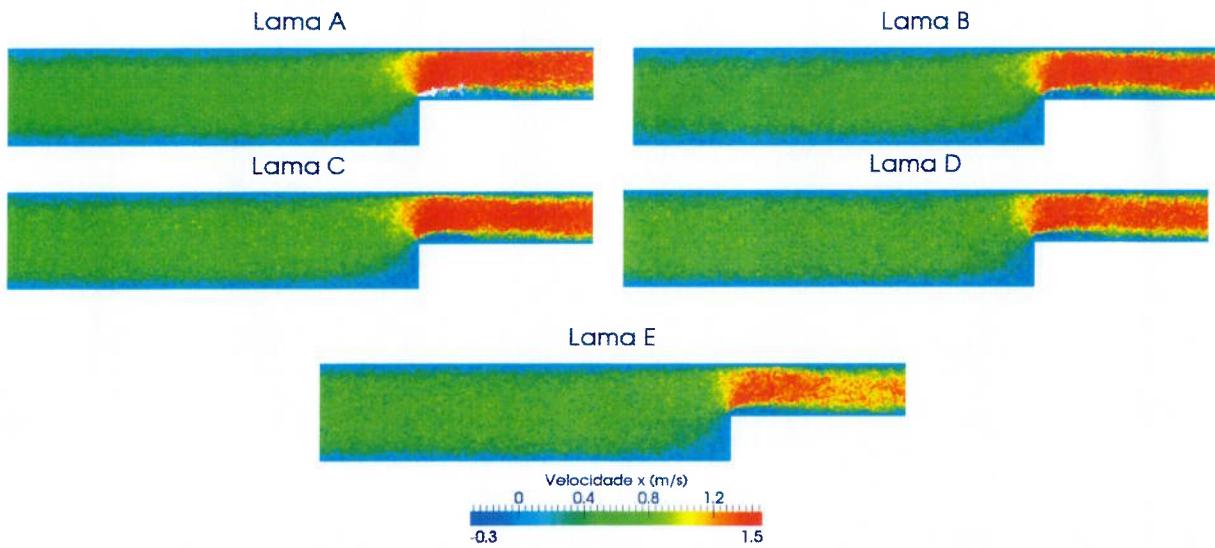


Figura 7-21 - Campo de velocidade na direção do escoamento para diferentes Lamas com $v = 0,5$ m/s.

Do mesmo modo que na expansão, um estudo mais profundo sobre a influência dos diferentes tipos de lamas e aditivos é interessante para o caso da contração brusca.

8. Conclusões

Os resultados obtidos pelo MPS foram satisfatórios, a primeira etapa, que consistiu na validação do modelo, mostrou que o código comportou-se bem ao simular o rompimento de barreira com o Carbopol 940, validando assim o modelo numérico empregado. A segunda etapa, que simulou o rompimento de barreira com fluidos de perfuração mostrou que os fluidos eram simuláveis pelo código e que, como suas propriedades reológicas eram bastante similares ao fluido validado (Carbopol 940), os resultados obtidos com os fluidos de perfuração eram confiáveis. As duas etapas seguintes consistiram em aplicações simples para exemplificar a utilidade do modelo.

Tanto a contração quanto a expansão mostraram-se de acordo com as referências consultadas para a distribuição de velocidades. Uma ressalva quanto a expansão deve ser feita devido a formação de lacunas durante o escoamento, o que prejudica os valores calculados de pressão. Já na contração a variação geométrica evidencia a importância da escolha dos jatos da broca na eficiência da operação.

Desse modo o programa pode ser utilizado para mapeamento inicial das condições de trabalho em um poço de petróleo, auxiliando na escolha da lama, da geometria da broca, estimar o tempo de ciclo e até mesmo dimensionar as bombas de lama.

Para aprofundar esse estudo seria interessante uma comparação quantitativa com as aplicações escolhidas, isso não foi considerado viável pela falta de resultados publicados, mesmo os trabalhos consultados não permitiam comparação direta, seja pelo fluido estudado pelos autores não ser um fluido de perfuração ou pelo trabalho não fornecer as propriedades reológicas dos fluidos utilizados. Outras aplicações mais complexas também podem ser testadas, como o escoamento anular podendo até mesmo ser avaliado futuramente o carregamento de sólidos.

Além disso, novos modelos reológicos podem ser implementados e testados, como por exemplo o modelo Power Law, que vem sendo implementado paralelamente no MPS, e o modelo Herschel-Bulkley, permitindo simulações mais fidedignas aos fluidos em questão.

Bibliografia

ABOUBACAR, M., MATALLAH, H., TAMADDON-JAHROMI H. R. & WEBSTER M. F. Numerical prediction of extensional flows in contraction geometries: hybrid finite volume/element method. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. p. 125-164, 2002.

BINGHAM, E. C. An Investigation of the Laws of Plastic Flow. *U.S. Bureau of Standards Bulletin*, 13, 309-353, 1916.

BINGHAM, E. C. **Fluidity and Plasticity**. 1st Edition. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1922. 429 p.

BRONDANI, W. M., MATTIUSI, E. M., CORADIN, H. T., FRANCO, A. T. & MORALES, R. E. M. Numerical simulation of laminar flow of a viscoelastic fluid through concentric annular. *Anais do 4º Congresso de Engenharia Mecânica*. 2006.

CALÇADA, L. A., SCHEID, C. M., VEGA, M. P., MANCINI, M. C. & MARTINS, A. L. Estudo de fluidos de perfuração e sua influencia nos processos de escoamento, formação da torta e controle de pressão de fundo de poço. *III Encontro Nacional de Hidráulica de Poços*, 17, (2009).

CASTRO, O. Escoamento turbulento de fluidos não newtonianos numa expansão brusca. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Térmica (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)*, 92, 1994.

CORADIN, H. T., BRONDANI, W. M., MATTIUSI, E. M., FRANCO, A. T., MORALES, R. E. & MARTINS, A. L. Simulação numérica do escoamento de um fluido de perfuração viscoelástico através de uma contração brusca. *4º PDPEIRO*, 10, 2007.

CREMONESI, M., FERRARA, L., FRANFI, A. & PEREGO, U. Simulation of the flow of fresh cement suspensions by Lagrangian element approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 9, 2010.

HAN, S., WOO, N. & HWANG, Y. Solid-liquid mixture flow through a slim hole annulus with rotating inner cylinder. *Journal of Mechanical Science and Technology*, p. 569-577, 2009.

KOSHIZUKA, S. & OKA, Y. Moving-Particle Semi-Implicit Method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, p. 421-434, 1996.

KUROKAWA, F. A. Um esquema de "upwind" para as leis de conservação e sua aplicação na simulação de escoamentos incompressíveis 2D e 3D laminares e turbulentos com superfícies livres. *Tese de Doutorado em Ciência da Computação e Matemática Computacional (Instituto de Ciências Matemáticas da Universidade de São Paulo)*, 189, São Carlos, 2009.

LEITE, L. O. B. Determinação física e numérica de corridas de lama resultantes de ruptura de barreira retendo material viscoplástico. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica (Universidade Estadual Paulista)*, 186, 2009.

MANICA, R. Simulação de escoamentos incompressíveis não newtonianos em dutos com expansão brusca. **Dissertação de Mestrado em Matemática Aplicada (Instituto de Matemática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul)**, 72, Porto Alegre, 2003.

MARTIN, J. & MOYCE, W. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plate. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series A. Mathematical, Phisical and Engineering Sciences**. The Royal Society, 244:312–324, 1952.

MARTINS, A. L. Modelagem e simulação do escoamento axial anular de mistura sólido-fluido não-newtoniano em dutos horizontais e inclinados. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Petróleo (Universidade Estadual de Campinas)**, 122, 1990.

MITSOULIS, E. & ARGYROPAIDAS, I. Numerical simulation of contraction and expansion flows of Langmuir monolayers. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 12, 2009.

PEREIRA, F. A. Escoamento laminar de líquidos não newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (Universidade Federal de Uberlândia)**, 229, 2006.

PETROBRAS. **Petroguia**. 2002. p. 397.

PHAN-THIEN, N. & TANNER, R. I. A new constitutive equation derived from network theory. **J Non-Newtonian Fluid Mechanics**, p. 353-365 1977,

PINHO, F. T. & OLIVEIRA, P. J. Axial annular flow of a nonlinear viscoelastic fluid – an analytical solution. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. p. 325-337, 2000.

POOLE, R. J., PINHO, F. T., ALVES, M. A. & OLIVEIRA, P. J. The effect of expansion ratio for creeping expansion flows of UCM fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 10, 2009.

QUEIROZ NETO, J. C. Escoamento tubular e anular de fluido de perfuração com adição de poliacrilamida: efeito da redução de arraste. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Petróleo (Universidade Estadual de Campinas)**, 181, 1993.

SÁ, C. H. M. Avaliação experimental dos efeitos de parede, da concentração de partículas e da reologia em um escoamento axial anular sólido-fluido não-newtoniano. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Petróleo (Universidade Estadual de Campinas)**, 156, 1990.

SCHUMBERGER EXCELLENCE IN EDUCATIONAL DEVELOPMENT. 2011. Mud Cycle at a Well Site. Disponível em: <<http://www.planetseed.com/node/15320>>. Acesso em: 20 de agosto de 2011.

SINGINER, D. A. & BAKHTIYAROV, S. I. Flow of drilling fluids in eccentric annuli. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 14, 1998.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2^a Edição. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2001. 271 p.