

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VITOR OTÁVIO OCHOSKI MACHADO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FLUIDO DE HERSCHEL-BULKLEY EM
ESCOAMENTO DE TAYLOR-COQUETTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

VITOR OTÁVIO OCHOSKI MACHADO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FLUIDO DE HERSCHEL-BULKLEY EM
ESCOAMENTO DE TAYLOR-COQUETTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marcos Vinicius Barbosa

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FLUIDO DE HERSHEY-BULKLEY EM ESCOAMENTO DE TAYLOR-COUETTE

por

VITOR OTÁVIO OCHOSKI MACHADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 29 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Membro Titular

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
Membro Titular

Prof. Me. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Vinicius e Andréa por terem sempre me incentivado a estudar e nunca desistir. Ambos são exemplos de esforço e dedicação para mim e o apoio que me deram foi fundamental para a conquista dos meus sonhos.

Ao meu irmão Pedro, pelo companheirismo para tudo, além do futebol, filmes, brincadeiras, mas por ter me ajudado tanto quando eu precisei, reservando os computadores do Laboratório de Pesquisa Computacional, passando informações para os professores e me aturando a maior parte do tempo.

Ao meu orientador, professor Marcos Vinícius, por não só ter sido um profissional incrível e estar o tempo todo disponível para me auxiliar, inclusive nos finais de semana, mas por ter sido um grande amigo nessa jornada. Sou extremamente grato por ter trabalhado com você, sua ajuda foi imensurável.

RESUMO

MACHADO, Vitor Otávio Ochoski. **Simulação computacional de um fluido de Herschel-Bulkley em escoamento de Taylor-Couette**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Na operação de exploração de petróleo a invasão do fluido de perfuração no substrato sendo perfurado é um problema que acarreta em um impacto financeiro de milhões de dólares anualmente. Uma das técnicas utilizadas para prevenir o fenômeno de invasão é alterar os parâmetros reológicos do fluido de forma a permitir a formação de uma região não cisalhada adjacente à parede do poço, impermeabilizando a mesma. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar a simulação numérica do escoamento em um poço de petróleo, através do *software* Ansys Fluent®, simplificado pelo escoamento anular de Taylor-Couette com rotação do cilindro interno, utilizando o modelo de Herschel-Bulkley para viscosidade do fluido. São investigadas as influências dos parâmetros reológicos do fluido (tensão limite de escoamento, índice de potência e índice de consistência), velocidade de rotação do cilindro interno e do Número de Bingham na formação da região não cisalhada, na tensão de cisalhamento nas paredes do poço e da formação e no fator de atrito de Fanning associado a essas superfícies. Os principais resultados mostram que a combinação dos parâmetros reológicos do fluido associados à rotação da coluna permitem a formação de uma região não cisalhada, adjacente à parede do poço. De forma geral, o aumento dos parâmetros do fluido (índice de potência e consistência) resultam na diminuição da região não cisalhada, aumentando a tensão de cisalhamento na parede e o fator de atrito de Fanning. Por sua vez, o acréscimo na tensão limite de escoamento e no Número de Bingham agem de forma contrária, causando um aumento na região não cisalhada, todavia, no que se refere a tensão de cisalhamento nas paredes e no fator de atrito, o aumento da tensão limite de escoamento possui o efeito indesejado de aumentar ambos.

Palavras-chave: Problema de invasão. Herschel-Bulkley. Taylor-Couette. Simulação Numérica

ABSTRACT

MACHADO, Vitor Otávio Ochoski. **Computational simulation of a Herschel-Bulkley fluid in Taylor-Couette flow**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

In the oil and gas exploration, the drilling fluid invasion into the substrate is an issue that results in a financial impact of millions of dollars yearly. One of the methods used to prevent the invasion phenomenon is alter the rheological fluid parameters in a way to allow the formation of an unyielded region adjacent to the formation wall waterproofing it. Therefore, this study objective is to perform a numerical simulation of the flow in an wellbore, using the software Ansys Fluent®, simplifying it by a Taylor-Couette flow inside an annulus with the inner cylinder rotating, using the Herschel-Bulkley model for the fluid viscosity. The formation of an yielded region is investigated by means of the rheological parameters of the fluid (yield stress, power-law index and consistency index), inner cylinder rotation speed and Bingham number influences are investigated in the formation of the unyielded region, and information regarding the wall shear stress of the well and the formation, and the skin friction coefficient are also provided. The main results show that the combination of the rheological fluid parameters associated with the drill rotation speed allow the formation of an unyield region adjacent to the wellbore wall. In general, the increase of the fluid parameters (power-law index and consistency index) results in the decrease of the unyield region, increasing the wall shear stress and the skin friction coefficient. On the other hand, the increase of the yield stress and the Bingham number influences the unyielded region in the opposite way, resulting in the increase of its size. Finally the increase of the yield stress results in the undesired effect of increasing both the wall shear stress and the skin friction coefficient.

Key-words: Invasion problem. Herschel-Bulkley. Taylor-Couette. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento.....	11
Figura 2 - Geometria de trabalho	18
Figura 3 - Localização dos elementos de malha	26
Figura 4 - Resultados para velocidade angular de 0,1 rad/s para malhas de (a) 10, (b) 20, (c) 30 e (d) 50 volumes de controle.	29
Figura 5 - Resultados para velocidade angular de 0,2 rad/s para malhas de (a) 10, (b) 20, (c) 30 e (d) 50 volumes de controle.	30
Figura 6 - Comparação dos resultados obtidos pelas diferentes malhas	31
Figura 7 - Representação do escoamento de Taylor-Couette, com rotação do cilindro interno de um fluido de Bingham, com a existência de plugue.....	33
Figura 8 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Bingham sem a formação de plug para malhas de (a) 30, (b) 50 e (c) 100 volumes de controle.	35
Figura 9 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Bingham com formação de plug para malhas de (a) 50, (b) 100 e (c) 200 volumes de controle. ...	37
Figura 10 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Herschel-Bulkley sem a formação de plugue para malhas de (a) 50 e (b) 100 volumes de controle.	40
Figura 11 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Herschel-Bulkley com a formação de plugue para malhas de (a) 50 e (b) 100 volumes de controle.	41
Figura 12 - Localização dos eixos x, y e z.....	43
Figura 13 - Resultados do perfil de velocidade em função da velocidade angular....	44
Figura 14 - Resultados do perfil de velocidade em função do índice de consistência.	45
Figura 15 - Resultados do perfil de velocidade em função do índice de potência....	46
Figura 16 - Perfis de velocidade em função da tensão limite de escoamento.....	47
Figura 17 - Comparação entre o perfil de velocidades com a formação de plugue (a) e sem a formação de plugue (b).....	49
Figura 18 - Influência do número de Bingham no perfil de velocidades	51
Figura 19 - Influência do número de Bingham no perfil de velocidades para $n = 0,5$ (a), $n = 0,6$ (b) e $n = 0,8$ (c).....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Hipóteses simplificadoras.....	23
Quadro 2 - Métodos de solução apresentados pelo software ANSYS FLUENT	24
Quadro 3 - Quantidade de volumes de controle em cada direção	28
Quadro 4 - Quantidade de volumes de controle utilizados em cada malha para simulação do caso do fluido de Bingham sem a formação de plugue	34
Quadro 5 - Configuração das malhas para estudo do escoamento de Taylor-Couette para o fluido de Bingham com a presença de plugue.....	36
Quadro 6 - Configurações de fluidos utilizados no estudo	42
Quadro 7 - Resultados das simulações.....	48
Quadro 8 - Número de Bingham dos casos estudados.....	50
Quadro 9 - Resultados para a variação do número de Bingham.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	tensão	[Pa]
$\dot{\gamma}$	taxa de deformação	[1/s]
μ	viscosidade dinâmica	[Pa.s]
τ_0	tensão limite de escoamento	[Pa]
n	Índice de lei de potência	[-]
m	índice de consistência	[Pa.s ⁿ]
ω	velocidade angular	[rad/s]
ω_{cr}	velocidade angular crítica	[rad/s]
R_1	raio interno	[m]
R_2	raio externo	[m]
r_0	raio da região de plugue	[m]
ρ	massa específica	[kg/m ³]
t	tempo	[s]
r	direção radial	[m]
θ	direção angular	[rad]
z	direção axial	[m]
u	componente de velocidade	[m/s]
\vec{V}	velocidade vetorial	[m/s]
\vec{g}	gravidade	[m/s ²]
∇	operador nabla	[-]
$\bar{\tau}$	tensor de tensões	[Pa]
$\bar{\dot{\gamma}}$	tensor simétrico de taxa de deformação	[1/s]
$\dot{\gamma}_c$	taxa de deformação crítica	[1/s]
Bn	número de Bingham	[-]
Bn_{crit}	número de Bingham crítico	[-]
$v ()$	perfil de velocidade linear	[m/s]
ν	viscosidade cinemática	[m ² /s]

L	comprimento	[m]
T	temperatura	[K]
Tr	torque	[N.m]
κ	relação entre diâmetro interno e externo	[-]
α	relação entre raio externo e interno	[-]
δ	espessura da região de plugue	[m]
τ_i	tensão de cisalhamento na parede interna	[Pa]
τ_e	tensão de cisalhamento na parede externa	[Pa]
cf_i	fator de atrito de Fanning referente a parede interna	[-]
cf_e	fator de atrito de Fanning referente a parede externa	[-]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Caracterização do problema	18
2.2 Objetivos	19
3 METODOLOGIA	21
3.1 Modelos matemáticos	21
3.2 Modelagem numérica	23
3.3 Geometria de estudo e malha	25
3.4 Verificação do modelo e teste de malha	26
3.4.1 Fluido Newtoniano.....	26
3.4.2 Fluido de Bingham	31
3.4.3 Fluido de Herschel-Bulkley.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Efeito da velocidade de rotação	43
4.2 Efeito do índice de consistência	44
4.3 Efeito do índice de potência	46
4.4 Efeito da tensão limite de escoamento	47
4.4 Resumo dos resultados da variação dos parâmetros do fluido	48
4.5 Efeito do número de Bingham	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	55
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

Fluidos são substâncias no estado líquido ou gasoso vastamente utilizados na engenharia para aplicações de lubrificação, geração de energia, troca de calor, entre outros. A definição de fluido amplamente difundida considera que fluidos são substâncias que se deformam continuamente mediante a aplicação de uma tensão de cisalhamento, por menor que ela seja (FOX *et al.*, 2010; IRGENS, 2014; SHAMES, 1995; ÇENGEL e CIMBALA 2007).

Os fluidos podem ser classificados de acordo com as suas principais propriedades, dentre elas a viscosidade que, analogamente ao coeficiente de atrito associado aos sólidos, representa fisicamente a resistência interna do fluido ao movimento. Desta forma, no que diz respeito à viscosidade, separam-se os fluidos em dois grupos: os newtonianos e os não-newtonianos (ÇENGEL e CIMBALA 2007).

Os fluidos newtonianos são aqueles em que a tensão (τ) responde de forma diretamente proporcional a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) com a viscosidade (μ) sendo a constante de proporcionalidade, comportamento descrito pela Equação (1), chamada de Lei de Newton da viscosidade. Ela é uma equação constitutiva que modela um fluido puramente viscoso e, no caso de um fluido newtoniano, a definição citada anteriormente se aplica perfeitamente (IRGENS, 2014).

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

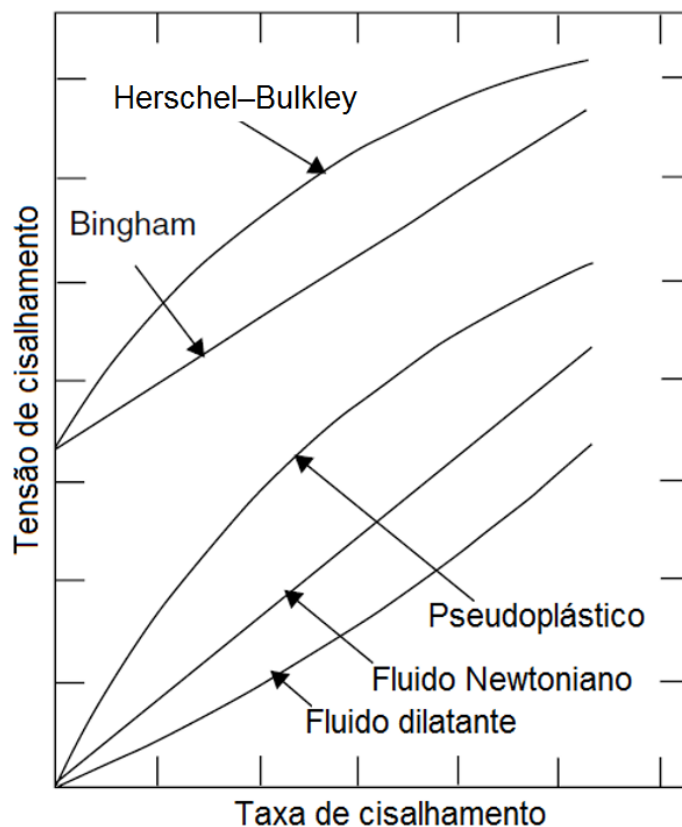
Já, no que tange os fluidos não-newtonianos, a viscosidade não mais é constante e varia com a taxa de deformação. O comportamento de alguns tipos de fluidos não-newtonianos torna a definição de fluidos supracitada incompleta, uma vez que uma variedade de comportamentos pode ser observada (IRGENS, 2014; BIRD *et al.* 1987).

Os fluidos não-newtonianos podem ser subdivididos em categorias de acordo com o seu comportamento: fluidos viscoelásticos, fluidos independentes do tempo e fluidos dependentes do tempo (IRGENS, 2014).

Na Figura 1 são mostrados fluidos independentes do tempo, ou seja, fluidos em que a viscosidade aparente é função da taxa de cisalhamento. Fluidos pseudoplásticos e fluidos dilatantes possuem comportamento contrário: enquanto a

viscosidade aparente do primeiro diminui com a taxa de cisalhamento, no segundo ela aumenta (CHABRA, 2007).

Figura 1 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento



Fonte: adaptado de Chabra (2007)

Os fluidos de Bingham e Herschel-Bulkley são fluidos viscoplásticos, pois necessitam que uma tensão mínima seja aplicada para iniciar o escoamento. No caso do fluido de Bingham, uma vez que este escoar, se comporta como um fluido newtoniano; para o fluido de Herschel-Bulkley, o mesmo pode apresentar um comportamento pseudoplástico ou dilatante (CHABRA, 2007).

O comportamento descrito pelo fluido de Herschel-Bulkley pode ser encontrado em alimentos, como o ketchup e espessantes, produtos de higiene (pasta de dente, gel de cabelo) e fluidos de engenharia como graxas, pasta de cimento, fluido de perfuração e o próprio petróleo (COSSOT ; GAULARD, 2005; SHIROMA, 2012).

Matematicamente, o modelo de Herschel-Bulkley é descrito pela Equação (2).

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + m\dot{\gamma}^n & \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} &= 0 & \tau < \tau_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Analisando a Equação (2) observa-se que se a tensão for menor que a tensão limite de escoamento (τ_0) a taxa de deformação é nula, tendo em vista que a tensão aplicada não é suficiente para fazer o material escoar.

Ainda se constata que caso a tensão limite de cisalhamento seja nula e o índice de potência (n) assumira o valor 1, o índice de consistência (m) passa a representar a viscosidade e o modelo de Herschel-Bulkley se resume ao modelo de Newton para fluido newtoniano (BIRD *et al.* 1987).

Já, se as mesmas condições anteriormente citadas ocorrem, exceto pela tensão limite de cisalhamento, que neste caso é diferente de 0, o fluido corresponde ao modelo de Bingham (BIRD *et al.* 1987).

Por fim, se o índice $n < 1$ o fluido representado é pseudoplástico, e se $n > 1$ resulta em fluido dilatante, ambos caracterizam o modelo de Herschel-Bulkley (BIRD *et al.* 1987).

No que se refere ao estudo de fluidos não-newtonianos viscoplásticos destaca-se o número adimensional de Bingham, que expressa uma relação entre as tensões limite de escoamento e de cisalhamento, e é utilizado para a caracterização da região não cisalhada, também conhecida como região de plugue. É importante ressaltar que a equação deste número adimensional varia conforme o tipo de fluido e escoamento, sendo assim, sua equação será citada em um momento mais oportuno no trabalho (SOTO *et al.* 2010).

Uma das aplicações mais comuns do uso de fluido do tipo Herschel-Bulkley, consiste na caracterização e modelagem do escoamento de fluidos de perfuração. Na indústria do petróleo o fluido de perfuração é bombeado da superfície através da coluna de perfuração e é expulso por orifícios contidos na broca para uma região compreendida entre a coluna de perfuração e a formação rochosa que se deseja perfurar. Frequentemente, para o estudo do transporte de fluidos no processo de perfuração, a operação é simplificada como dois cilindros concêntricos (ESCUDEIR *et al.*, 2002).

No que diz respeito ao problema da perfuração, em específico, o movimento do fluido pode ser entendido como o escoamento de Taylor-Couette combinado à um

escoamento de Hagen-Poiseuille. Dessa forma, o escoamento em um poço é uma combinação entre o movimento angular da coluna de perfuração associado ao gradiente de pressão imposto pela bomba na cabeça do poço (MARQUES; LOPES, 1997; ÇENGEL; CIMBALA 2007).

Uma das situações a serem evitadas durante a perfuração de poços de petróleo são as fugas de fluidos de perfuração. Estas estão relacionadas a condições do solo perfurado, como a existência de fraturas, porosidades, cavernas e zonas permeáveis e o controle de pressão do fluido, tendo em vista que se esta for maior do que os poros, ocorre o fenômeno da invasão, onde o fluido de perfuração penetra o solo (ABBAS *et al.*, 2003).

Estima-se que associado às perdas de circulação está um custo anual de centenas de milhões de dólares, incluindo o tempo e gasto de material envolvido em ações corretivas e na perda de fluido efetivamente (ABBAS *et al.*, 2003).

Sendo assim, levantou-se então a hipótese da utilização de fluidos que se comportam de acordo com o modelo de Herschel-Bulkley como fluido de perfuração, aproximando o estudo do movimento da broca de perfuração pelo escoamento de Taylor-Couette com o cilindro interno rotacionando.

Tendo em vista que apenas o cilindro interno rotaciona, espera-se que próximo ao cilindro externo haja pouca deformação no fluido, sendo assim, como os fluidos regidos pelo comportamento de Herschel-Bulkley possuem uma tensão limite de cisalhamento, esta não seja atingida, gerando, desta forma, uma região não cisalhada que agiria como uma proteção entre o escoamento do fluido de perfuração e a parede porosa do poço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Bird *et al.* (1983) apresentam em seu estudo diversas soluções analíticas no que tange o escoamento de fluidos viscoplásticos. Dentre estas soluções destaca-se como importante para o presente trabalho a referente ao escoamento de Taylor-Couette para fluido de Bingham sem a presença de plugue, em região anular com o cilindro interno fixo e o externo rotacionando.

Meuric *et al.* (1998) estudaram de forma numérica o escoamento laminar de fluidos de Herschel-Bulkely em região anular para diferentes excentricidades, tamanho de região anular, propriedades dos fluidos e parâmetros de escoamento. O método dos elementos finitos foi utilizado e a regularização de Papanastasiou foi aplicada para modelamento do fluido. Os autores investigaram o perfil de velocidade, deformação e tensão adimensionais, além de outras características como a viscosidade aparente e a distribuição de pressão.

Os principais resultados para o fluido de Herschel-Bulkley mostram indícios de que quando o cilindro interno, rotaciona não existe regiões onde o fluido estaria totalmente estático. As observações dos autores ainda indicam que, em situações de excentricidade, ao invés de haver um aumento do fluxo do escoamento, ao aumentar a rotação do cilindro interno, há na verdade uma diminuição gradual deste. Ainda, no que diz respeito a excentricidade, não foi observado para estas configurações de escoamento, propriedades do fluido e tamanho de região anular, zonas não cisalhadas.

Hussian e Sharif (2000) realizaram um estudo numérico do escoamento em região anular, levando em conta efeitos de excentricidade, obstrução, gradiente de pressão axial constante e variação da rotação do cilindro interno, de um fluido de Herschel-Bulkley utilizando a regularização de Papanastasiou. No que diz respeito a fluido apenas duas configurações foram utilizadas, variando o índice de potência.

Dentre os principais resultados tem-se que, para a situação concêntrica, a velocidade axial aumenta com o aumento da rotação do cilindro interno, no entanto torna-se menos significativa para altas rotações. Ainda os autores constataram que a região de plugue diminui, assim como a localização da velocidade máxima do escoamento desloca-se em direção ao cilindro interno com o aumento da velocidade angular do cilindro interno.

Escudier *et al.* (2002) utilizaram uma abordagem numérica pelo método de volumes finitos, a fim de estudar o escoamento laminar totalmente desenvolvido em região anular com rotação do cilindro interno, levando em conta os efeitos de excentricidade, para fluidos não-newtonianos, dentre eles o de Herschel-Bulkley.

Além dos múltiplos resultados obtidos para diferentes características dos fluidos e da região anular, Escudier *et al.* (2002) apontam que, para os dados utilizados em seus estudos, a aproximação dos fluidos viscoplásticos pelo modelo de lei de potência é válida, desde que escolhidos de forma apropriada os valores de índice de potência e consistência.

No que diz respeito ao estudo do escoamento de fluidos viscoplásticos, Mitsoulis (2007) traz resultados e discussões para os fluidos de Herschel-Bulkley, Casson e Bingham no tange o escoamento na região de entrada e de saída de moldes, escoamento sobre esferas e cilindros e para o *squeeze flow*.

Utilizando a regularização de Papanastasiou para tratar numericamente a descontinuidade dos modelos de fluido utilizados, o autor constatou que, para as condições de escoamento de entrada e saída existe o aumento da zona não cisalhada com o aumento do número de Bingham (Bn). Mitsoulis ainda aponta que a maioria dos fenômenos de interesse ocorrem para os casos em que $1 < Bn < 10$, quando as naturezas plástica e viscosa do material competem e que a regularização de Papanastasiou apresentou resultados satisfatórios, atribuindo também a qualidade da representação das zonas cisalhadas e não cisalhadas ao refinamento da malha.

No que tange o escoamento em regiões anulares de fluidos viscoplástico, Founargiotakis *et al.* (2008) realizam o estudo de fluidos de Herschel-Bulkley em tubos concêntricos modelados como fenda, analisando as situações de escoamento laminar, transicional e turbulento. Para isto os autores utilizaram uma combinação de equações analíticas, semi-analíticas e empíricas para descrever o escoamento e os fenômenos ocorridos neste.

Durante a execução do estudo os autores utilizaram seis conjuntos de parâmetros advindos de trabalhos de outros autores, desta forma analisaram diferentes índices de consistência, índices de potência, tensões limite de escoamento e os diâmetros da região anular. Analisando os resultados se constata que a perda de carga ao longo do tubo aumenta com o aumento da velocidade e diminui com a diminuição da relação entre os diâmetros interno e externo [$d1/d2$].

Chatzimina *et al.* (2009) realizaram um estudo que busca verificar as discrepâncias obtidas pela aproximação do escoamento de Taylor Couette de um fluido viscoplásticos, pelos modelos de lei de potência e de fluido newtoniano. Foi adotado durante o estudo como modelo para fluido viscoplástico o de Herschel-Bulkley.

Para isto eles consideram o escoamento de Taylor Couette em regime permanente, isotérmico, laminar e axissimétrico com apenas o cilindro interno rotacionando com velocidade constante e que a condição de não deslizamento é válida. As soluções para alguns valores referentes ao modelo de lei da potência foram obtidas de forma analítica, todavia a abordagem numérica foi o método de resolução predominante.

Os autores analisaram o escoamento levando em consideração duas hipóteses, a primeira o todo o fluido estaria cisalhado, já a segunda apenas parte do fluido estaria cisalhado, havendo desta forma, um raio em que haveria a transição destas zonas.

Chatzimina *et al.* (2009) concluem que a aproximação do escoamento de fluidos viscoplásticos, como o descrito pelo modelo de Herschel Bulkley, pelos fluidos newtonianos ou de lei de potência, levam a erros significantes, que tendem a aumentar com o tamanho da região anular e a tensão limite de escoamento. Esta constatação não corrobora com os resultados descritos pelo trabalho de Escudier *et al.* (2002) descritos anteriormente.

Kelessidis *et al.* (2011) estudaram de forma experimental a queda de pressão em um escoamento em região anular para um fluido de Herschel-Bulkley levando em consideração o regime laminar, de transição e turbulento, com e sem excentricidade.

Os principais resultados mostram que a queda de pressão aumenta com a vazão imposta, que a queda de pressão em situações de excentricidade esteve entre 55% e 70% do caso concêntrico, e que o fator de atrito tende a diminuir com o aumento do número de Reynolds, no entanto este comportamento muda na faixa de $3300 < Re < 3800$. Ainda os autores apontam que o fator de atrito para fluidos não-newtonianos, para qualquer relação de diâmetro, pode ser representado mais apropriadamente por $24/Re$ do que $16/Re$, que era usualmente adotado. Por fim, os indícios apontam que para um fluido não-newtoniano, o aumento da rugosidade superficial tende a aumentar a perda de pressão, especialmente nos regimes de transição e turbulento.

No que diz respeito ao escoamento de fluidos pseudoplásticos em regiões anulares, Pai e Kandasamy (2014) apresentam um estudo referente a análise

numérica do escoamento na região de entrada de um fluido de Herschel-Bulkley sem assumir o formato do perfil de velocidades dentro da camada limite. Para isto considerou-se o escoamento simétrico em relação ao eixo do canal e que o comprimento da região de entrada era o qual 99% da velocidade estava completamente desenvolvida.

Analisando os resultados numéricos obtidos, Pai e Kandasamy (2014) puderam concluir, no que diz respeito a região de entrada, que a diminuição do índice de potência acarreta na diminuição do tamanho da região de entrada. Todavia o contrário ocorre para o número de Herschel-Bulkley e para a relação entre os raios.

No que tange a queda de pressão, esta aumenta para fluidos que apresentam número de Herschel Bulkley maior, mas diminui com o aumento da relação entre os raios.

Por fim, os estudos de Pai e Kandasamy (2014) concluem que com o aumento do número de Herschel-Bulkley a velocidade diminui, no entanto se este número for muito pequeno, o perfil se torna parabólico e é possível aproximar o escoamento para um com fluido newtoniano. Ainda a velocidade tende a diminuir com o aumento da relação entre os diâmetros.

Wu e Liu (2015) em seu trabalho usaram um reômetro de Couette, com o cilindro externo estacionário e o interno rotacionando, para descrever para a calibração dos parâmetros relógicos de fluidos de Bingham tomando por base a velocidade e o torque observados no escoamento. Neste estudo os autores consideraram a condição de não deslizamento das paredes e cilindros infinitos de forma que os efeitos do fim do escoamento pudessem ser negligenciados. Ainda, as propriedades do fluido foram consideradas constantes.

Sendo assim os autores apresentam equações numéricas que retratam o perfil de velocidades de um fluido de Bingham levando em conta a existência de plugue no escoamento, sendo assim as equações permitem além de avaliar a existência de regiões de plugue, identificar a posição no raio em que a transição entre regiões não cisalhadas e cisalhadas inicia e qual o comportamento da velocidade no fluido escoando.

Por fim os autores concluem que as vantagens das equações propostas são a simplicidade e facilidade de calcular e o fato de que apresentam um erro de menos de 10% na calibração em reômetros com região anular pequena, todavia conforme o aumento da região anular a solução passa a apresentar resultados insatisfatórios.

Bicalho *et al.* (2015) realizam um estudo utilizando simulação numérica de um fluido de Herschel Bulkley para investigar a influência da vazão mássica de fluido e suas propriedades, excentricidade, rotação, e sua influência sobre a fluidodinâmica do fluido de perfuração.

As principais constatações realizadas pelos autores foram: o incremento da vazão resultou em maiores velocidades axiais e maior queda de pressão; a excentricidade tornou o perfil de velocidades assimétrico, e houveram regiões de estagnação de fluxo, isto foi potencializado com o aumento da assimetria; as quedas de pressão e velocidades aumentaram com o aumento, do que o autor chamou de índice de comportamento, uma função diretamente proporcional ao índice de potência; a rotação do eixo interno contribuiu para o aumento da velocidade axial nas regiões de menor *gap*; a introdução da rotação do cilindro interno contribuiu para a redução da queda de pressão.

Muitos artigos relacionados ao escoamento em região anular para fluidos newtonianos foram encontrados, no entanto estes não foram citados por fugirem do escopo do trabalho. Todavia foi escasso o número de trabalhos referentes a fluidos viscoplásticos, em especial os de Herschel-Bulkley.

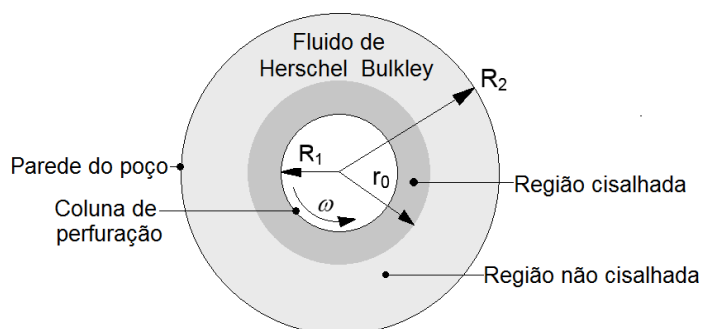
Como supracitado alguns autores trataram de estudar os efeitos relacionados ao escoamento axial, outros radial, entretanto pouco se encontra sobre a combinação de ambos.

2.1 Caracterização do problema

Para simular um poço de petróleo optou-se por empregar um modelo simplificado estudando um escoamento de Taylor-Couette com fluido de Herschel-Bulkley.

Como pode-se identificar observando a Figura 2, o cilindro interno rotaciona, enquanto o externo está estacionário. O fluido de Herschel-Bulkley estará contido em toda região anular que se encontra entre R_1 e R_2 , que representam respectivamente a coluna de perfuração e a parede do poço, considerando-se que as paredes são impermeáveis. A variável r_0 representa o raio da região não cisalhada a partir do centro do espaço anular.

Figura 2 - Geometria de trabalho



Fonte: Autoria Própria

O fluido pode conter duas regiões: a primeira próxima ao cilindro interno, na qual a tensão resultante da rotação é maior que a tensão limite de escoamento, fazendo com que o fluido escoe. A segunda região em que a tensão é menor que a tensão limite de escoamento, não deformando o fluido que tende a se comportar como um sólido.

Após caracterizar-se o problema, no tópico subsequente se apresentará os objetivos deste trabalho.

2.2 Objetivos

A partir da revisão de literatura apresentada no Capítulo 2, propõe-se estudar o escoamento de Taylor-Couette em uma geometria análoga à de um poço de perfuração de petróleo, de forma numérica através do software Ansys Fluent®.

Para o problema proposto foi analisada a formação da região não cisalhada do escoamento próximo à parede do poço com o objetivo de impedir a passagem de fluido para a formação rochosa. Tal análise foi realizada através da observação da influência da rotação da coluna de perfuração (cilindro interno) e das propriedades do fluido, nominalmente, tensão limite de escoamento, índice de potencie e índice de consistência. Além disso, informações sobre a tensão de cisalhamento na parede do cilindro externo e interno, do fator de atrito de Fanning e a influência do número de Bingham sobre a região não cisalhada também foram analisadas.

Para alcançar o objetivo geral, foram listados a seguir os objetivos específicos:

- Identificar os modelos matemáticos que descrevem o comportamento do fluido;
- Identificar a modelagem numérica que será utilizada para resolução do problema;
- Realizar a verificação do modelo de simulação com os fluidos Newtoniano, Bingham, powerlaw e Herschel-Bulkley;
- Realizar os testes de malha para identificar a malha que possua melhor relação custo computacional/resultados;
- Simular o problema proposto estudando o efeito da variação dos parâmetros do escoamento;

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os modelos matemáticos para análise do problema proposto, a modelagem numérica e as hipóteses utilizadas para solução do problema.

3.1 Modelos matemáticos

As equações necessárias para descrever o comportamento do fluido em um escoamento de Taylor-Couette são as Equações (3) e (4), ou seja, a equação da continuidade e da quantidade de movimento na sua forma vetorial respectivamente (ÇENGEL; CIMBALA 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\bar{\tau}} \quad (4)$$

Onde, ρ é a massa específica, t é o tempo, \vec{V} e \vec{g} são a velocidade e a gravidade escrita de forma vetorial respectivamente, $\vec{\nabla}$ é o operador nabla e $\vec{\bar{\tau}}$ é o tensor de tensão.

No que se refere ao tensor de tensões, cada modelo de fluido possui o próprio, já que a tensão depende do comportamento da viscosidade. Os fluidos descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley apresentam o tensor definido pela Equação (5), (MITSOULIS, 2007).

$$\vec{\bar{\tau}} = \left(m |\dot{\gamma}|^{n-1} + \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} \right) \dot{\gamma} \quad (5)$$

Onde $|\dot{\gamma}|$ é dado pela Equação (6). (MITSOULIS, 2007)

$$|\dot{\gamma}| = \left[\frac{1}{2} \{ \vec{\bar{\gamma}} : \vec{\bar{\gamma}} \} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Em que $\overline{\dot{\gamma}}$ é o tensor simétrico de taxa de deformação.

No que diz respeito a viscosidade o modelo utilizado é o de Biviscosidade disponível no Ansys Fluent® (ANSYS, 2017), que é descrito pela Equação (7).

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + m\dot{\gamma}^{n-1}, \quad \text{para } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\tau_0 \left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)}{\dot{\gamma}_c} + m(\dot{\gamma}_c)^{n-1} \left[(2-n) + (n-1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right], \quad \text{para } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c$$

onde, η é a viscosidade aparente e $\dot{\gamma}_c$ é a taxa de deformação crítica.

Este modelo tem como função eliminar as descontinuidades referentes a viscosidade do fluido, assim como a regularização de Papanastasiou anteriormente citado e é válido tanto para o fluido de Bingham quanto o de Herschel-Bulkley (ANSYS, 2017).

O número de Bingham (Bn), como supracitado na seção 1, expressa uma relação entre as tensões limite de escoamento e de cisalhamento. Este aplicado em um escoamento de Taylor-Couette, segundo Chatzimina et al. (2009), é dado pela Equação (8), (SOTO *et al.* 2010).

$$Bn = \frac{\tau_0}{m\omega^n} \quad (8)$$

Para o problema proposto, é necessário levar em consideração as seguintes hipóteses:

1. Fluido incompressível;
2. Escoamento permanente;
3. Escoamento axissimétrico;
4. Escoamento isotérmico;
5. Parede da formação rochosa é impermeável;
6. Movimento do fluido acontece devido à rotação da coluna de perfuração apenas.

7. Condição de não deslizamento na coluna de perfuração e na parede da formação rochosa.

Estas condições podem ser descritas matematicamente como mostra o Quadro

1.

Quadro 1 - Hipóteses simplificadoras e condições de contorno

Variável	Hipótese/ condição de contorno
ρ	cte
$\frac{\partial(\)}{\partial t}$	0
$\frac{\partial(\)}{\partial \theta}$	0
T	cte
$\frac{\partial u}{\partial z}$	0
$v_{\theta}(R_1)$	ωR_1
$v_{\theta}(R_2)$	0

Fonte: Autoria própria

O domínio computacional do problema analisado é coerente com os valores encontrados em trabalhos desenvolvidos no campo do estudo de poços de petróleo. Bicalho *et al.* (2015), por exemplo utilizou em seus estudos os valores de 4,5 in (0,1143 m) 8,75" (0,2223 m) e 0,5 m para o diâmetro interno, externo e comprimento respectivamente e utilizou uma faixa de rotação entre 3,4 rad/s e 20,94 rad/s. Sendo assim, para esta análise adotou-se os valores de 5,5 in (0,1397 m) e 8,5 in (0,2159 m) para os diâmetros interno e externo respectivamente e 0,1 m para o comprimento. Os valores de rotação adotados para estudo variam de 3 rad/s a 7 rad/s.

3.2 Modelagem numérica

Para a resolução dos problemas foi utilizado o *software* Ansys Fluent® segue três passos para a solução das equações governantes:

Divisão do domínio em volumes de controle discretos; Integração das equações governantes em cada volume de controle para construir uma gama de equações algébricas para as variáveis desejadas; Linearização das

equações discretizadas, e solução do sistema de equações, de forma que as variáveis desejadas sejam atualizadas. (FERZIGER; PERIC, 2002 apud VAYSSADE, 2015, p.115)

Nesta etapa investigou-se das opções de métodos de solução apresentados no Ansys Fluent®, quais os mais indicados para o estudo. Para isto realizaram-se simulações de fluidos Newtoniano, de Bingham e de Herschel-Bulkley comparando os resultados com os encontrados na literatura. As opções apresentadas pelo software podem ser constatadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Métodos de solução apresentados pelo software ANSYS FLUENT

Acoplamento de Pressão-Velocidade		SIMPLE
		SIMPLEC
		PISO
		Coupled
Discretização espacial	Gradiente	Green-Gauss Cell Based
		Green-Gauss Node Based
		Least Squares Cell Based
	Pressão	Second Order
		Standard
		PRESTO!
		Linear
		Body Force Weighted
	Momento	First Order Upwind
		Second Order Upwind
		Power Law
		QUICK
		Third-Order MUSCL

Fonte: Autoria Própria

Os métodos de solução padrões do software são o SIMPLE, para o acoplamento de pressão-velocidade, *Last Squares Cell Based* para o gradiente, *Second Order*, para a pressão e o *Second Order Upwind* para o momento, sendo assim estes foram os métodos utilizados inicialmente. Para mais informações sobre cada método indica-se a leitura do manual do software Ansys Fluent® (2017) e Patankar (1980).

3.3 Geometria de estudo e malha

Em um primeiro momento desenhou-se no *software* SolidWorks® cilindros concêntricos que representam o problema a ser estudado. Subsequentemente foi utilizado o *software* ICEM para criação da malha e o *software* Ansys Fluent® para realização das simulações de dinâmica dos fluidos computacional (do inglês Computational Fluid Dynamics – CFD)

Para garantir que o *software* é capaz de solucionar o problema a ser estudado, realizou-se em um primeiro momento a verificação do modelo computacional de simulação. Ainda se testou, com a esta verificação, os fatores de relaxação, que segundo o que se constatou, influenciam na velocidade com que a simulação ocorre, sendo que os valores de relaxação mais altos resultam em iterações mais velozes.

Os valores padrões destes fatores no *software* são de 0,3 para a pressão, 1 para densidade e força de corpo e 0,7 para o momento.

Ainda, durante os testes com os demais fluidos analisou-se a relação entre o refinamento da malha e a qualidade dos resultados, de forma que posteriormente, quando se realizou os testes de malha, para se definir o número de volumes de controle da malha final, já havia informação suficiente para escolher uma faixa apropriada de testes a serem feitos.

Após a verificação do modelo de simulação, tendo-se definido os métodos de solução, os fatores de relaxação e conhecendo o número de volumes de controle que melhor representou os problemas previamente estudados realizou-se os testes de malha.

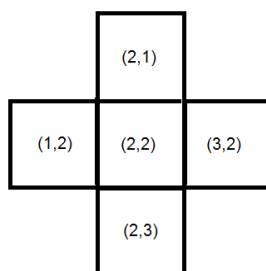
Seguindo padrões gerais de trabalhos numéricos, o teste foi considerado satisfatório quando apresentou diferença de no máximo 5% no valor do raio que representa a posição de transição entre a zona cisalhada e não cisalhada, entre as simulações e as soluções analíticas e numéricas.

Sendo assim, a malha escolhida foi a que apresentou os resultados mais satisfatórios no que tange tanto a velocidade de simulação e a diferença de resultados com os valores de referência.

No que diz respeito a malha, vale ressaltar esta foi estruturada, tendo em vista que neste tipo de malhas os elementos são numerados consecutivamente sendo que são necessárias duas ou três informações para a localizar a malha, dependendo se os elementos são bidimensionais ou tridimensionais. Na malha estruturada a

numeração de um elemento ao redor de um outro determinado elemento varia com ± 1 como destaca a Figura 3, (GONÇALVES, 2007).

Figura 3 – Localização dos elementos de malha



Fonte: Autoria própria

Sendo assim, a relação simples entre uma malha e outra permite uma programação e uma matriz de sistema de equações mais simples e regular, reduzindo assim o custo computacional e permitindo uma maior convergência das soluções, (GONÇALVES, 2007).

3.4 Verificação do modelo e teste de malha

A fim de validar o modelo de simulação referente ao *software* Ansys Fluent ® decidiu-se realizar simulações para verificar os valores encontrados nas soluções analíticas e numéricas referentes a fluidos newtoniano e de Bingham com diferentes configurações de malha.

Posteriormente os testes de malha serão realizados para o fluido de Herschel-Bulkley.

3.4.1 Fluido Newtoniano

A fim de verificar os resultados referentes ao perfil de velocidade das simulações com fluidos newtonianos, em um primeiro momento deduziu-se a solução analítica para o escoamento de Taylor- Couette com o cilindro interno rotacionando e o cilindro externo estacionário.

Partindo-se das equações da continuidade (3) e da quantidade de movimento (4) na sua forma cilíndrica e utilizando as hipóteses simplificadoras de regime permanente, escoamento incompressível, propriedades e fluxo constante na direção z e escoamento axissimétrico obteve-se a Equação (9), (FOX *et al.*, 2010).

$$v_{\theta}(r) = \frac{\omega r}{\left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2\right]} - \frac{\omega R_2^2}{\left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2\right]} r \quad (9)$$

Onde $v_{\theta}(r)$ é o perfil de velocidade em relação a coordenada θ em função de r , ω é a velocidade angular, r o raio, R_1 o raio do cilindro interno e R_2 é o raio do cilindro externo.

Todavia esta dedução não prevê a existência de instabilidades no escoamento, desta forma deve-se verificar o número de Taylor para encontrar, em função das características da geometria do problema e do fluido utilizado, a velocidade limite em que as estabilidades tenham início. O número de Taylor segundo White (2001) é dado pela Equação (10).

$$Ta_{crit} = \frac{R_1(R_2 - R_1)^3 \omega^2}{\nu^2} \quad (10)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.

De acordo com a literatura de White (2001), as instabilidades no escoamento têm início quando o número de Taylor for maior ou aproximadamente igual a 1700.

Desta forma, tomou-se por base a geometria de estudo proposta por Zhou *et al.* (2012) para a realizar da validação, os autores propõem uma região de escoamento em que os raios dos cilindros internos e externos são $R_1 = 100$ mm e $R_2 = 110$ mm respectivamente, e seu comprimento é de $L = 98,5$ mm.

O fluido escolhido para o estudo do caso foi a água e sua viscosidade cinemática a 25°C é de $8,96 \text{ E } -7 \text{ m}^2/\text{s}$ de acordo com Fox *et al.* (2010).

No que diz respeito a velocidade angular utilizada, propôs-se duas situações, a primeira em que não ocorresse instabilidades para que se pudesse comparar com a

solução analítica e a segunda com instabilidades a fim de mostrar que o perfil de velocidade seria distinto do referente a solução analítica.

Sendo assim assumiu-se as velocidades angulares de 0,1 rad/s e 0,2 rad/s que resultaram em número de Taylor igual a $Ta = 1245,62$ e $Ta = 4982,46$ respectivamente.

Para realizar as simulações propôs-se a utilização de quatro malhas diferentes, sendo que a configuração destas podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Quantidade de volumes de controle em cada direção

Malha	Z	R	θ
1	20	10	80
2	20	20	80
3	20	30	80
4	20	50	80

Fonte: Autoria Própria

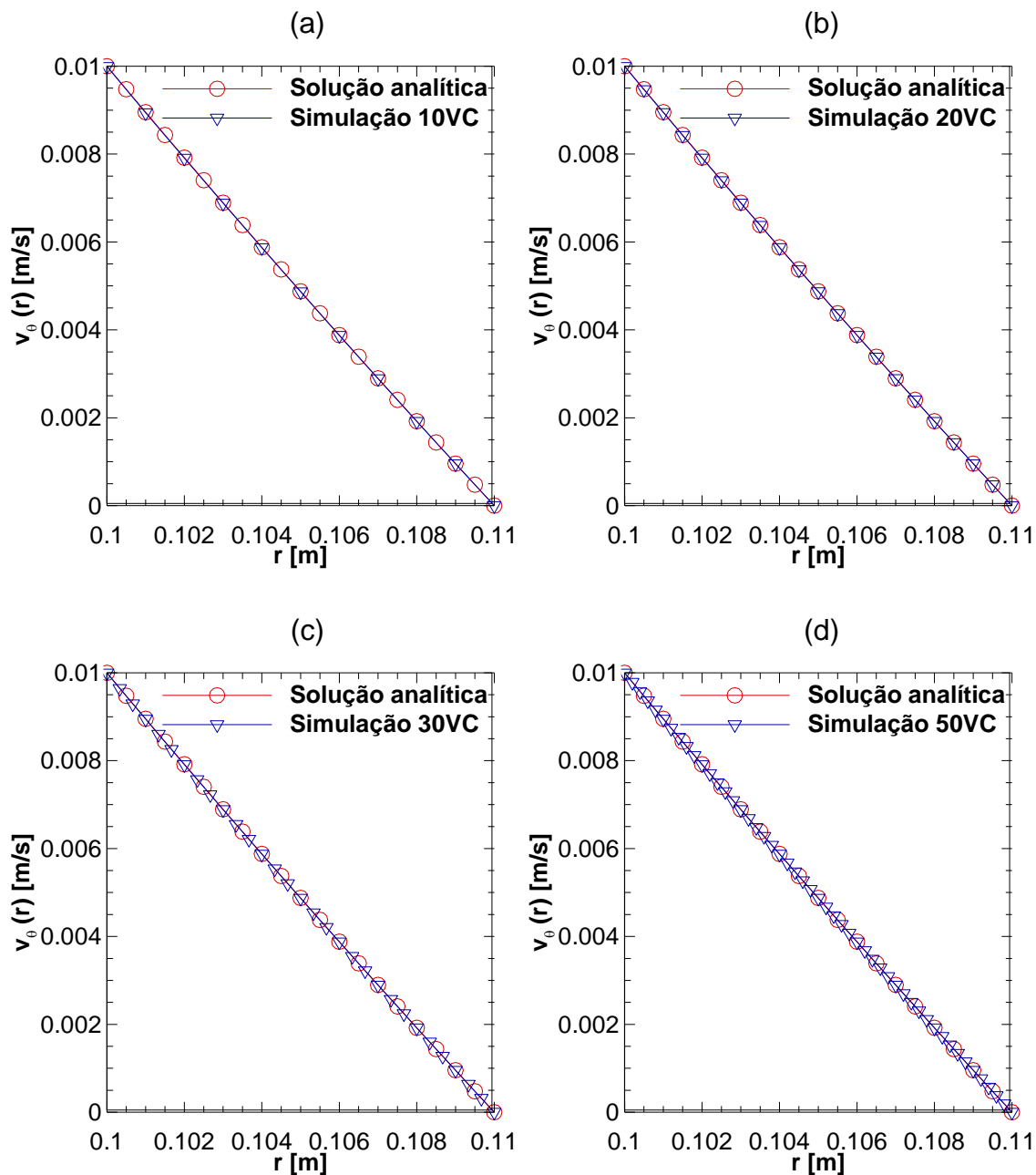
Em um primeiro momento foi simulado o escoamento para ambas as velocidades angulares com a primeira malha, e subsequentemente com as malhas posteriores, desta forma pode-se analisar se o aumento de volumes de controle afetará no resultado obtido.

Optou-se por alterar apenas a quantidade de volume de controle no sentido do raio pois não há gradiente de pressão na direção Z e o escoamento é axissimétrico, desta forma a direção angular não afetará o perfil de velocidade.

No que diz respeito aos métodos de solução, utilizou-se os padrões do software Ansys Fluent®, tendo em vista que o problema envolvendo fluido newtoniano é relativamente simples, sendo assim julgou-se estes eram suficientes. Estes métodos foram o *SIMPLE* para o acoplamento de pressão-velocidade, *Least Squares Cell Based* para o gradiente, *Second Order* para a pressão e *First Order Upwind* para o momento, sendo que estes 3 últimos dizem respeito a discretização espacial.

Os resultados para as simulações referente a velocidade de 0,1 rad/s podem ser constatadas na Figura 4.

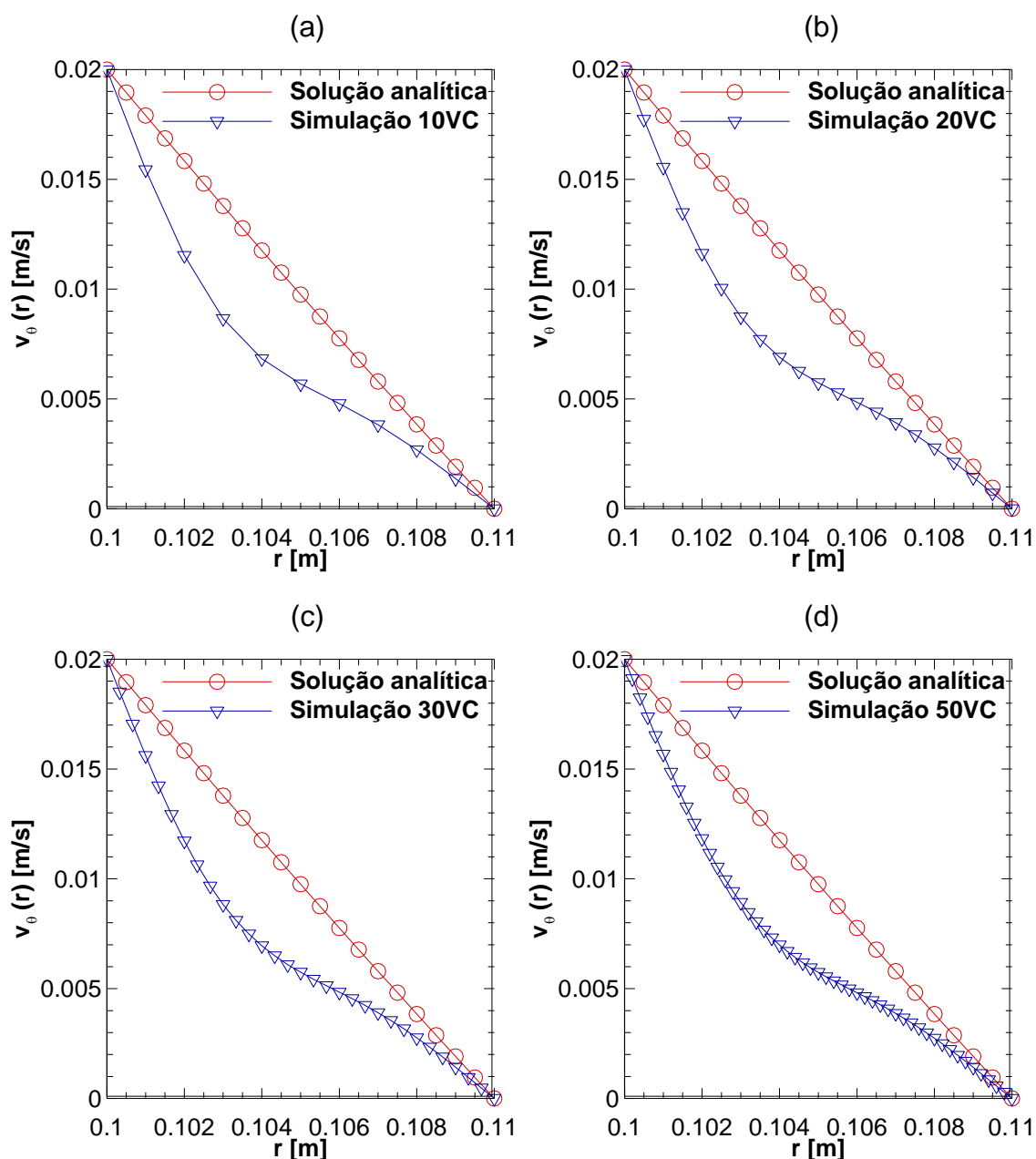
Figura 4 - Resultados para velocidade angular de 0,1 rad/s para malhas de (a) 10, (b) 20, (c) 30 e (d) 50 volumes de controle.



Fonte: Autoria Própria

Subsequentemente utilizou-se as mesmas malhas para identificar o perfil de velocidade com instabilidades no escoamento. Os resultados podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 - Resultados para velocidade angular de 0,2 rad/s para malhas de (a) 10, (b) 20, (c) 30 e (d) 50 volumes de controle.



Fonte: Autoria própria

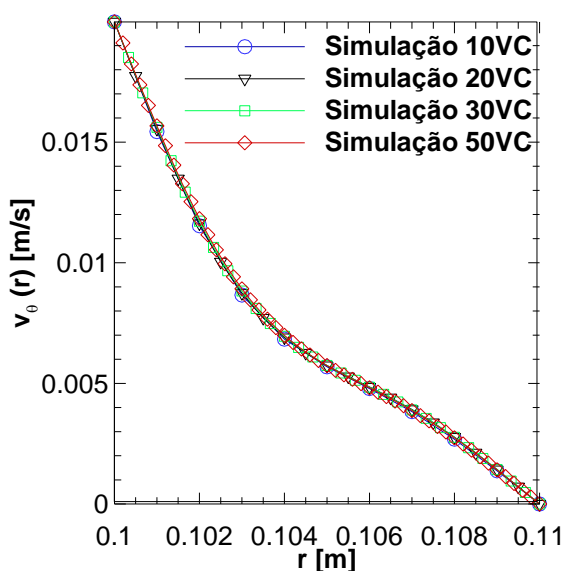
Considerou-se como critério de convergência quando a simulação apresentou um resíduo numérico para a massa de pelo menos 10^{-6} .

Como pode-se observar na Figura 4, o resultado referente o perfil de velocidade no escoamento de Taylor-Couette sem a existência de instabilidades não se modificou com o aumento do número de volumes de controle no sentido do raio, e desde a primeira malha condisse com a solução analítica.

O fato de não necessitar de uma malha mais refinada, como a última simulação em que se utilizou 50 volumes de controle no sentido do raio, se dá pelo fato deste ser um problema relativamente simples por se tratar de um comportamento linear do perfil de velocidades.

Todavia, como pode-se constatar na Figura 5, a existência de instabilidades no escoamento fez com que o perfil de velocidades divergisse da solução analítica encontrada ao resolver as equações de Navier Stokes. Entretanto o aumento do número de volumes de controle não resultou em uma diferença significativa nos perfis de velocidade, que podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 - Comparação dos resultados obtidos pelas diferentes malhas



Fonte: Autoria própria

Como pode-se constatar observando-se a Figura 6, a diferença entre as diferentes malhas não é significativa, desta forma a malha com 10 volumes de controle é suficiente para resolver este problema.

3.4.2 Fluido de Bingham

Como mencionado no Capítulo 1 os fluidos de Bingham são viscoplásticos, pois necessitam que uma tensão mínima seja aplicada para que eles comecem a escoar. Sendo assim se a tensão aplicada for menor que a tensão limite de escoamento

ocorrem regiões onde o fluido não escoa, ou também chamadas de região de plugue (CHABRA, 2007).

Desta forma as simulações se dividiram em dois casos, a primeira para a situação onde o fluido escoa por completo e a segunda a fim de demonstrar as regiões de plugue.

Bird *et al.* (1983) aponta em seus estudos a solução analítica no que diz respeito ao perfil de velocidades para escoamento de Taylor-Couette de um fluido de Bingham que escoa totalmente, sendo as condições de contorno o cilindro externo rotacionando devido a aplicação torque e o cilindro interno parado. Esta solução pode ser observada na Equação (11)

$$\frac{v_{\theta}}{r} = \omega + \frac{Tr}{4\pi L\mu_0 R^2} \left[1 - \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right] - \frac{\tau_0}{\mu_0} \ln \frac{r}{R} \quad (11)$$

Onde v_{θ} é a velocidade em theta que é função do raio, r é a variável da função que representa o raio, L é o comprimento do cilindro, R é o raio externo do cilindro, τ_0 é a tensão limite de cisalhamento, Tr é o torque aplicado no cilindro externo e μ_0 é a viscosidade do fluido.

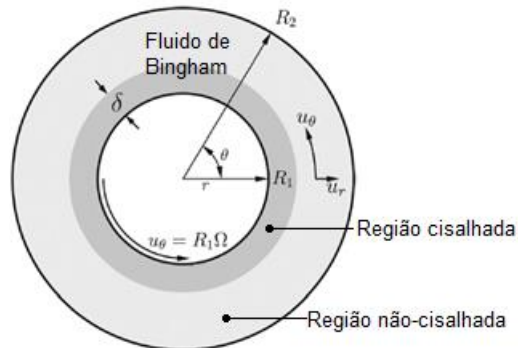
A relação entre a velocidade angular ω e o torque Tr é dada pela Equação (12), (BIRD *et al.*, 1983).

$$\omega = \frac{Tr}{4\pi L\mu_0 R^2} \left[\frac{1}{\kappa^2} - 1 \right] + \frac{\tau_0}{\mu_0} \ln \kappa \quad (12)$$

Onde κ é a relação entre o diâmetro interno e externo.

Wu e Liu (2015) em contrapartida em seus estudos discutem equações que definem quando o escoamento possuirá região não cisalhada e onde esta se localizará na região anular, como pode se observar na Figura 7.

Figura 7 - Representação do escoamento de Taylor-Couette, com rotação do cilindro interno de um fluido de Bingham, com a existência de plugue



Fonte: Wu e Liu (2015, p.2)

Para isto os autores definem o número de Bingham e o número de Bingham crítico pelas Equações (13) e (14) respectivamente.

$$Bn = \frac{\tau_0}{\mu_0 \omega} \quad (13)$$

$$Bn_{crit} = \frac{2}{\alpha^2 - 1 - 2 \ln \alpha} \quad (14)$$

Onde α é a relação entre o raio externo e o raio interno (R_2/R_1).

Combinando os conceitos do número de Bingham e do número de Bingham crítico Wu e Liu (2015) definem a velocidade angular crítica, que é o valor mínimo para que todo o fluido de Bingham esteja cisalhado em toda a região anular. A expressão para a velocidade crítica pode ser observada na Equação (15).

$$\omega_{cr} = \frac{\tau_0}{\mu Bn_{bcrit}} = \frac{\tau_0}{2\mu} (\alpha^2 - 1 - 2 \ln \alpha) \quad (15)$$

Posteriormente, os autores apresentam uma relação entre o número de Bingham e δ , que como mostra a Figura 7, é a espessura da camada cisalhada de fluido.

$$\frac{\mu \omega}{\tau_0} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\delta}{R_1} \right)^2 - \frac{1}{2} - \ln \left(1 + \frac{\delta}{R_1} \right) \quad (16)$$

Por fim os autores definem o perfil de velocidades na região em que não há plugue.

$$v_{\theta}^* = r^* + Br \left(\ln r^* + \frac{\Delta^2}{2} \left(\frac{1}{r^{*2}} - 1 \right) \right) \quad (1 \leq r \leq \Delta) \quad (17)$$

$$v_{\theta}^* = 0 \quad (\Delta \leq r^* \leq \alpha)$$

Onde $v_{\theta}^* = \frac{v_{\theta}}{R_1 \omega}$, $r^* = \frac{r}{R_1}$ e $\Delta = 1 + \left(\frac{\delta}{R_1} \right)$.

Sendo assim definiram-se duas situações, a primeira em que o fluido está totalmente cisalhado e a segunda com a existência de plugue.

Para o primeiro caso utilizou-se a mesma geometria empregada nos testes referentes ao fluido newtoniano. Ainda se empregou para estudo o fluido de polietileno encontrado na literatura de Bird *et al.* (1983), cujas propriedades são: $\tau_0 = 46,7$ Pa e $\mu_0 = 8780$ Pa.s.

Aplicando estes valores na Equação (15) encontrou-se uma rotação crítica de $\omega_{cr} = 5,15 \cdot 10^{-5}$ rad/s, sendo assim a rotação escolhida do cilindro externo foi de $\omega = 5 \cdot 10^{-4}$ rad/s, desta forma todo o fluido estaria cisalhado.

Para as simulações referentes a esta condição de escoamento utilizou-se os mesmos métodos de solução utilizados para os testes com o fluido newtoniano, assumindo novamente os critérios de convergência da solução com resíduos para massa na escala de 10^{-6} . As malhas utilizadas são mostradas no Quadro 4.

Quadro 4 - Quantidade de volumes de controle utilizados em cada malha para simulação do caso do fluido de Bingham sem a formação de plugue

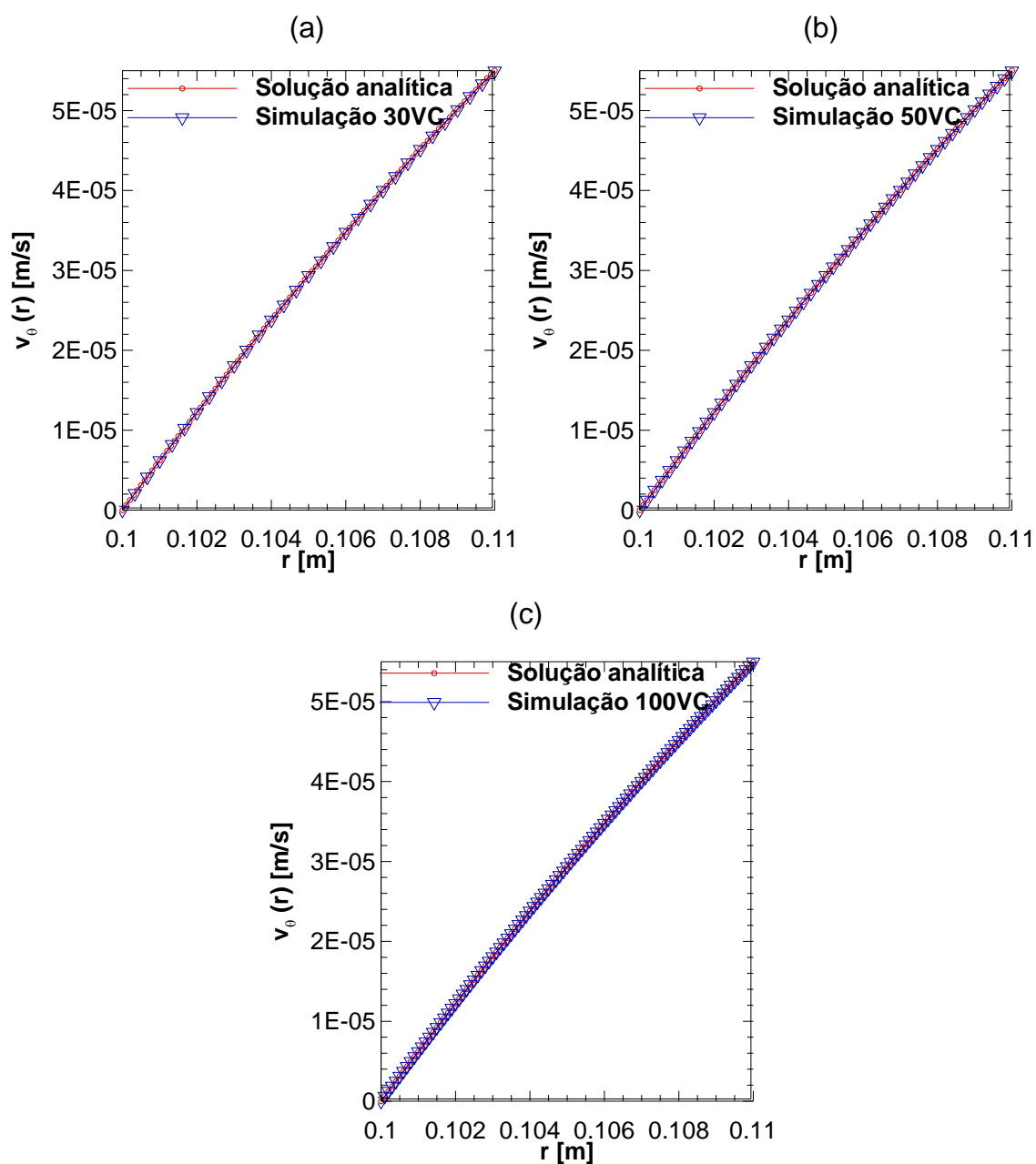
Malha	Z	R	θ
1	20	30	80
2	20	50	80
3	20	100	80

Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar na Figura 8, todas as malhas foram refinadas o suficiente para que os perfis resultantes das simulações coincidisse com os perfis previstos pela solução analítica, desta forma não se faz necessário, para este caso, o

uso de uma malha tão refinada quanto a última, tendo em vista que a sua utilização apenas acarretará em custo computacional.

Figura 8 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Bingham sem a formação de plug para malhas de (a) 30, (b) 50 e (c) 100 volumes de controle.



Fonte: Autoria própria

Para o caso com plugue utilizou-se uma nova geometria em que a região fosse maior para facilitar a identificação do início da região não cisalhada. Tal geometria

consiste em dois cilindros concêntricos com $R_1 = 0,1$ m e $R_2 = 0,2$ e comprimento de $L = 0,1$ m.

O mesmo fluido de Bingham foi utilizado, e aplicando os valores na Equação (15) obteve-se uma velocidade angular crítica de $\omega_{cr} = 4,29 \cdot 10^{-3}$ rad/s, sendo assim escolheu-se uma velocidade angular de $\omega = 1,00 \cdot 10^{-4}$ rad/s de modo que se garantisse a formação de plugue.

Resolvendo-se agora a Equação (16) encontrou-se um valor de $\delta = 14,10$ mm, ou seja, espera-se que em $r = 114,10$ mm a velocidade do escoamento radial se torne nula, caracterizando o plugue.

Utilizou-se três malhas diferentes com configurações que podem ser observadas no Quadro 5 .

Quadro 5 - Configuração das malhas para estudo do escoamento de Taylor-Couette para o fluido de Bingham com a presença de plugue

Malha	Z	R	θ
1	20	50	80
2	20	100	80
3	20	200	80

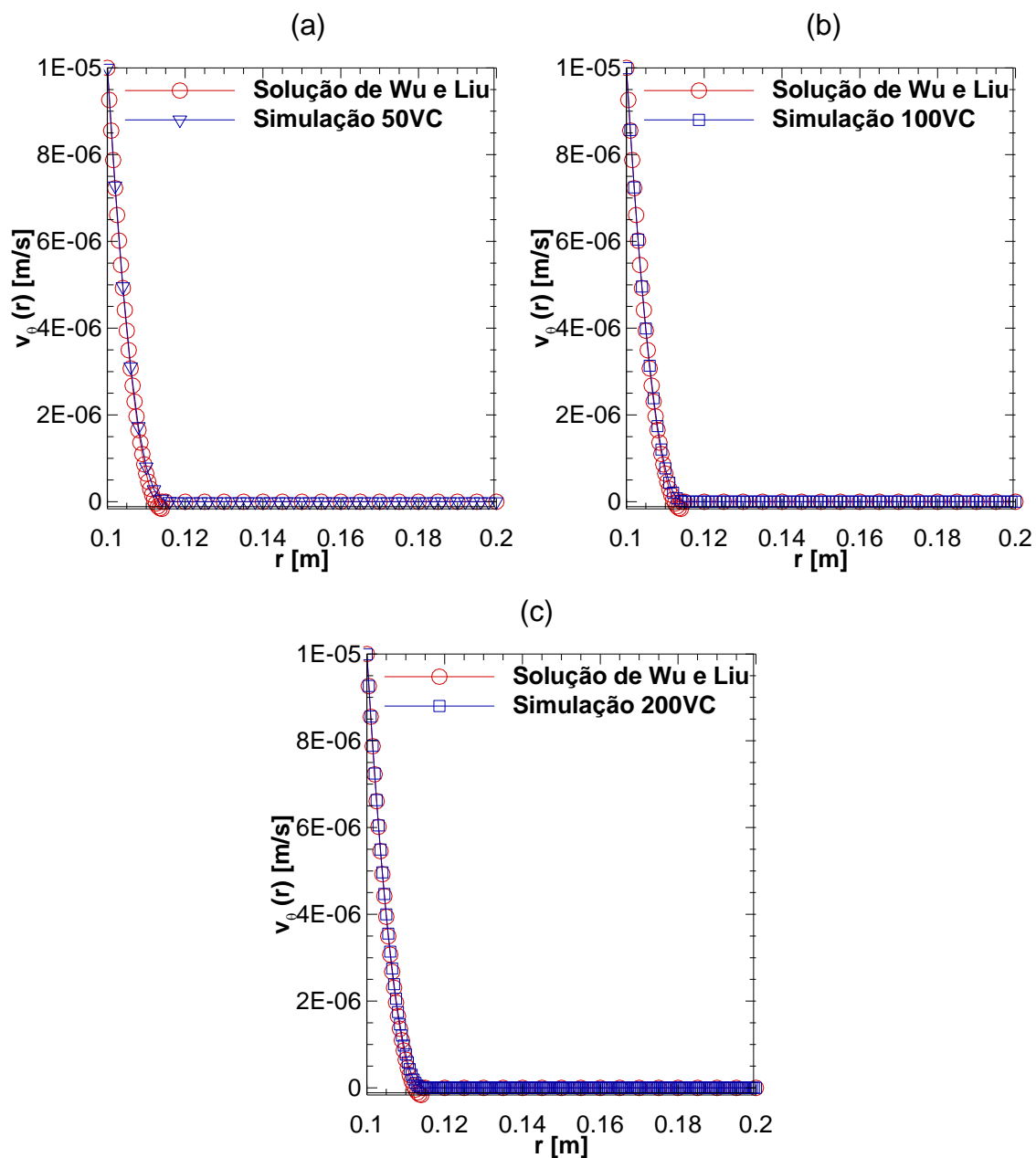
Fonte: Autoria própria

Para as simulações referentes a esta condição de escoamento utilizou-se os mesmos métodos de solução utilizados para os testes com o fluido newtoniano.

Observando os resultados obtidos na Figura 9, constata-se que todas as malhas resultaram em um perfil de velocidades que coincide com a solução apresentada por Wu e Liu (2015), entretanto, no que diz respeito a distinção do início da camada de plugue houve diferença nas simulações.

Deve-se salientar que nenhuma das simulações apresentou valor de velocidade nula nas regiões de plugue, todavia os valores ficaram na ordem de grandeza de 10^{-10} a 10^{-14} m/s, sendo assim, considerou-se para efeito de comparação que velocidades da ordem de 10^{-11} m/s podem ser consideradas nulas.

Figura 9 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Bingham com formação de plug para malhas de (a) 50, (b) 100 e (c) 200 volumes de controle.



Fonte: Autoria própria

A malha com 50 volumes de controle no sentido do raio apresentou seu primeiro resultado nesta ordem de grandeza em $v_{\theta}(0,120) = 1,47 \cdot 10^{-11}$ m/s. Já a malha com 100 e 200 volumes de controle resultaram em $v_{\theta}(0,117) = 2,24 \cdot 10^{-11}$ m/s e $v_{\theta}(0,115) = 8,92 \cdot 10^{-11}$ m/s respectivamente.

Como supracitado, esperava-se que em $r = 114,1$ mm a região não cisalhada tivesse início, sendo assim a malha com 200 volumes de controle se aproximou mais

da solução esperada com uma diferença relativa de 0,78%, sendo que a malha com 100 e 50 volumes de controle apresentaram uma diferença relativa de 2,54% e 5,17% respectivamente.

3.4.3 Fluido de Herschel-Bulkley

Chatzimina et al. (2009) em seu estudo propõe soluções numéricas para o escoamento de Taylor- Couette completamente cisalhado e com plugue para o fluido de Herschel-Bulkley. Todavia as soluções apresentadas estão limitadas a apenas alguns índices de power-law.

Para o escoamento com fluido totalmente cisalhado com índice de potência $n=1/2$ o perfil de velocidades é representado pela Equação (18).

$$v_{\theta}^* = \left[1 - Bn^2 \left\{ \frac{c^2}{4} \left(1 - \frac{1}{r^{*4}} \right) - c \left(1 - \frac{1}{r^{*2}} \right) + \ln r^* \right\} \right] r^* \quad (18)$$

Onde $r^* = \frac{r}{R_1}$, $v_{\theta}^* = \frac{v_{\theta}}{\omega R_1}$, já c e Bn são representados pelas equações (19) e (8) respectivamente.

$$c = \frac{2R_2^{2*}}{R_2^{2*} + 1} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{1 + R_2^{2*}}{1 - R_2^{2*}} \left(\ln R_2^* - \frac{1}{Bn^2} \right)} \right] \quad (19)$$

$$\text{em que } R_2^* = \frac{R_2}{R_1}.$$

Já no que diz respeito ao escoamento parcialmente cisalhado, ou seja, com a formação de plugue, ainda com o índice de potência $n = 1/2$, o perfil de velocidades é dado pela Equação (20).

$$v_{\theta} = r^* \left[1 - Bn^2 \left\{ \ln r^* - r_0^{*2} \left(1 - \frac{1}{r^{*2}} \right) + \frac{r_0^{*4}}{4} \left(1 - \frac{1}{r^{*4}} \right) \right\} \right] \quad (20)$$

Para $1 \leq r^* \leq r_0^*$

Onde $r_0^* = \frac{r_0}{R_1}$, e r_0 representa a posição do raio em que começa a região de plugue, e pode ser encontrado resolvendo a Equação (21)

$$Bn^2 = \frac{4}{-4r_0^4 + r_0^4 + 4\ln r_0 + 3} \quad (21)$$

Tendo em vista que o fluido de Herschel-Bulkley pode ser entendido como uma combinação das características dos fluidos de Bingham e de lei de potência, já que possui uma tensão limite de escoamento e sua viscosidade varia de forma exponencial, é razoável tomar como quantidade de volume de controle inicial para o teste de malha, a mesma do caso de Bingham com existência plugue, que dos casos já estudados fora o crítico.

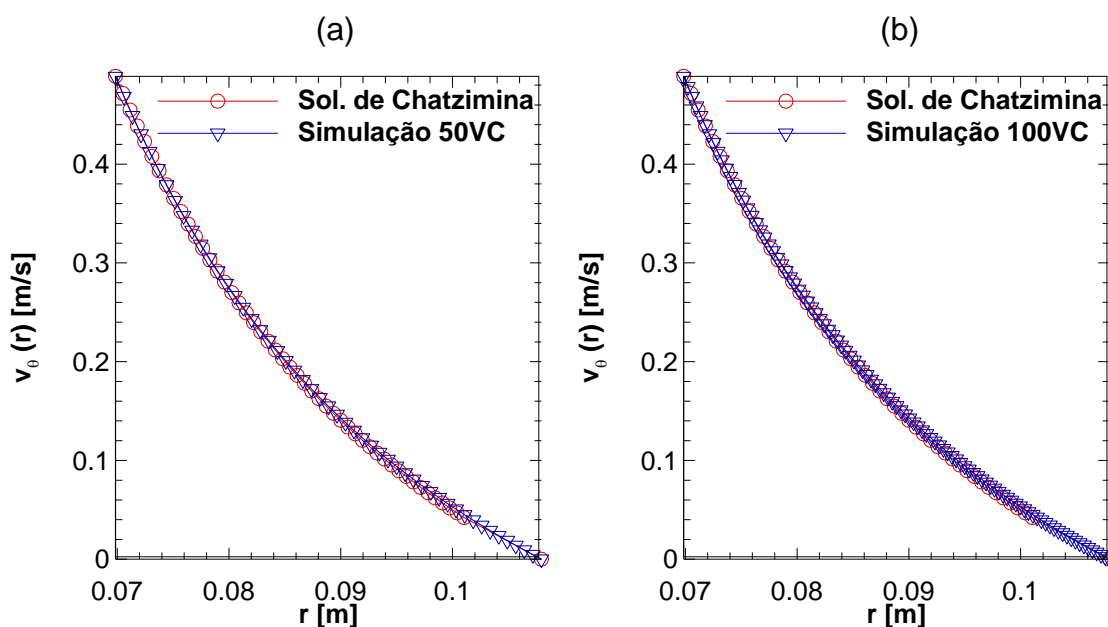
Sendo assim, utilizou-se para os testes a geometria do poço de 5,5 in (0,1397 m) e 8,5 in (0,2159 m) para os diâmetros interno e externo respectivamente e 0,1 m para o comprimento, fluido de Herschel-Bulkley com propriedades $\tau_0 = 2,493$ Pa e $m = 250$ Pa.sⁿ e $n = 0,5$ e os métodos de solução não foram alterados.

Para o caso do fluido totalmente cisalhado utilizou-se velocidade angular $\omega = 7$ rad / s que resulta em um número de Bingham $Bn = 3,77 \cdot 10^{-3}$.

Sendo assim pode-se observar na Figura 10 o resultado das simulações referentes as malhas de 50 e 100 volumes de controle, e como pode-se constatar ambas as malhas foram capazes de resultar em perfis condizentes com a solução proposta por Chatzimina et al. (2009).

Desta forma, levando em conta que o perfil de velocidades não se alterou com o aumento do número de volumes de controle, 50 volumes de controle no sentido do raio são suficientes para descrever o comportamento do fluido, quando este está totalmente cisalhado.

Figura 10 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Herschel-Bulkley sem a formação de plugue para malhas de (a) 50 e (b) 100 volumes de controle.



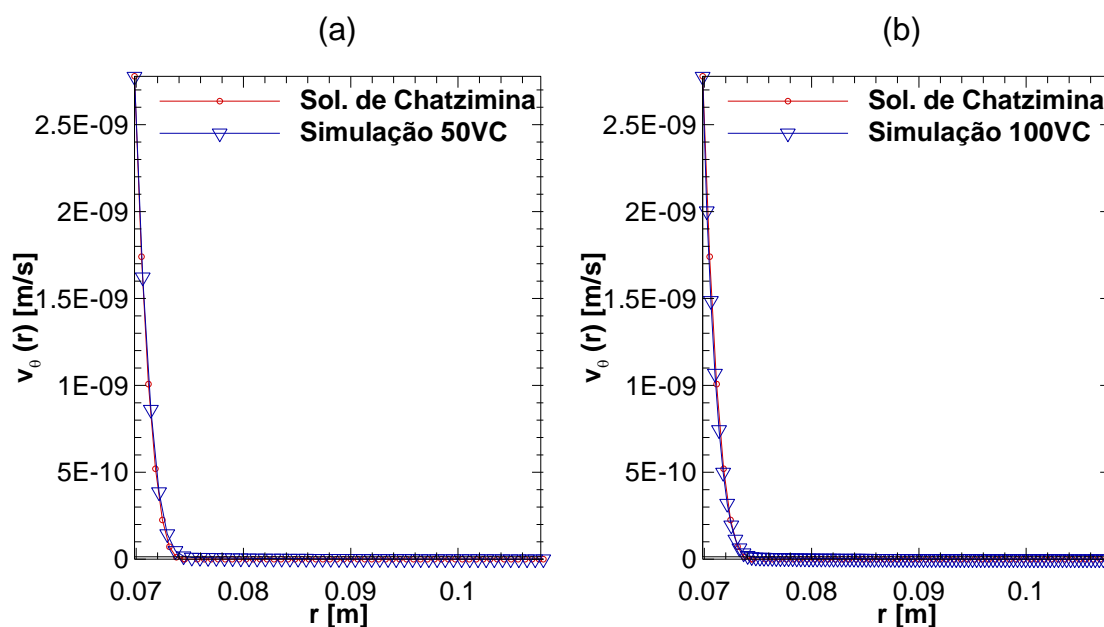
Fonte: Autoria própria

Já para o caso em que há região de plugue, utilizou-se velocidade angular de $\omega = 3,98 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s}$, que resulta em um número de Bingham $Bn=50$. Ainda, resolvendo a Equação (21) obtém-se um valor de $r_0 = 74,52 \text{ mm}$.

A Figura 11 apresenta o resultado das simulações com 50 e 100 volumes de controle em relação ao raio respectivamente, e assim como observado no caso do fluido de Bingham, ambas as malhas corresponderam bem no que diz respeito ao fluido escoando, todavia apresentaram diferença no que tange a distinção do início da região de plugue.

Considerando-se valores da magnitude de 10^{-12} como nulos, a malha com 50 volumes de controle resultou em $r_0 = 75,90 \text{ mm}$ o que representa uma diferença relativa de 1,91% com a solução proposta por Chatzimina et al. (2009). Por sua vez, a malha com 100 volumes de controle apresentou resultados de $r_0 = 75,18 \text{ mm}$, o equivalente a uma diferença relativa de 0,88%.

Figura 11 - Resultado do perfil de velocidade para o fluido de Herschel-Bulkley com a formação de plugue para malhas de (a) 50 e (b) 100 volumes de controle.



Fonte: Autoria própria

Tendo em vista que a diferença entre os resultados obtidos pelas malhas não foi expressivo, propôs-se a simulação com uma malha intermediária com 75 volumes de controle no sentido do raio, afim de reduzir o tempo das simulações.

O resultado obtido foi de $r_0 = 75,44$ mm com uma diferença relativa de 1,23%. Sendo assim definiu-se como a malha adequada para os estudos propostos a que possui 75 volumes de controle no sentido do raio (r), 80 no sentido do deslocamento angular (θ) e 20 no sentido do comprimento (z), já que apresentou resultados com diferença relativa menor que 1,5% em relação a solução proposta por Chatzimina et al. (2009), e além disso diminuiu tempo de simulações em relação a malha com 100 volumes de controle.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de se analisar a influência da rotação da coluna de perfuração (cilindro interno), índice de potência, índice de consistência e tensão limite de escoamento do fluido sobre a região não cisalhada do escoamento, o perfil de velocidades, a tensão de cisalhamento na parede dos cilindros e o fator de atrito de Fanning, realizou-se simulações com diferentes configurações de fluidos.

O Quadro 6 mostra resumidamente quais foram as configurações usadas para estudo, considerando um fluido com massa específica $\rho = 1318,09 \text{ kg/m}^3$, encontrado na literatura de Osman e Aggour (2003).

Quadro 6 - Configurações de fluidos utilizados no estudo

τ (Pa)	n	m (Pa.s ⁿ)	ω (rad/s)
ω variando			
60	0,5	10	3
			7
m variando			
60	0,5	5	3
		10	
		20	
n variando			
60	0,5	5	3
	0,6		
	0,8		
τ_0 variando			
40	0,5	10	3
60			

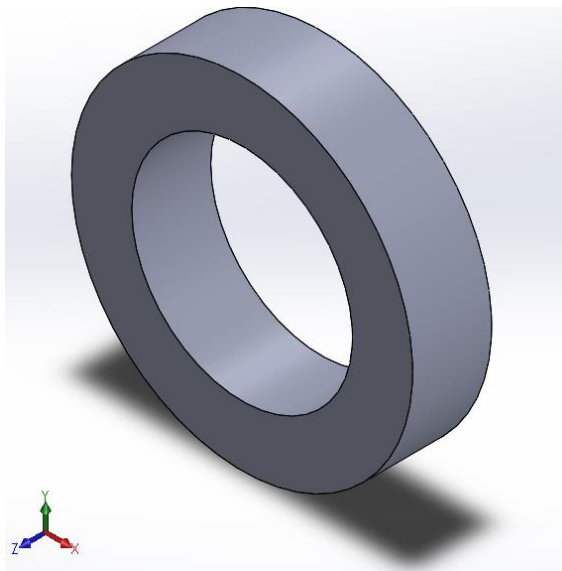
Fonte: Autoria própria

Cabe ressaltar que se considerou que a solução havia convergido em duas situações, a primeira quando todos os resíduos numéricos apresentaram valores na magnitude de 10^{-6} , ou quando os perfis observados permaneceram constantes no intervalo de 2000 iterações.

Todos os resultados obtidos foram retirados de uma linha que passa pelos pontos (0,06985; 0; 0,05) e (0,10795; 0; 0,05) sendo estes valores em metros, e os

eixos x e y apontam na direção do raio dos cilindros e o eixo z na direção do comprimento como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Localização dos eixos x , y e z



Fonte: Autoria própria

É válido ressaltar que como o escoamento é axissimétrico, a posição dos eixos x e y , desde que o plano formado por ambos esteja paralelo à face frontal dos cilindros, é irrelevante para o resultado.

4.1 Efeito da velocidade de rotação

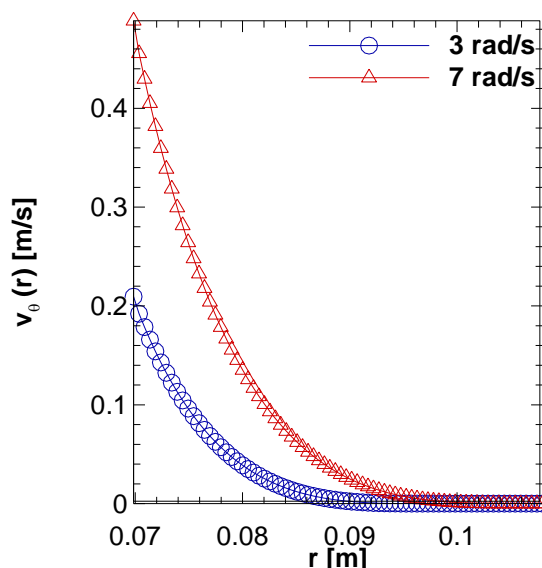
Em um primeiro momento observou-se os efeitos da variação da rotação do cilindro interno. Para isto fixou-se os parâmetros: $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$ e $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $n = 0,5$ e utilizou-se duas velocidades de rotação $\omega = 3 \text{ rad/s}$ e $\omega = 7 \text{ rad/s}$.

No que se refere ao perfil de velocidades, como se observa na Figura 13, para $\omega = 3 \text{ rad/s}$, a posição do raio onde ocorre a transição entre a região cisalhada da não cisalhada é $r_0 = 98,81 \text{ mm}$, enquanto para $\omega = 7 \text{ rad/s}$, $r_0 = 106,40 \text{ mm}$.

Desta forma, quanto maior a velocidade menor é a região de plugue no escoamento, o que pode ser explicado pelo fato de que a tensão resultante no fluido é diretamente proporcional a taxa de deformação, como ressalta a Equação (2) que por sua vez é proporcional ao gradiente de velocidade do fluido. Sendo assim, uma

maior velocidade resulta em maior tensão, desta forma uma maior região do escoamento apresenta tensões superiores a tensão mínima de escoamento do fluido, reduzindo então a região com plugue.

Figura 13 - Resultados do perfil de velocidade em função da velocidade angular.



Fonte: Autoria própria

O mesmo ocorre com a tensão de cisalhamento nas paredes. Sendo assim a velocidade de rotação de $\omega = 3$ rad/s resultou em tensões de cisalhamento de $\tau_i = 116,75$ Pa e $\tau_e = 50,02$ Pa para as paredes interna e externa respectivamente, já para $\omega = 7$ rad/s as tensões foram de $\tau_i = 139,00$ Pa e $\tau_e = 71,58$ Pa.

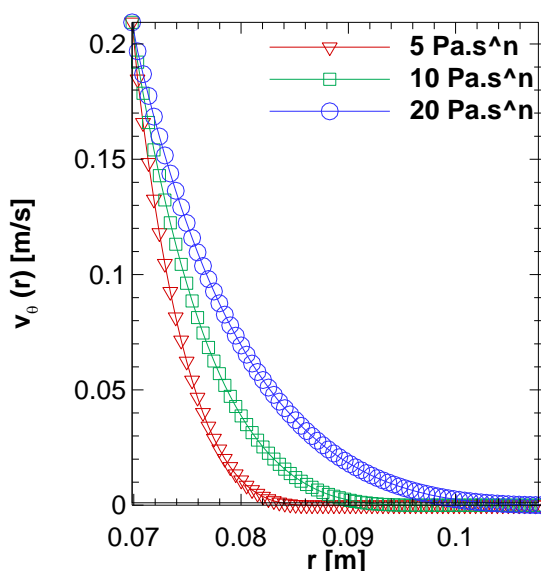
Em relação ao fator de atrito de Fanning, a velocidade angular de $\omega = 3$ rad/s resultou em $cf_i = 0,1771$ e $cf_e = 0,0759$ para as paredes interna e externa, enquanto para $\omega = 7$ rad/s estes valores foram de $cf_i = 0,2109$ e $cf_e = 0,1086$, sendo assim o aumento da velocidade angular resultou no aumento do fator de atrito, o que implicaria em um aumento da perda de carga.

4.2 Efeito do índice de consistência

Subsequentemente, para estudar qual os resultados referentes a variação do índice de consistência, fixou-se os parâmetros: $\tau_0 = 60$ Pa, $\omega = 3$ rad/s e $n = 0,5$, e

utilizou-se os índices de consistência $m = 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $20 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$. Os resultados podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 - Resultados do perfil de velocidade em função do índice de consistência.



Fonte: Autoria própria

No que diz respeito ao perfil de velocidades, para $m = 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, a região de transição entre a zona cisalhada e a região de plugue se dá em $r_0 = 89,15 \text{ mm}$, para $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $r_0 = 98,81 \text{ mm}$ enquanto para $m = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ não há formação de plugue. Desta forma torna-se evidente que o aumento do índice de consistência reduz o tamanho da região não cisalhada.

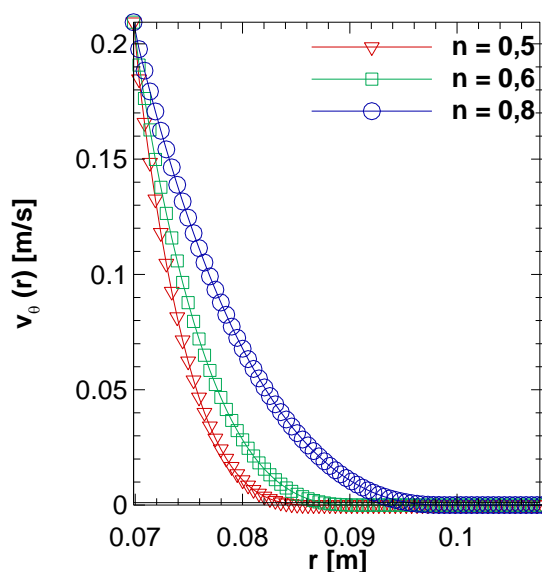
Quanto a tensão de cisalhamento na parede, respectivamente para a parede interna e externa os resultados foram de $\tau_i = 93,68 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 44,19 \text{ Pa}$ para $m = 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $\tau_i = 116,75 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 50,02 \text{ Pa}$ para $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $\tau_i = 158,03 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 66,01 \text{ Pa}$ para $m = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$.

Relativo ao fator de atrito, para a parede interna e externa obteve-se os seguintes resultados: $cf_i = 0,1421$ e $cf_e = 0,0671$ para $m = 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $cf_i = 0,1771$ e $cf_e = 0,0759$ para $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $cf_i = 0,2398$ e $cf_e = 0,1002$ para $m = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$. Sendo assim pode-se averiguar que o aumento do índice de consistência resulta no aumento tanto da tensão de cisalhamento nas paredes quanto no fator de atrito de Fanning.

4.3 Efeito do índice de potência

Posteriormente variou-se o índice de potência para verificar seu efeito. Para isso os parâmetros $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$, $\omega = 3 \text{ rad/s}$ e $m = 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ foram fixados para $n = 0,5$; $n = 0,6$ e $n = 0,8$. Os resultados são apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Resultados do perfil de velocidade em função do índice de potência.



Fonte: Autoria própria

Como ressalta a Figura 15 o aumento do índice de potência resultou na diminuição da região de plugue. Para $n = 0,5$ obteve-se $r_0 = 89,15 \text{ mm}$, enquanto para $n = 0,6$ o a distância do raio para o início do plugue aumento para obteve-se $r_0 = 93,22 \text{ mm}$ e por fim para $n = 0,8$ este foi de $r_0 = 101,35 \text{ m}$.

Tanto a tensão de cisalhamento nas paredes, quanto o fator de atrito de Fanning aumentaram com o aumento do índice de potência.

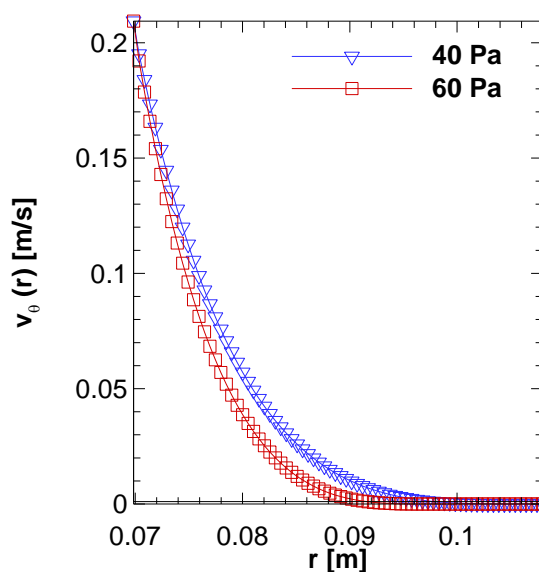
No que diz respeito a tensão de cisalhamento nas paredes os resultados para a parede interna e externa foram respectivamente: $\tau_i = 93,68 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 44,19 \text{ Pa}$ para $n = 0,5$; $\tau_i = 101,72 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 46,54 \text{ Pa}$ para $n = 0,6$ e $\tau_i = 120,18 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 51,17 \text{ Pa}$ para $n = 0,8$.

Quanto ao fator de atrito os resultados na parede interna e externa foram respectivamente: $cf_i = 0,1421$ e $cf_e = 0,0671$ para $n = 0,5$; $cf_i = 0,1543$ e $cf_e = 0,0706$ para $n = 0,6$ e por fim $cf_i = 0,1824$ e $cf_e = 0,0776$ para $n = 0,8$.

4.4 Efeito da tensão limite de escoamento

Por fim observou-se a influência da tensão limite de escoamento, para isto fixou-se os parâmetros $n = 0,5$, $\omega = 3 \text{ rad/s}$ e $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e utilizou-se $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$ e $\tau_0 = 40 \text{ Pa}$. Os resultados podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 – Perfis de velocidade em função da tensão limite de escoamento.



Fonte: Autoria própria

Como mostra a Figura 16 quanto menor o valor da tensão limite de cisalhamento menor a região de plugue, o que era de se esperar, tendo em vista que esta tensão limite é o valor mínimo necessário de tensão para que o fluido cisalhe e escoe, sendo assim, quanto menor este valor, maior é a quantidade de fluido cisalhado.

Para $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$ a posição do raio em que há transição de fluido cisalhado e plugue foi de $r_0 = 98,81 \text{ m}$, já para $\tau_0 = 40 \text{ Pa}$ obteve-se $r_0 = 106,93 \text{ m}$.

No que tange a tensão de cisalhamento e o fator de atrito de Fanning, ambos aumentam com o aumento do índice de consistência.

Para tensão de cisalhamento nas paredes os resultados foram, para a parede interna e externa respectivamente: $\tau_i = 91,89 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 43,81 \text{ Pa}$ para $\tau_0 = 40 \text{ Pa}$ e $\tau_i = 116,75 \text{ Pa}$ e $\tau_e = 50,02 \text{ Pa}$ para $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$.

No que diz respeito ao fator de atrito de Fanning os resultados para a parede interna e externa foram respectivamente $cf_i = 0,1394$ e $cf_e = 0,0665$ para $\tau_0 = 40$ Pa e $cf_i = 0,1771$ e $cf_e = 0,0759$ para $\tau_0 = 60$ Pa.

4.4 Resumo dos resultados da variação dos parâmetros do fluido

Os resultados das simulações realizadas foram resumidos no Quadro 7, onde τ_i é a tensão de cisalhamento na parede interna, τ_e é a tensão de cisalhamento na parede externa, cf_i é o fator de atrito de Fanning na parede interna e cf_e é o fator de atrito de Fanning na parede externa.

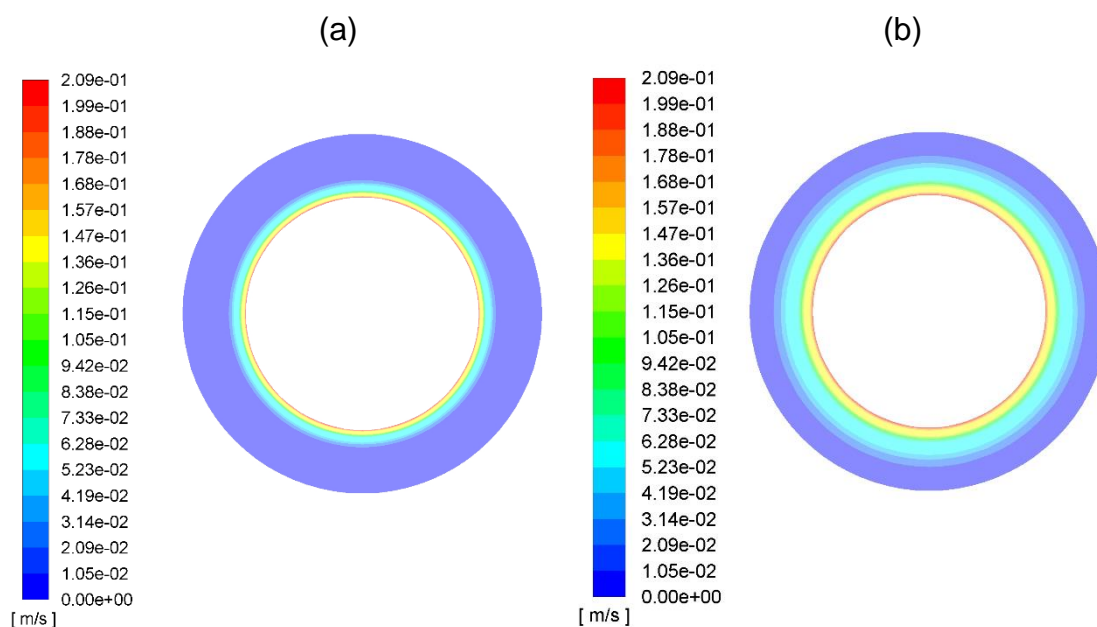
Quadro 7 - Resultados das simulações

τ (Pa)	n	m (Pa.s ⁿ)	ω (rad/s)	r_0 (mm)	τ_i (Pa)	τ_e (Pa)	cf_i	cf_e
60	0,5	10	3	98,81	116,75	50,02	0,1771	0,0759
60	0,5	10	7	106,40	139,00	71,58	0,2109	0,1086
60	0,5	5	3	89,15	93,68	44,19	0,1421	0,0671
60	0,5	20	3	-	158,03	66,01	0,2398	0,1002
60	0,6	5	3	93,22	101,72	46,54	0,1543	0,0706
60	0,8	5	3	101,35	120,18	51,17	0,1824	0,0776
40	0,5	10	3	106,93	91,89	43,81	0,1394	0,0665

Fonte: Autoria própria

A fim de ilustrar como se comporta o perfil de velocidades com e sem plugue, comparou-se os resultados das simulações com os seguintes parâmetros: $n = 0,5$, $\omega = 3$ rad/s e $m = 20$ Pa.sⁿ e utilizou-se $\tau_0 = 60$ Pa, que como esperado a partir da investigação feita anteriormente não apresentará plugue, e comparou-se com o perfil resultante com a simulação com: $n = 0,5$, $\omega = 3$ rad/s e $m = 5$ Pa.sⁿ e utilizou-se $\tau_0 = 60$ Pa, que apresentou plugue em $r_0 = 89,15$ mm. Os resultados podem ser observados na Figura 17.

Figura 17 - Comparação entre o perfil de velocidades com a formação de plugue (a) e sem a formação de plugue (b)



Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar, no caso (a) há uma grande região azul escuro, que está relacionada à valores mais baixos de velocidade, caracterizando uma região de plugue. Já no caso (b) as cores do perfil estão mais distribuídas, indicando que a velocidade está decaindo, desde a condição de contorno ωR_1 para a parede interna, até 0 para a parede externa devido a condição de não deslizamento e o cilindro externo estar parado, o que resulta em uma pequena faixa de coloração azul indicando baixas velocidades.

4.5 Efeito do número de Bingham

Após a constatação da influência de todos os parâmetros pode-se averiguar a influência do número adimensional de Bingham, que como supracitado, segundo apontamentos de Chatzimina et al. (2009), para o fluido de Herschel-Bulkley é dado

$$\text{por } Bn = \frac{\tau_0}{m\omega^n}.$$

Pode-se prever a influência do número de Bingham a partir dos resultados anteriormente discutidos e resumidos no Quadro 7 . Pode-se constatar que o aumento de todas as propriedades resulta no aumento tanto da tensão de

cisalhamento quanto no fator de atrito de Fanning, desta forma não há como prever os resultados referentes ao número de Bingham, tendo em vista que se os parâmetros: m , n e ω forem fixados, e τ_0 aumentar, Bn também aumenta e tanto a tensão de cisalhamento, quanto o fator de atrito nas paredes aumenta.

Já se τ_0 for fixado, e os outros parâmetros forem aumentados, o número de Bingham diminuirá, mas ainda sim a tensão de cisalhamento e o fator de atrito nas paredes aumentará.

Todavia, no que diz respeito a posição do raio em que há transição entre zona de plugue e de fluido cisalhado esta análise mostra um padrão para o número de Bingham.

Se m , n e ω aumentam, como mostrado nos resultados, o valor de r_0 aumenta, ou seja, o tamanho da região de plugue diminui. O contrário ocorre com τ_0 , se este aumenta há um incremento na extensão da zona não cisalhada do escoamento. Sendo assim, analisando a Equação (8) do número de Bingham pode-se concluir que, quanto maior Bn maior a região de plugue.

Ainda utilizando o número de Bingham pode-se definir o Bn_{crit} que seria o valor do número de Bingham limite para a existência ou não de plugue. Para isso foi utilizado a Equação (21) definida por Chatzimina *et al.* (2009), todavia ao invés de definir o Bn como anteriormente feito, definiu-se o raio $r_0 = R_2$, já que se $R_1 < r_0 < R_2$, há uma zona de plugue contida entre os raios, e se $r_0 > R_2$ toda a região anular está cisalhada.

Sendo assim para $n = 0,5$, que é o valor para qual as equações de Chatzimina *et al.* (2009) são válidos o valor de Bingham crítico é $Bn_{crit} = 2,1174$. Calculando o valor de Bn para os casos estudados em que $n = 0,5$ obteve-se os valores mostrados no Quadro 8.

Quadro 8 - Número de Bingham dos casos estudados

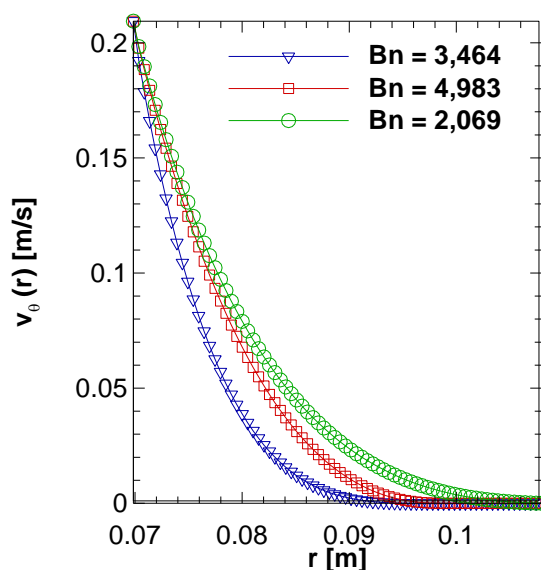
Bn	τ (Pa)	n	m (Pa.sⁿ)	ω (rad/s)	r_0 (mm)
3,46	60	0,5	10	3	98,806
2,27	60	0,5	10	7	106,4
6,93	60	0,5	5	3	89,154
1,73	60	0,5	20	3	-
2,31	40	0,5	10	3	106,934

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar no Quadro 8, que apenas um dos casos apresentou número de Bingham menor que o de Bingham crítico, e como discutido anteriormente, os resultados apontam para que quanto maior o Bn, maior a região de plugue, entende-se então que o caso com $Bn = 1,732$ não apresentaria região não cisalhada, corroborando com as constatações realizadas.

Todavia, analisou-se ainda três casos com índices de potência diferente, o primeiro com $n = 0,5$, $\omega = 3 \text{ rad/s}$, $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$, que resulta em um número de Bingham $Bn = 3,464$, o segundo com as seguintes propriedades: $n = 0,8$, $\omega = 3 \text{ rad/s}$, $m = 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $\tau_0 = 60 \text{ Pa}$ e número de Bingham $Bn = 4,983$, e por fim o último fluido com $n = 0,6$, $\omega = 3 \text{ rad/s}$, $m = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $\tau_0 = 40 \text{ Pa}$ e $Bn = 2,069$. O resultado do perfil de velocidades pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Influência do número de Bingham no perfil de velocidades



Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar na Figura 18, os perfis de velocidade não se comportaram como esperado, já que a situação com $Bn = 4,983$ deveria ter resultado no perfil de velocidade com maior plugue, e apresentou $r_0 = 101,35 \text{ mm}$, todavia isto ocorreu para o caso em que $Bn = 3,464$ com $r_0 = 98,81 \text{ mm}$. O perfil de velocidades para $Bn = 2,069$ não apresentou plugue.

Esta diferença ocorre, pois, o índice de potência já é um número adimensional, desta forma a análise só vale se este for fixado. Sendo assim, para realizar o estudo

foram utilizados diferentes números de Bingham, mantendo-se o índice de potência constante. Os resultados estão resumidos no Quadro 9.

Quadro 9 - Resultados para a variação do número de Bingham

τ (Pa)	n	m (Pa.s ⁿ)	ω (rad/s)	r_0 (m)	Bn	τ_i (Pa)	τ_e (Pa)	Cf_i	Cf_e
60	0,5	10	3	98,81	3,46	116,75	50,02	0,1771	0,0759
60	0,5	20	3	-	1,73	158,03	66,01	0,2398	0,1002
40	0,5	5	3	94,23	4,62	70,39	30,03	0,1068	0,0456
60	0,6	10	3	103,89	3,10	129,14	55,46	0,1960	0,0932
60	0,6	20	3	-	1,55	178,80	72,99	0,2713	0,1108
40	0,6	5	3	98,81	4,14	77,29	33,14	0,1173	0,0503
60	0,8	10	3	-	2,49	225,48	94,23	0,3421	0,1430
60	0,8	20	3	-	1,25	219,38	103,86	0,3329	0,1576
40	0,8	5	3	-	3,32	91,76	41,27	0,1392	0,0626

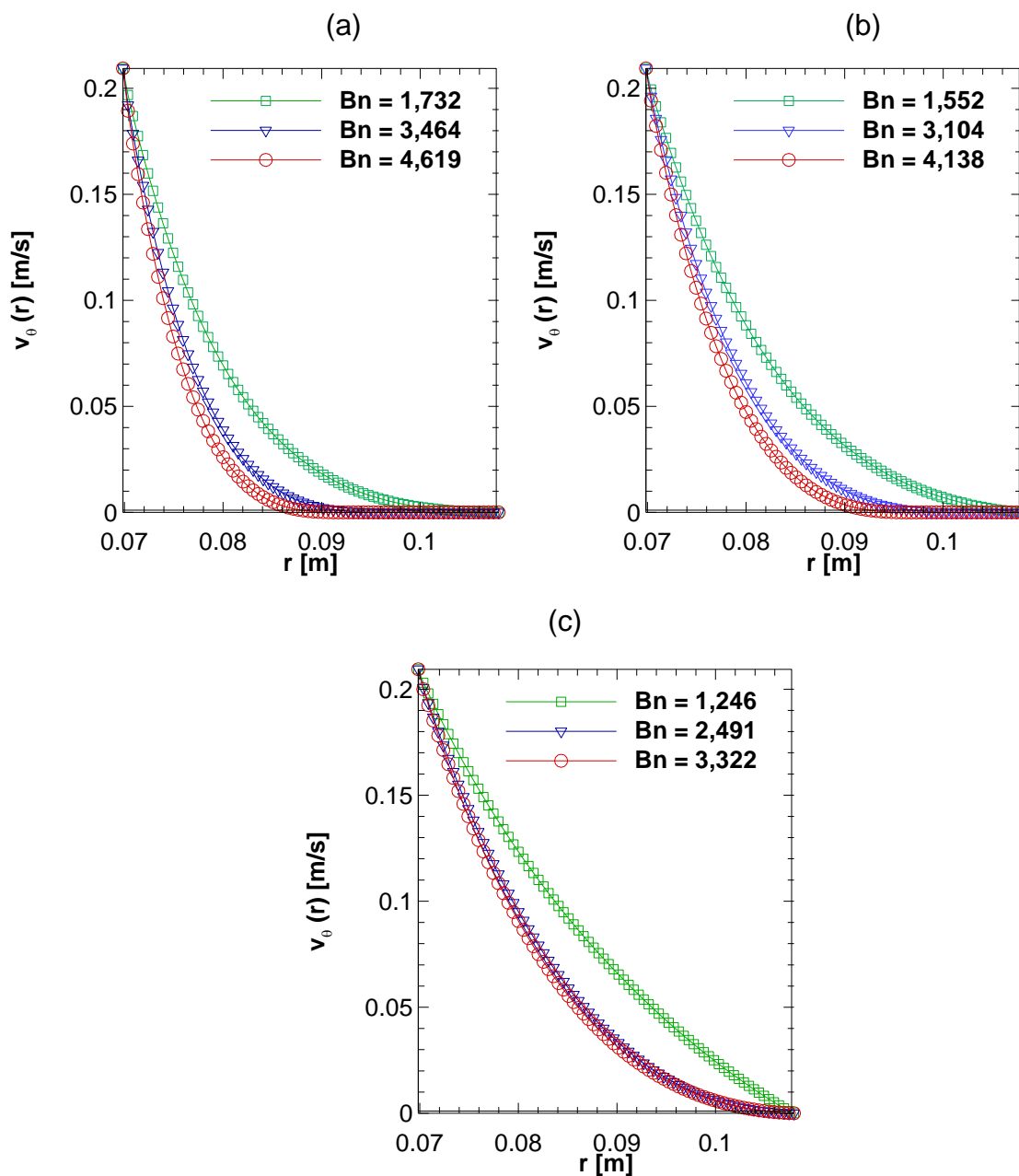
Fonte: Autoria própria

Os perfis de velocidade referentes a estas configurações podem ser constatados na Figura 19, e como pode-se observar, tanto pelos dados no Quadro 9 e pelos gráficos contidos na Figura 19, ao fixar-se o índice de potência os perfis de velocidade respeitaram o padrão de variação para o número de Bingham, sendo que quanto maior este, maior a região de plugue e mais deslocado para esquerda o gráfico.

Quanto a tensão de cisalhamento nas paredes e o fator de atrito de Fanning nota-se que o aumento do número de Bingham acarreta numa diminuição em ambos.

Contudo se for analisado o caso supracitado em que todos os parâmetros estão fixados exceto a tensão limite de escoamento, nota-se que para tensão de cisalhamento nas paredes os resultados foram, para a parede interna e externa respectivamente: 91,89 Pa e 43,81 Pa para $\tau_0 = 40$ Pa e 116,75 Pa e 50,02 Pa para $\tau_0 = 60$ Pa. Já no que diz respeito ao fator de atrito de Fanning os resultados para a parede interna e externa foram respectivamente 0,1394 e 0,0665 para $\tau_0 = 40$ Pa e 0,1771 e 0,0759 para $\tau_0 = 60$ Pa.

Figura 19 - Influência do número de Bingham no perfil de velocidades para $n = 0,5$ (a), $n = 0,6$ (b) e $n = 0,8$ (c)



Fonte: Autoria própria

Observando o Quadro 8 nota-se que para o caso em que $\tau_0 = 40$ Pa, $Bn = 2,309$, enquanto que para $\tau_0 = 60$ Pa, $Bn = 3,464$, sendo assim, neste caso o aumento do número de Bingham acarretou no aumento da tensão de cisalhamento e no fator de atrito de Fanning, sendo então inviável propor uma regra geral no que diz respeito ao comportamento destas grandezas quanto ao número de Bingham.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada a simulação numérica do escoamento de Taylor-Couette em uma geometria análoga à de um poço de perfuração de petróleo e gás, com o fluido de trabalho sendo descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley. O objetivo era avaliar se nas condições de velocidade e tamanho de poço haveria a formação de plugue junto a parede do cilindro externo, além de investigar a influência dos parâmetros do fluido de Herschel-Bulkley, rotação da coluna de perfuração e do número de Bingham na formação do plugue, nos valores de tensão de cisalhamento nas paredes e no fator de atrito de fanning.

Desta forma observou-se que o aumento da velocidade angular do cilindro externo resulta na diminuição do tamanho da região de plugue, no aumento da tensão nas paredes e do fator de atrito de Fanning. Atribuiu-se essa observação ao fato de que a tensão no fluido depender da taxa de deformação, que por sua vez é diretamente proporcional a velocidade, sendo assim uma maior tensão no fluido além de provocar uma maior deformação, resulta numa maior tensão de cisalhamento nas paredes e no fator de atrito de Fanning.

No que se refere o índice de consistência observou-se que este tem a mesma influência que a velocidade, seu aumento reduz o tamanho da região de plugue, aumenta ambos a tensão de cisalhamento nas paredes quanto o fator de atrito de Fanning.

Assim como os parâmetros anteriormente citados, o aumento do índice de potência acarretou em uma diminuição na zona de plugue, aumento na tensão nas paredes e no fator de atrito de Fanning.

Por fim o aumento da tensão limite de escoamento acarretou ao contrário das variáveis anteriores um aumento na região de plugue, mas da mesma forma que os outros, um aumento na tensão de cisalhamento nas paredes e no fator de atrito de Fanning.

No que tange a região de plugue pode-se notar a formação desta para várias configurações diferentes de fluido, sendo esta região maior para aqueles fluidos que apresentam valores mais altos da tensão limite de escoamento e menores dos índices de consistência e potência e de rotação.

Quanto ao número de Bingham, pode perceber que, no que diz respeito ao perfil de velocidades, desde que fixado o índice de potência, apresenta uma relação

direta no que concerne ao comportamento do gráfico e a extensão da região de plugue, sendo que quanto maior este número adimensional maior a região de plugue.

Já analisando a influência do número de Bingham na tensão de cisalhamento nas paredes e no fator de atrito de Fanning não pode-se chegar a uma relação válida, tendo em vista que se as variáveis tensão limite de escoamento e índice de potência forem fixadas, o aumento do número de Bingham acarreta numa diminuição em ambos, todavia se a tensão limite de escoamento variar esta relação pode ou não ser verdadeira dependendo se sua variação for maior ou menor que a dos outros parâmetros envolvidos no número adimensional de Bingham.

Tendo em vista que o estudo foi realizado em um modelo que possui uma geometria do tamanho de poços de petróleo, com velocidades compatíveis com as utilizadas nestes, a existência da camada de plugue indica que a hipótese levantada no que diz respeito a utilização desta camada de plugue, natural do escoamento do fluido de Herschel-Bulkley nas condições descritas neste trabalho, como proteção das paredes porosas, é plausível.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas situações foram deixadas de fora do escopo deste trabalho, e serão deixadas como sugestão para pesquisas futuras. A primeira é utilizar a parede da formação rochosa como uma parede permeável, já que a sua foi considerada impermeável. Então, avaliar as várias condições de permeabilidade do meio e como isso afeta a formação da região não cisalhada.

Posteriormente, adicionar ao estudo um modelo unindo o escoamento de Taylor-Couette, aqui descrito, somado a um gradiente de pressão no sentido de z, de forma que represente de forma mais realística o que acontece com o fluido de perfuração.

Ainda, a adição de partículas, naturalmente advindas do processo de perfuração, pode ser estudada para identificar como estas podem vir a interferir na região de plugue.

E por fim a inclusão de mais uma variável nas simulações, que seria a temperatura.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Raafat et al. A safety net for controlling lost circulation. **Oilfield Review**, v. 15, n. 04, p. 20-27, 2003.

BICALHO, Isabele C. et al. ESTUDO DE SIMULAÇÃO POR CFD DE ESCOAMENTOS EM POÇOS HORIZONTAIS. **ENHAPE**, 2015.

BIRD, R. Byron; DAI, G. C.; YARUSSO, Barbara J. **The rheology and flow of viscoplastic materials**. Reviews in Chemical Engineering, v. 1, n. 1, p. 1-70, 1983.

BIRD, R. Byron et al. **Dynamics of polymeric liquids**. 2nd ed. New York: J. Willey, c1987. 2 v. ISBN 0-471-80245-X (v.1)

CHATZIMINA, M.; GEROGIOU, G. Wall Shear Rates in Circular Couette Flow of a Herschel-Bulkley Fluid. **Applied Rheology**, v. 19, n. 3, p. 1–8, 2009.

CHHABRA, Raj P. **Bubbles, drops, and particles in non-newtonian fluids**. 2nd ed. Kanpur, India: Taylor & Francis Group, LLC, 2007. ISBN 978-0-8247-2329-3 (v.113)

COUSSOT, P.; GAULARD, F. Gravity flow instability of viscoplastic materials: The ketchup drip. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 72, n. 3, p. 1–5, 2005.

ÇENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. São Paulo, SP: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2007. xxvi, 816 p. ISBN 9788586804588.

ESCUDIER, M. P.; OLIVEIRA, P. J.; PINHO, F. T. Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 23, n. 1, p. 52-73, 2002.

FLUENT. ANSYS FLUENT v18.1 – Theory Guide. [S.l.], 2017

FOUNARGIOTAKIS, K.; KELESSIDIS, V. C.; MAGLIONE, R. Laminar, transitional and turbulent flow of Herschel–Bulkley fluids in concentric annulus. **The canadian journal of chemical engineering**, v. 86, n. 4, p. 676-683, 2008.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2010. 710 p. ISBN 9788521617570.

GONÇALVES, Nelson Daniel Ferreira et al. Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas. **Portugal: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto**, 2007.

HUSSAIN, Q. E.; SHARIF, M. A. R. Numerical modeling of helical flow of viscoplastic fluids in eccentric annuli. **AIChE journal**, v. 46, n. 10, p. 1937-1946, 2000.

IRGENS, Fridtjov. **Rheology and non-newtonian fluids**. Trondheim: E. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 199 p. ISBN 978-3-319-01052-6.

KELESSIDIS, Vassilios C.; DALAMARINIS, Panagiotis; MAGLIONE, Roberto. Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel–Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 77, n. 3, p. 305-312, 2011.

MARQUES, F.; LOPEZ, J. M. Taylor–Couette flow with axial oscillations of the inner cylinder: Floquet analysis of the basic flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 348, p. 153-175, 1997.

MEURIC, Olivier FJ et al. Numerical flow simulation of viscoplastic fluids in annuli. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 76, n. 1, p. 27-40, 1998.

MITSOULIS, Evan. Flows of viscoplastic materials: models and computations. **Rheology reviews**, v. 2007, p. 135-178, 2007.

OSMAN, E. A. et al. Determination of drilling mud density change with pressure and temperature made simple and accurate by ANN. In: **Middle East Oil Show**. Society of Petroleum Engineers, 2003.

PAI, Rekha G.; KANDASAMY, A. Entrance Region Flow of Herschel-Bulkley Fluid in an Annular Cylinder. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 13, p. 1964, 2014.

PATANKAR, Suhas V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Boca Raton, FL: CRC Press, c1980. 197 p. (Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences). ISBN 0-89116-522-3.

SHAMES, Irving Herman. **Mecânica dos fluidos**. 3. ed. São Paulo, SP: E. Martha Edna Suárez R., 1995. 814 p. ISBN 958-600-246-2.

SHIROMA, Priscila Hiromi. **Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOTO, Hilda Pari et al. A numerical investigation of inertia flows of Bingham-Papanastasiou fluids by an extra stress-pressure-velocity galerkin least-squares method. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 32, n. SPE, p. 450-460, 2010.

VAYSSADE, Anne-Laure. **Flows of Herschel-Bulkley fluids in confined environments: applications to the cementing of oil wells**. 2015. Tese de Doutorado. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011. xiii, 880 p. + 1 DVD (4 ¾ pol.) ISBN 9788563308214.

WU, Ying-Hsin; LIU, Ko-Fei. Formulas for calibration of rheological parameters of bingham fluid in couette rheometer. **Journal of Fluids Engineering**, v. 137, n. 4, p. 041202, 2015.

ZHOU, Xiantao; SHI, Yan; KONG, Yinghuang. Study on Performance of Laminar Taylor-Couette Flow with Different Developed Procedures. **Modern Mechanical Engineering**, v. 2, n. 01, p. 14, 2012.