

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO LUIZ BACELAR JUNIOR

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DIRETA E
REVERSA EM BROCA PDC NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC 2 – Nº de Inscrição – 36)

CURITIBA

2016

FERNANDO LUIZ BACELAR JUNIOR

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DIRETA E
REVERSA EM BROCA PDC NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Admilson T. Franco

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo M. Germer

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DIRETA E REVERSA EM BROCA PDC NA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO", realizado pelo aluno Fernando Luiz Bacelar Junior, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Admilson T. Franco
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Eduardo M. Germer
DAMEC, UTFPR
Coorientador

Prof. Dr. Luciano F. S. Rossi
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Paulo H. D. dos Santos
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 21 de junho de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o suporte e a compreensão durante a graduação. Aos professores orientadores, Dr. Admilson T. Franco e Dr. Eduardo M. Germer, por toda a ajuda e a experiência fornecidas durante a execução do trabalho. A todos os professores, os familiares e os amigos que colaboraram de alguma forma durante a minha formação pessoal e profissional.

RESUMO

BACELAR JR., Fernando L. Simulação numérica da circulação direta e reversa em broca PDC na perfuração de poços de petróleo. 2016. 70 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

As reservas de petróleo estão localizadas várias centenas de metros, ou até mesmo quilômetros, abaixo da superfície terrestre. Atualmente, a principal forma de exploração desse recurso natural é por meio da técnica de perfuração rotativa, na qual uma broca é usada para construção de um poço e assim possibilitar o acesso ao reservatório. No estudo em questão foi realizada a simulação numérica do escoamento de fluido durante a etapa de perfuração. A geometria consiste de uma broca do tipo PDC (*polycrystalline-diamond-compact*) acoplada à coluna de perfuração. As simulações foram feitas no programa ANSYS CFX 15.0®, com o escoamento sendo modelado como turbulento (modelo de Transporte de Tensões Cisalhantes ou SST). Pelo motivo de não existirem modelos de turbulência para fluidos não newtonianos, o fluido de perfuração foi considerado como newtoniano e incompressível. Foram comparadas as circulações direta e reversa, com a avaliação da influência da viscosidade dinâmica e da massa específica do fluido, assim como a atuação da velocidade de rotação da coluna e da vazão de entrada. Análises foram feitas entre esses parâmetros e a força média de impacto do fluido no fundo do poço, a perda de carga, a tensão de cisalhamento média na broca e a velocidade média de saída. Os resultados mostraram que a vazão tem a maior influência no escoamento e a circulação reversa é mais eficiente para a maioria dos aspectos operacionais estudados, exceto em relação à limpeza da região da broca.

Palavras-chave: Perfuração, Simulação Numérica, Broca PDC, Circulação Direta, Circulação Reversa.

ABSTRACT

BACELAR JR., Fernando L. Numerical simulation of the direct and reverse circulations with a PDC bit during the drilling of an oil well. 2016. 70 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The oil reserves are located hundreds of meters, or even kilometers, below the Earth's surface. Nowadays, this natural resource exploration is made by the rotary drilling process, where a bit is used to build a well and enable the access to the reservoir. In the present study, a numerical simulation of the fluid flow during the drilling was performed. The geometry consists of a PDC (*polycrystalline-diamond-compact*) bit attached to a drillstring. The simulations were executed by the ANSYS CFX 15.0® software, with the flow being modeled as turbulent (Shear Stress Transport model or SST). For the reason that there aren't turbulence models for non-Newtonian fluids, the drilling fluid was considered as Newtonian and incompressible. The direct and reverse circulations were compared, analyzing the influence of the fluid's dynamic viscosity and density, and also the rotation speed and flow rate effects. Relations were studied between these variables and the fluid's averaged impact force in the bottom of the well, the head loss, the averaged shear stress in the bit and the averaged speed at the exit. The results showed that the flow rate has the biggest influence to the fluid flow and the reverse circulation is more efficient for the majority of the investigated aspects, except the bit region cleaning.

Keywords: Drilling, Numerical Simulation, PDC bit, Direct Circulation, Reverse Circulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Tipos de circulação do fluido dentro do poço: A) Direta e B) Reversa. .	14
Figura 2.1 – Sonda de perfuração marítima.	18
Figura 2.2 – Broca tricônica com insertos de carbonetos de tungstênio.	20
Figura 2.3 - Broca PDC.	20
Figura 2.4 – Esquematização do escoamento através de um ejetor.	24
Figura 3.1 – Perfil da velocidade adimensional perto de parede.	34
Figura 4.1 – Modelo 3D da broca PDC: A) Vista isométrica e B) Vista inferior.	36
Figura 4.2 – Ilustração do domínio fluido do problema.	37
Figura 4.3 – Condições de contorno da região da broca.	38
Figura 4.4 – Volume de controle de uma malha bidimensional.	40
Figura 4.5 – Fluxograma simplificado de resolução do CFX.	43
Figura 5.1 – Vistas frontal (A) e lateral (B) da malha da validação numérica.	45
Figura 5.2 – Comparação dos perfis de velocidade axial experimental e numérico para escoamento em tubo anular ($Re=10.000$).	46
Figura 5.3 – Comparação dos perfis de velocidade tangencial experimental e numérico para escoamento em tubo anular ($Re=10.000$).	46
Figura 5.4 – Malha não estruturada da broca PDC: (A) Vista frontal, (B) Vista posterior, (C) Vista superior e (D) Vista em detalhe do ejetor central.	48
Figura 5.5 – Vista isométrica das malhas estruturadas do espaço anular (azul) e do interior da coluna (verde).	49
Figura 5.6 – Comparação dos perfis de velocidade axial na saída do ejetor central ($Re=100.000$).	50
Figura 5.7 – Linhas de corrente para a circulação direta:	52
Figura 5.8 – Linhas de corrente para a circulação reversa:	52
Figura 5.9 - Distribuição de pressão para a circulação direta:	53

Figura 5.10 – Distribuição de pressão para a circulação reversa:.....	54
Figura 5.11 – Vista frontal dos campos de velocidade no ejetor central para as circulações direta (A) e reversa (B).....	54
Figura 5.12 – Variação da força no fundo do poço em função da viscosidade dinâmica.	56
Figura 5.13 – Variação da perda de carga em função da viscosidade dinâmica.....	56
Figura 5.14 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da viscosidade dinâmica.	57
Figura 5.15 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da viscosidade dinâmica.	57
Figura 5.16 – Variação da força no fundo do poço em função da vazão de entrada.	58
Figura 5.17 – Variação da perda de carga em função da vazão de entrada.....	59
Figura 5.18 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da vazão de entrada.....	59
Figura 5.19 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da vazão de entrada.....	60
Figura 5.20 – Variação da força no fundo do poço em função da massa específica.	61
Figura 5.21 – Variação da perda de carga em função da massa específica.....	61
Figura 5.22 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da massa específica.....	62
Figura 5.23 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da massa específica.....	62
Figura 5.24 – Campo vetorial de velocidade no ejetor central:.....	63
Figura 5.25 – Variação da força no fundo do poço em função da rotação da coluna.	64
Figura 5.26 – Variação da perda de carga em função da rotação da coluna.	65
Figura 5.27 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da rotação da coluna.	65

Figura 5.28 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da rotação da coluna.66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Constantes calibradas para o modelo SST.	31
Tabela 4.1 – Formulações matemáticas das condições de contorno do modelo numérico.	39
Tabela 5.1 – Parâmetros geométricos para a validação numérica.....	44
Tabela 5.2 – Configurações das malhas empregadas com seus números de elementos.....	47
Tabela 5.3 – Parâmetros operacionais empregados no teste de malha de referência.	49
Tabela 5.4 – Resultados do teste de malha.	50
Tabela 5.5 – Valores dos parâmetros operacionais utilizados nas simulações.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Re	Número de Reynolds	[-]
ρ	Massa Específica	[kg/m ³]
U	Velocidade Média	[m/s]
D _h	Diâmetro Hidráulico	[m]
μ	Viscosidade Dinâmica	[Pa.s]
Ta	Número de Taylor	[-]
r _i	Raio Interno	[m]
r _o	Raio Externo	[m]
ω_i	Velocidade Angular	[s ⁻¹]
ν	Viscosidade Cinemática	[m ² /s]
g	Aceleração Gravitacional	[m/s ²]
Z	Profundidade dentro do Poço	[m]
p ₀	Pressão na Superfície	[Pa]
C _D	Coefficiente de Descarga	[-]
A _t	Área total	[m ²]
u _i	Vetor Velocidade Instantânea	[m/s]
x _i	Vetor Posição	[m]
t	Tempo	[s]
p	Pressão	[Pa]
τ_{ij}	Tensor de Tensão Viscosa	[Pa]
U _i	Vetor Velocidade Média	[m/s]
u' _i	Vetor Parte Flutuante	[m/s]
P	Pressão Média	[Pa]
T _{ij}	Tensor de Tensão Viscosa Média	[Pa]
$-\rho \overline{u'_j u'_i}$	Tensor de Tensões de Reynolds	[Pa]
k	Energia Cinética Turbulenta	[m ² /s ²]
ω	Frequência Turbulenta	[s ⁻¹]
ϵ	Taxa de Dissipação da Energia Cinética Turbulenta	[m ³ /s ³]
δ_{ij}	Delta de Kronecker	[-]

μ_t	Viscosidade Turbulenta	[Pa.s]
σ_k	Constante do Modelo SST	[-]
σ_{w1}	Constante do Modelo SST	[-]
σ_{w2}	Constante do Modelo SST	[-]
γ_2	Constante do Modelo SST	[-]
β_2	Constante do Modelo SST	[-]
β^*	Constante do Modelo SST	[-]
u^*	Velocidade de Atrito	[m/s]
u_+	Velocidade Adimensional	[-]
y_+	Distância Adimensional	[-]
τ_w	Tensão de Cisalhamento na Parede	[Pa]
μ_{eff}	Viscosidade Efetiva	[Pa.s]
I	Intensidade Turbulenta	[-]
ϕ	Escalar/Propriedade Genérico(a)	[-]
Γ_{eff}	Difusividade Efetiva	[kg/m.s]
S	Termo Fonte	[-]
n_j	Vetor Normal Unitário	[-]
Ψ	Volume de Controle	[m ³]
\dot{m}_{ip}	Vazão Mássica no Ponto de Integração	[kg/s]
L	Comprimento Axial	[mm]
R_1	Raio do Tubo Interno	[mm]
R_2	Raio do Tubo Externo	[mm]
Q	Vazão de Entrada	[gpm]
Ω	Rotação da Coluna de Perfuração	[rpm]
F_p	Força Média Exercida pelo Fluido no Fundo do Poço	[N]
H_L	Perda de Carga	[Pa]
(r, θ, z)	Posição em Coordenadas Cilíndricas	[m, -, m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto do Tema	12
1.2	Caracterização do Problema	13
1.3	Objetivos	14
1.4	Justificativa	15
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Sondas de Perfuração	17
2.2	Tipos de Broca	19
2.3	Fluido de Perfuração	21
2.4	Tópicos de Turbulência	22
2.5	Hidráulica de Perfuração	23
2.6	Revisão Bibliográfica	25
3	MODELAGEM MATEMÁTICA	28
3.1	Hipóteses	28
3.2	Equações de Conservação	28
3.3	Turbulência	29
3.4	Condições de Contorno para Turbulência	32
3.5	Lei de Parede	33
3.6	Resumo do Modelo Matemático	35
4	MODELAGEM NUMÉRICA	36
4.1	Construção da Geometria do Problema	36
4.2	Condições de Contorno	38
4.3	Discretização das Equações de Balanço	39
4.4	Fluxograma de Resolução do CFX	42
5	RESULTADOS	44
5.1	Validação do Modelo Numérico	44
5.2	Teste de Malha	47
5.3	Grade de Simulações	51
5.4	Características das Circulações Direta e Reversa	51
5.5	Análise da Variação da Viscosidade Dinâmica	55
5.6	Análise da Variação da Vazão de Entrada	57
5.7	Análise da Variação da Massa Específica	60
5.8	Análise da Variação da Rotação da Coluna	63
5.9	Síntese dos Resultados	66
6	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

Segundo a definição do *The American Heritage Dictionary* (2015), petróleo (*petroleum*, em inglês) é uma mistura espessa, inflamável, com cor amarelo-preta de hidrocarbonetos gasosos, líquidos e sólidos que é formada abaixo da superfície terrestre. Vários produtos são derivados desse recurso natural, como a gasolina, a nafta, o gás natural, o querosene, alguns óleos combustíveis e lubrificantes, a parafina e o asfalto, entre outros.

No ano de 1859, aconteceu a primeira perfuração direcionada à busca de petróleo que se tem registro. Tal feito é atribuído ao americano Edwin L. Drake, que abriu um poço na região de Titusville (Pensilvânia, EUA). Apesar de existirem evidências de descobertas anteriores de petróleo e gás, tais perfurações se destinavam à obtenção de água potável ou salmoura (Mitchell e Miska, 2011). Então, a perfuração de Drake é considerada por muitos como o marco inicial de uma das mais importantes indústrias atuais.

Na segunda metade do século XIX e no decorrer do século XX, houve uma grande expansão das atividades petroleiras. Segundo Mello (2005), importantes reservas foram descobertas nos Estados Unidos, Rússia, Índias Orientais Holandesas, Romênia, Irã, México e Iraque, com a movimentação de centenas de milhões de dólares e produção diária de milhões de barris.

A exploração do petróleo em uma determinada região é composta por algumas etapas. Primeiramente, poços são perfurados com o objetivo de descobrir novos reservatórios, *wildcats*. Depois de identificados os que possuem maior potencial para serem produtivos, poços de avaliação são construídos para a obtenção de mais informações, como a extensão do depósito. Verificada a viabilidade econômica, um plano de operação é oficializado e poços de desenvolvimento são perfurados para a produção de petróleo e gás.

No Brasil, foram descobertas nos últimos anos reservas de petróleo em profundidades superiores a 2.000 metros. Denominadas de Pré-Sal, seu potencial de produção é estimado em alguns bilhões de barris de petróleo. As dificuldades técnicas

de acesso a esses reservatórios são elevadas, pois eles estão localizados embaixo de extensas lâminas d'água e camadas de rocha e sal.

É significativa a importância da indústria do petróleo na atualidade, com fundamental participação na economia global. O trabalho está inserido nesse contexto, com seu foco voltado para a etapa de perfuração de poços de óleo e gás.

1.2 Caracterização do Problema

O problema de interesse é o escoamento do fluido de perfuração durante a abertura do poço de petróleo. A técnica mais empregada nesse processo é a perfuração rotativa. Nela, uma broca posicionada na ponta de uma coluna vazada é rotacionada para quebrar as rochas em pedaços pequenos e abrir caminho até o reservatório. Um fluido não newtoniano – denominado fluido de perfuração – é responsável pelo transporte dos cascalhos até a superfície. É importante dizer que além da rotação, a força devido ao peso da coluna também é responsável pela fragmentação das rochas e impõe a direção da perfuração, ou seja, guia o sistema verticalmente até o reservatório desejado.

Usualmente, o fluido de perfuração é bombeado pelo interior da coluna, passa por orifícios da broca (ejetores) e retorna à superfície pelo espaço anular da coluna de perfuração com a parede do poço. Ele é filtrado, para remoção dos cascalhos, e injetado novamente no circuito descrito anteriormente. Tal operação é denominada circulação direta. Além da limpeza do poço, o fluido de perfuração é responsável por resfriar e lubrificar a broca. Caso essas funções estejam sendo desempenhadas de maneira insuficiente, o desgaste da broca será maior e conseqüentemente, sua vida útil será diminuída.

Uma forma alternativa de se utilizar o fluido de perfuração é bombeá-lo pelo espaço anular, com o seu retorno pelo interior da coluna. Sansoni Jr. (2005) afirma que esse arranjo facilita o transporte de material sólido, pois a velocidade média do escoamento é maior na parte interna da coluna – devido à menor área da seção transversal. A Figura 1.1 apresenta o caminho percorrido pelo fluido de perfuração na circulação direta e reversa.

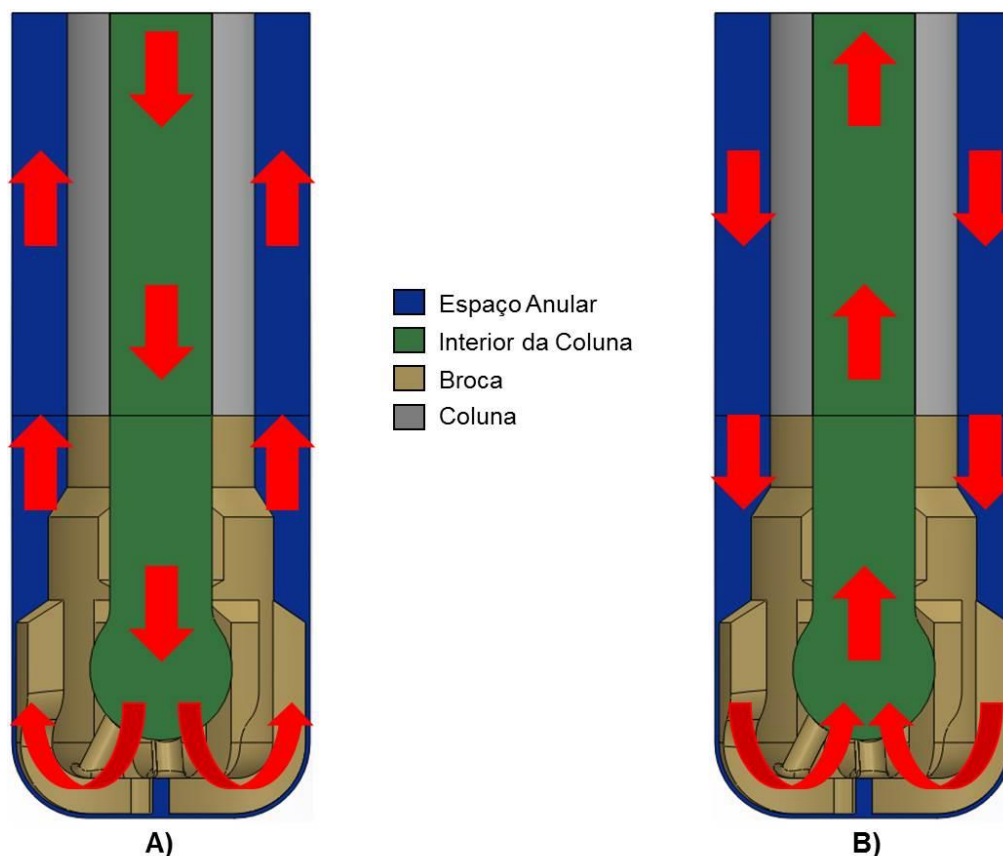


Figura 1.1 – Tipos de circulação do fluido dentro do poço: A) Direta e B) Reversa.

Fonte: Autoria Própria¹.

1.3 Objetivos

Neste trabalho é realizada a análise da hidrodinâmica de uma broca e coluna de perfuração, avaliando-se a influência de diversos parâmetros operacionais no escoamento. São comparadas as circulações direta e reversa, na região de interesse (broca e coluna), em relação aos seguintes aspectos: campos de velocidade e pressão, força média de impacto exercida pelo fluido no fundo do poço, perda de carga do sistema, tensão de cisalhamento média na broca e velocidade média de saída dos volumes de controle pertinentes ao tipo de circulação. O fluido de perfuração é modelado como newtoniano e incompressível, devido ao fato de não existirem

¹ As figuras e tabelas posteriores sem fonte explicitada indicam itens de autoria própria.

modelos de turbulência para fluidos não newtonianos. O escoamento é tido como turbulento e em regime permanente.

As propriedades controladas são a vazão mássica de entrada do fluido (Q), a velocidade de rotação do sistema broca e coluna de perfuração (Ω), a viscosidade dinâmica (μ) e a massa específica do fluido de perfuração (ρ). O modelo geométrico tridimensional da broca usado é do tipo PDC (*polycrystalline-diamond-compact*), construído no *software* SolidWorks 2015[®]. As simulações do escoamento são feitas no programa ANSYS CFX 15.0[®] e a criação das malhas no ANSYS ICEM CFD 15.0[®].

1.4 Justificativa

O projeto aborda um tema atual e com alto viés tecnológico. Os gastos envolvidos com a exploração de petróleo são elevados, desde a fase de prospecção até a sua produção. O sucesso para a abertura de um poço depende diretamente do fluido de perfuração. Conforme indicado por Mitchell e Miska (2011), o fluido afeta todos os itens críticos do processo: a taxa de penetração da broca na rocha, a limpeza da broca, o transporte de cascalhos para fora do poço e a sua estabilidade estrutural. A má operação do fluido de perfuração pode, em alguns casos, levar à perda da conexão com o reservatório de petróleo e ao abandono do poço.

No contexto atual da Petrobras, é alta a necessidade de se estudar novos processos e tecnologias para o aprimoramento da extração de petróleo. A Fundação Tecnologia da Petrobras investiu 1,1 bilhão de dólares em pesquisa e desenvolvimento no ano de 2014 (Petrobras, 2015). Os recursos empregados visam aumentar a produção nacional de petróleo, diminuindo a dependência da exportação e, conseqüentemente, a influência da oscilação do preço do mercado internacional.

Do ponto de vista acadêmico, vários assuntos vistos durante a graduação são relacionados com esse trabalho. A Mecânica dos Fluidos, que aborda as características do escoamento de líquidos e gases, é uma área aplicada ao tema. Outro conteúdo de grande relevância é a Dinâmica dos Fluidos Computacional, que engloba os Métodos Numéricos e Computacionais utilizados para modelar e resolver o problema. Também podem ser citadas as disciplinas de Desenho de Máquinas, com

os conceitos empregados na criação da geometria de interesse (Coluna de Perfuração e Broca PDC), e a Tribologia, com o estudo do atrito e do desgaste dos materiais.

Assim, o entendimento da dinâmica do escoamento durante a perfuração de poços de petróleo e suas potenciais melhorias é relevante em vários aspectos. O tema do trabalho foi escolhido para contribuir com esse ambiente tecnológico.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada uma introdução do tema de estudo, com os objetivos e justificativas da pesquisa. No Capítulo 2 são descritos os fundamentos teóricos e as referências da literatura, com o intuito de melhorar a compreensão do leitor sobre os fenômenos presentes no problema. No Capítulo 3 é definida a modelagem matemática, com as equações de conservação e o modelo de turbulência. No Capítulo 4 é mostrada a modelagem numérica e no Capítulo 5 são analisados os resultados. Por último, no Capítulo 6 são feitas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tecnologia empregada para a exploração do petróleo é bastante avançada e demanda o domínio de diversos temas de engenharia. Nesse capítulo são apresentados os conceitos teóricos e trabalhos referências, necessários para a melhor compreensão do desenvolvimento do projeto.

2.1 Sondas de Perfuração

Quase todas as operações do processo de abertura de um poço de petróleo são executadas por meios de sondas (ou plataformas), que são classificadas em terrestres e marítimas (Mitchell e Miska, 2011). Como o próprio nome já diz, tal critério é baseado na presença ou não de uma camada de água sobre a região do reservatório. Vários aspectos caracterizam uma determinada sonda, como tamanho, capacidade de perfuração, nível de automação, instalações e condições nas quais se pode operar.

Apesar das diferenças citadas anteriormente, os equipamentos básicos de perfuração estão presentes em todas as plataformas (terrestres e marítimas). Existem seis sistemas elementares em uma sonda: sistema de potência (*power system*), sistema de içamento (*hoisting system*), sistema de circulação (*circulating system*), sistema de rotação (*rotary system*) e os sistemas de controle e monitoramento do poço (*well-control and well-monitoring systems*). Uma sonda de perfuração marítima é ilustrada na Figura 2.1.

O sistema de potência fornece a energia necessária para o funcionamento dos equipamentos da sonda (guincho, bombas, sistema de rotação e utensílios destinados à tripulação), de forma contínua ou intermitente. É composto por motores (diesel ou elétrico-diesel) e os meios de transmissão da energia gerada para os destinos finais.

O sistema de içamento é responsável pelo movimento vertical de componentes para dentro e fora do poço. A retirada da coluna de perfuração para substituição de brocas desgastadas, a colocação dos equipamentos para cimentação das paredes do poço e a inserção de conexões nas tubulações são exemplos de aplicações desse sistema.



Figura 2.1 – Sonda de perfuração marítima.

Fonte: Geofísica Brasil (2015).

O sistema de circulação tem como função prover energia hidráulica para o fluido de perfuração, de modo que ele possa ser bombeado da superfície para dentro da coluna, percorrer todo o caminho até o fundo do poço e retornar pelo espaço anular. Precisa também ter pressão suficiente para conseguir levar os cascalhos produzidos pela ação de perfuração da broca. Seus itens principais são as bombas, as tubulações e os equipamentos de preparação e filtragem da lama de perfuração.

O sistema de rotação inclui os equipamentos usados para fornecer torque à broca, dentre eles a mesa rotativa e a cabeça de injeção (*swivel*). O sistema de controle previne o fluxo de fluidos do substrato com pressão maior do que a pressão hidrostática do fluido de perfuração para dentro do poço. Esse fenômeno é denominado de *kick* e é indesejável, podendo levar em último caso a uma situação de perda do controle da situação (*blowout*). Pode-se citar a danificação de equipamentos

de perfuração, a ruína do poço e os prejuízos ao meio ambiente e aos operadores da sonda como consequências do acontecimento de um *blowout*.

Vários parâmetros precisam ser observados durante o processo de perfuração. É necessário estar atento ao desenvolvimento da operação, de maneira a detectar e corrigir problemas com agilidade. O sistema de controle e monitoramento é composto por equipamentos eletrônicos que informam os detalhes da execução dos procedimentos para a construção de um poço. Os parâmetros mais importantes a serem controlados são: profundidade, peso sobre a broca, velocidade de rotação, torque, pressão de bombeamento do fluido de perfuração e suas propriedades reológicas, taxas de vazão e penetração e a carga do guincho.

2.2 Tipos de Broca

A broca é a principal ferramenta de corte para a abertura de um poço de petróleo. As rochas são fragmentadas pelos processos de raspagem, lascamento, esmerilhamento e esmagamento. O modelo de broca varia de acordo com a aplicação, dependendo do tipo de formação rochosa e das condições de operação desejadas (Mitchell e Miska, 2011)

Duas categorias principais são usadas para dividir os modelos de brocas: as com partes móveis e as sem partes móveis. As brocas com partes móveis possuem um ou mais cones com elementos cortantes (insertos), estes cones irão rotacionar sobre eixos independentes do eixo principal da broca. As brocas com insertos de carbonetos de tungstênio (TCI), conforme apresentado na Figura 2.2, são indicadas para uma ampla gama de aplicações, incluindo rochas de grande dureza e abrasividade. O formato dos dentes das brocas com partes móveis influencia no processo de perfuração e é um critério de seleção do projeto. Dentes longos e mais espaçados são usados para formações mais moles. Dentes e distâncias menores entre os cones são empregados em regiões de maior dureza, para prevenir sua quebra.



Figura 2.2 – Broca tricônica com insertos de carbonetos de tungstênio.
Fonte: ShopBakerHughes (2015).

As brocas sem partes móveis consistem de lâminas fixas que são acopladas ao corpo da broca e se movem em conjunto, como uma única entidade. Elas são vantajosas com devido ao seu tamanho reduzido, pois não precisam de espaço para o sistema de cones e rolamentos. Maiores rotações e menores pesos da coluna de perfuração podem ser utilizados. Estão inseridas nessa categoria as brocas PDC (Figura 2.3), que possuem pequenos discos de diamante sintético para corte. O mecanismo principal de perfuração dessas brocas é o cisalhamento da rocha, sendo elas adequadas para utilização com sistema de circulação reversa.



Figura 2.3 - Broca PDC.
Fonte: Baker Hughes (2013).

2.3 Fluido de Perfuração

Os fluidos de perfuração são divididos – de acordo com a composição de sua fase contínua – em à base de água, à base de óleo e os pneumáticos (gases). Os fluidos mais comuns utilizados na indústria são os base-água. Os base-óleo ou sintéticos são mais caros e requerem maiores considerações ambientais. Já os pneumáticos, são empregados em situações específicas, em reservatórios mais esgotados ou áreas de baixas pressões de formação do petróleo (Mitchell e Miska, 2011).

Algumas funções essenciais durante o desenvolvimento de um poço são desempenhadas pelo fluido de perfuração. Os fragmentos de rocha gerados pelo processo de corte da broca são carregados pelo fluido e filtrados na superfície por equipamentos de controle de sólidos, sem que ocorra alteração nas propriedades físico-químicas deste fluido. Caso a circulação de fluido de perfuração seja interrompida, uma estrutura do tipo gel é formada para segurar os cascalhos em suspensão e evitar o emperramento da broca.

A estabilidade química do fluido de perfuração deve ser alta, mesmo quando exposto a substâncias contaminantes (gases corrosivos, água salgada ou até mesmo o concreto usado nas paredes do poço) e condições hostis de trabalho. É responsável pela lubrificação e arrefecimento da coluna de perfuração e da broca. Estabiliza estruturalmente as paredes laterais, selando poros e outras aberturas em seções que ainda não estão revestidas. Ele também controla a pressão hidrostática dentro do poço.

As características descritas anteriormente evidenciam a importância do emprego do fluido de perfuração adequado ao reservatório que se pretende explorar. Outro ponto relevante é a circulação do fluido pelo interior do poço. Conforme descrito na Seção 1.2, existem os modos de circulação direta e reversa. Na técnica direta, o fluido é inserido pelo interior da coluna de perfuração, passa pela broca e retorna pelo espaço anular entre a coluna e a parede do poço. No método reverso, a entrada de fluido é pelo espaço anular e a saída é pelo interior da coluna de perfuração.

2.4 Tópicos de Turbulência

A complexidade da geometria do conjunto broca-coluna e as condições operacionais empregadas (principalmente a vazão mássica) fazem o escoamento no interior do poço apresentar turbulência em certos pontos (Maneira, 2013). Portanto, o conhecimento deste assunto é importante para o contexto do projeto.

Uma descrição universal para caracterizar a turbulência ainda não foi criada, apesar de décadas de estudo sobre o tema. Alguns pontos que caracterizam o fenômeno são destacados por Tennekes e Lumley (1972). O primeiro deles é a natureza difusiva do escoamento turbulento, gerando grandes taxas de transferência de momento, calor e massa. A turbulência é rotacional e tridimensional, com um elevado número de vórtices aleatórios, ela é também dissipativa, necessitando do fornecimento de energia constante para suprir as perdas viscosas. As equações da mecânica dos fluidos de Navier-Stokes são aplicáveis a este tipo de escoamento.

Um dos métodos utilizados para determinar se um escoamento é turbulento ou não é o cálculo do número de Reynolds. Esse parâmetro mede a razão entre as forças inerciais e viscosas e é apresentado pela Equação (2.1):

$$Re = \frac{\rho U D_H}{\mu} \quad (2.1)$$

sendo ρ a massa específica, U a velocidade média, D_H o diâmetro hidráulico da seção e μ a viscosidade dinâmica.

Para verificar a influência da rotação dos componentes no escoamento, o número de Taylor é utilizado. Ele avalia a influência das forças centrípetas em relação às forças viscosas, o que também pode ser um fator gerador de turbulência. A Equação (2.2) apresenta a definição do número de Taylor:

$$Ta = r_i (r_o - r_i) \frac{\omega_i^2}{\nu^2} \quad (2.2)$$

em que r_i é o raio interno da seção, r_o é o raio externo, ω_i é a velocidade angular e ν é a viscosidade cinemática do fluido (White, 2005). Os valores de Re e de Ta críticos, que indicam o início da transição laminar-turbulenta, são dependentes das características do escoamento (propriedades reológicas do fluido, geometria, e velocidades).

2.5 Hidráulica de Perfuração

Segundo Mitchell e Miska (2011), conseguir prever com precisão as pressões e o comportamento do escoamento do fluido de perfuração dentro do poço é fundamental para o projeto do sistema de bombeamento adequado. A pressão hidrostática precisa ser suficiente para evitar o influxo de fluidos para dentro do poço, mas não pode ser maior do que a pressão de fratura das formações rochosas (ocasionando a invasão de fluido de perfuração).

Considerando a massa específica constante e o fluido como incompressível, a pressão p em uma profundidade Z pode ser calculada por:

$$p = \rho g Z + p_0 \quad (2.3)$$

sendo g a aceleração gravitacional e p_0 a pressão na superfície. Pode-se notar na Equação (2.3) que um aumento da massa específica (ρ) gera maiores pressões.

Durante o escoamento, o fluido é acelerado nos ejetores (ou bocais) da broca e a variação da energia cinética nessas regiões é considerável. A Figura 2.4 esquematiza o escoamento através de um ejetor, com a velocidade do escoamento em dois pontos. O ponto 1 está localizado acima do bocal (com pressão p_1) e o ponto 2 está situado logo na saída do mesmo (com pressão p_2). Considerando que o valor de U_1 é muito menor do que U_2 , pode-se calcular a velocidade na saída do ejetor por:

$$U_2 = C_D \sqrt{2 \frac{(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (2.4)$$

no qual C_D é denominado coeficiente de descarga. Esse fator de correção é introduzido para compensar as perdas de velocidade por atrito, sendo determinado experimentalmente. Um valor prático sugerido para C_D por Eckel e Bielnstein (1951 *apud* Mitchell e Miska, 2011) é de 0,95.

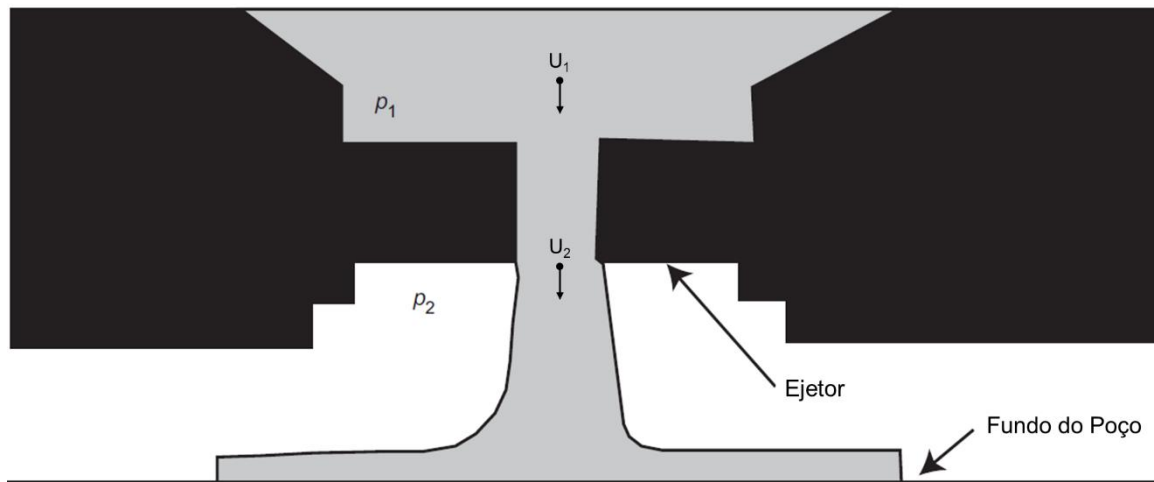


Figura 2.4 – Esquemática do escoamento através de um ejetor.

Fonte: Adaptado de Mitchell e Miska (2011).

Quando se tem mais do que um ejetor – como geralmente acontece com as brocas de perfuração – a queda de pressão deve permanecer a mesma para todos os bocais e pode ser determinada pela Equação (2.5):

$$(p_1 - p_2) = \frac{\rho Q^2}{2C_D^2 A_t^2} \quad (2.5)$$

em que Q é a vazão total e A_t é a soma das áreas transversais de todos os ejetores.

O propósito da utilização dos ejetores é aumentar a ação de limpeza do fluido de perfuração. Várias pesquisas indicam uma melhora desta ação com um aumento da força hidráulica de impacto do fluido com o fundo do poço.

Os parâmetros hidráulicos mais empregados para a seleção dos ejetores são: a velocidade na saída do bocal, a potência fornecida ou a força de impacto. A escolha do ejetor é feita para se maximizar um desses três fatores durante a perfuração. A

otimização da atuação dos ejetores deve levar em consideração a taxa de penetração, os custos operacionais, o desgaste da broca, os problemas estruturais do poço e a capacidade de carregamento de sólidos do fluido.

O transporte de cascalhos do fundo do poço, na região da broca, até a superfície é desempenhado pelo fluido de perfuração. Caso essa função esteja ocorrendo de maneira ineficiente, usualmente é aumentada a vazão ou a viscosidade do fluido. Contudo, deve-se considerar também que a limpeza embaixo da broca e a taxa de penetração são prejudicadas por essa ação. Outros fatores que afetam a eficiência do carregamento de sólidos são: a inclinação do poço, a massa específica do fluido, a velocidade de rotação, a excentricidade da coluna de perfuração e o tamanho e a concentração dos cascalhos.

2.6 Revisão Bibliográfica

Aperfeiçoar o processo de perfuração é uma demanda da indústria, tendo como necessidade um alto investimento em pesquisa e a publicação de trabalhos nessa área. Contudo, por questões comerciais, o acesso a algumas literaturas é bastante restrito. Em relação ao projeto proposto, segue uma síntese de alguns estudos considerados relevantes.

Rothe e Pfitzer (1997) analisaram através de simulações computacionais os efeitos causados pela rotação independente das paredes interna e externa de uma tubulação anular nos perfis de velocidade e temperatura do escoamento axial. A região de entrada foi avaliada pelo modelo de turbulência de tensões de Reynolds (*Reynolds stress turbulence model*) e os resultados foram comparados com dados experimentais. Foi concluído que a influência da rotação pode ser satisfatoriamente prevista por esse modelo.

Chung e Sung (2005) também simularam computacionalmente o escoamento turbulento em um anular concêntrico com rotação na parede interna. Foram empregadas três taxas de rotação adimensionais (0,2145, 0,429 e 0,858), Reynolds (Re) de 8900 e o modelo de turbulência LES (*Large-eddy simulation*). A velocidade média calculada e as variáveis de segunda ordem do modelo numérico foram compatíveis com os valores experimentais. Comparado com o caso do cilindro interno

estacionário, os dados de turbulência apresentaram maior magnitude do que quando aplicado movimento angular.

Sansoni Jr. (2005) estudou o escoamento com circulação reversa por meio de simulações no *software* ANSYS CFX 5.0® com uma broca de geometria simplificada. O fluido de perfuração foi modelado por lei de potência e a fase dispersa por abordagem lagrangeana. A conclusão mais importante do trabalho foi a comprovação do aumento na capacidade de transporte de partículas na circulação reversa, possibilitando uma redução de vazão sem perda do potencial de carregamento. Outros parâmetros, como a viscosidade, a velocidade axial de injeção de partículas, a rotação, a distribuição do diâmetro dos cascalhos e a vazão mássica também foram analisados.

Maneira (2013) realizou a simulação por circulação direta de uma broca tricônica, dentro da seção do poço. O fluido foi tratado como newtoniano e a turbulência foi modelada pelo método do transporte de tensão cisalhante. Como resultado, foram determinadas correlações entre a força de impacto do fluido no fundo do poço, a perda de carga e os seguintes parâmetros de operação: massa específica, viscosidade e vazão do fluido de perfuração, taxa de rotação da broca e diâmetro do bocal. O *software* utilizado foi o ANSYS CFX 14.0®.

Cunha Jr. et al. (2014) apresentaram um modelo numérico para caracterizar a dinâmica não-linear do escoamento em tubos horizontais. O modelo é baseado nos efeitos da inércia em relação à rotação e da deformação por cisalhamento. Foram consideradas também as influências do atrito, do impacto do jato do fluido de perfuração com as paredes do fundo do poço e dos cascalhos produzidos na broca e na eficiência do processo de perfuração.

Sivagnanam (2014) avaliou a melhora do desempenho de uma broca PDC pela modificação do seu projeto. A posição, o tamanho e a orientação dos bocais ejetores foram variados e foram verificadas as mudanças nos padrões de velocidade, vorticidade e queda de pressão. Posteriormente, o autor executou simulações computacionais (*software* ANSYS FLUENT 14.0®) e identificou os pontos de recirculação e zonas de estagnação influenciados pelo tamanho dos ejetores, suas localizações e suas inclinações.

Daroz et al. (2015) realizaram um estudo numérico comparativo entre as técnicas de circulação direta e reversa, com um modelo tridimensional de broca tricônica. As simulações foram executadas no *software* ANSYS CFX 14.0®. O fluido foi tratado como newtoniano, com a presença de partículas sólidas. Foi avaliada a influência de parâmetros reológicos e operacionais na força no fundo do poço, na queda de pressão, na velocidade média do escoamento na região dos cones da broca e na tensão de cisalhamento dos cones. Também foi examinado o processo de carregamento do material sólido para fora do domínio numérico.

Dos trabalhos anteriores, Maneira (2013) e Daroz et al. (2015) utilizaram modelos de broca tricônica, em que os ejetores estão localizados afastados do fundo do poço. Este estudo se diferencia dos demais pois é voltado para a análise do escoamento durante a perfuração com um outro tipo de broca, a PDC. O entendimento do comportamento do fluido de perfuração dentro do poço pode contribuir para o desenvolvimento de brocas mais eficientes e a utilização de parâmetros mais adequados durante o processo.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo são apresentadas as expressões matemáticas para a resolução do problema, as hipóteses simplificadoras, as equações de conservação, o modelo de turbulência e a lei de parede.

3.1 Hipóteses

Vários fenômenos físicos controlam o tipo de escoamento do projeto. Como o estudo de parte deles não é pretendido, algumas hipóteses simplificadoras são adotadas:

1. O fluido é considerado newtoniano;
2. O fluido apresenta massa específica constante (incompressível);
3. O escoamento é tratado como isotérmico e em regime permanente;
4. As paredes do domínio são lisas e impermeáveis;
5. A gravidade atua na direção vertical do escoamento.

3.2 Equações de Conservação

As equações fundamentais da dinâmica dos fluidos são baseadas nos princípios de balanço de massa, quantidade de movimento e energia (Tannehill et al., 1997). Como o escoamento é modelado como isotérmico, não existe a necessidade de se resolver a equação da conservação de energia. Em coordenadas cartesianas, as equações da conservação de massa e da quantidade de movimento são simplificadas para a Equação (3.1) e a Equação (3.2), respectivamente (Wilcox, 2000).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

sendo u_i a velocidade, x_i a posição, p a pressão e τ_{ji} o tensor de tensão viscosa, definido por:

$$\tau_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.3)$$

3.3 Turbulência

Pelo fato do fenômeno da turbulência ser composto de flutuações aleatórias de várias propriedades do escoamento, uma abordagem estatística é utilizada para sua modelagem (Wilcox, 2000). Essa abordagem é baseada nos conceitos introduzidos por Reynolds (1895), que expressam as propriedades como a soma de suas médias e de suas flutuações. Assim, por exemplo, a velocidade instantânea $u_i(x,t)$ é a soma de um valor médio, $U_i(x)$, com uma parte flutuante, $u'_i(x,t)$.

Esse conceito é aplicado nas equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, resultando na Equação (3.4) e na Equação (3.5), respectivamente:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ji} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (3.5)$$

onde P é a pressão média, T_{ij} o tensor de tensão viscosa médio e $-\rho \overline{u'_j u'_i}$ é conhecido como tensor de tensões de Reynolds.

A Equação (3.5) é chamada de RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equation*), na qual pode ser observada a adição de 6 novas variáveis pelo tensor de tensões de Reynolds. O resultado é a existência de mais incógnitas do que equações e, para contornar essa dificuldade, o modelo de turbulência usado deve prover aproximações para as variáveis desconhecidas em termos das propriedades do escoamento (Wilcox, 2000).

O modelo de turbulência adotado é o de Transporte de Tensões Cisalhantes ou SST (*Shear Stress Transport*). O SST é uma versão híbrida de dois outros modelos. O primeiro deles é o k- ϵ , que não apresenta um desempenho satisfatório para regiões de proximidade com paredes. Contudo, é eficiente para trabalhar com jatos livres. O segundo é o modelo k- ω , empregado no SST para os pontos adjacentes às paredes do domínio (Versteeg; Malalasekera, 2007).

No modelo SST, tem-se por objetivo a determinação do tensor de tensões de Reynolds, da energia cinética turbulenta k e da frequência turbulenta ω . A variável ω surge de uma transformação feita na equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ($\epsilon=k\omega$).

O cálculo do tensor de tensões de Reynolds é feito pela expressão de Boussinesq (Equação (3.6)). Esta expressão é baseada em uma analogia entre as tensões turbulentas e as tensões viscosas do escoamento laminar. É assumido que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de viscosidade média do escoamento.

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.6)$$

sendo δ_{ij} o delta de Kronecker e μ_t a viscosidade turbulenta definida pela Equação (3.7):

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.7)$$

Os valores de k e ω são obtidos pela resolução das Equações (3.8) e (3.9):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \left[\mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] - \beta^* \rho k \omega \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \gamma_2 \frac{\omega}{k} \left[\mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] - \beta_2 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Nota-se que seis constantes são introduzidas nas Equações (3.8) e (3.9) do modelo SST. Versteeg e Malalasekera (2007) apresentam valores experimentais de calibração, conforme exibido na Tabela 3.1. Outras duas considerações são feitas para o modelo de turbulência SST. A primeira é referente ao uso de uma função de ponderação, para evitar instabilidades numéricas no cálculo da viscosidade turbulenta (μ_t) e assim suavizar a transição do modelo $k-\omega$ para o $k-\varepsilon$. A outra observação diz respeito à limitação dos valores de μ_t (para escoamentos com gradientes de pressão adversa) e da produção de energia cinética turbulenta (para prevenir a criação de regiões de estagnação).

Tabela 3.1 – Constantes calibradas para o modelo SST.

Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

Constante	Valor (-)
σ_k	1,000
$\sigma_{\omega 1}$	2,000
$\sigma_{\omega 2}$	1,170
γ_2	0,440
β_2	0,083
β^*	0,090

3.4 Condições de Contorno para Turbulência

O modelo de turbulência SST alterna entre a aplicação do modelo k- ω , para regiões mais próximas de paredes, e do modelo k- ϵ , para regiões de escoamento livre. As condições de contorno de turbulência variam da mesma forma.

Para o modelo k- ϵ , as condições de contorno são (ANSYS, 2013b):

- a) Entrada: Valores de k e ϵ são definidos em função da intensidade turbulenta (I), definida como a razão entre as energias cinéticas das flutuações do escoamento com as do campo médio (Equação (3.10)). É utilizado um valor de I igual a 5%, considerado como intermediário. k e ϵ são calculados pelas Equações (3.11) e (3.12), respectivamente.

$$I = \frac{u'}{U'} \quad (3.10)$$

$$k_{\text{entrada}} = \frac{3}{2} I^2 U^2 \quad (3.11)$$

$$\epsilon_{\text{entrada}} = 0,09 \rho \frac{k^2}{1000 I \mu} \quad (3.12)$$

- b) Saída: O programa CFX impõe um gradiente constante entre os valores de k e ϵ dos elementos anteriores para os da saída (Equações (3.13) e (3.14)).

$$k_{\text{saída}} = k_{\text{saída}-1} \quad (3.13)$$

$$\epsilon_{\text{saída}} = \epsilon_{\text{saída}-1} \quad (3.14)$$

- c) Parede: Propriedades turbulentas são calculadas por uma extensão do método de Launder e Spalding. Mais detalhes são apresentados em (ANSYS, 2013b).

Para o modelo k- ω , as condições de contorno são (ANSYS, 2013b):

- a) Entrada: k foi determinado pela Equação (3.11) e ω é calculado por:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.15)$$

- b) Saída: Similarmente ao modelo k- ε , o programa CFX impõe um gradiente constante entre os valores de k e ω dos elementos anteriores para os da saída.

- c) Parede: Da mesma forma, as propriedades turbulentas são calculadas por uma extensão do método de Launder e Spalding.

3.5 Lei de Parede

A lei de parede é um procedimento para se trabalhar com escoamentos turbulentos próximos à parede. Tanto para escoamentos internos quanto externos, o número de Reynolds decresce acentuadamente no entorno de superfícies sólidas. Os efeitos da inércia do fluido e do gradiente de pressão são menores nesses locais (Wilcox, 2000). Logo, o modelo de turbulência não se aplica para essas situações.

O problema é abordado pela definição de duas variáveis adimensionais, a velocidade (u_+) e a distância (y_+). A velocidade adimensional é expressa pela Equação (3.16) e a distância adimensional é expressa pela Equação (3.17):

$$u_+ = \frac{u}{u_*} \quad (3.16)$$

$$y_+ = \frac{yu_*}{\nu} \quad (3.17)$$

em que ν é a viscosidade cinemática, y é a distância dimensional para a superfície sólida e u^* é a velocidade de atrito. u^* é calculada em função da tensão de cisalhamento da parede (τ_w), por:

$$u_* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{0,5} \quad (3.18)$$

Souza et al. (2011) citam a presença de 3 regiões distintas próximas da superfície de contato: a subcamada viscosa, a camada de transição e a camada logarítmica. Os intervalos de y_+ para transição e a relação entre y_+ e u_+ são mostrados na Figura 3.1. Correlações são utilizadas para descrever o comportamento de u_+ na camada de transição.

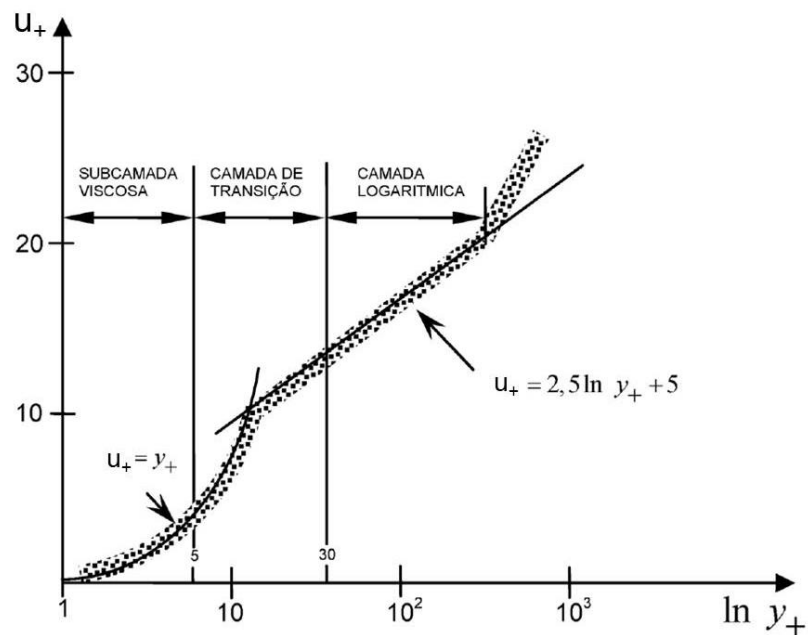


Figura 3.1 – Perfil da velocidade adimensional perto de parede.

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2011).

A transição entre o modelo de turbulência e a lei de parede é feita automaticamente pelo CFX. O valor de y_+ deve ser controlado pelo refino da malha nas regiões adjacentes às paredes, para evitar que elementos estejam dentro da

subcamada viscosa. De acordo com ANSYS (2013b), o número recomendado máximo para y_+ é 300.

3.6 Resumo do Modelo Matemático

O modelo matemático consiste na resolução das equações de conservação de massa (3.1) e da quantidade de movimento (3.2), junto com as equações do modelo de turbulência SST, (3.8) e (3.9). As condições de contorno de turbulência são preconizadas ou baseadas na intensidade turbulenta (I).

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo são detalhadas as etapas para a construção do modelo computacional. São apresentadas a geometria do problema, as condições de contorno empregadas, a forma de discretização das equações de conservação e como o programa trabalha iterativamente para chegar à solução final.

4.1 Construção da Geometria do Problema

O caminho percorrido pelo fluido de perfuração dentro do poço é o objeto de interesse para construção. Um fluido não possui forma fixa, se adaptando ao contorno dos elementos que o cercam. No problema em questão, os elementos sólidos envolvendo o fluido são a broca PDC, a coluna de perfuração e as paredes do poço.

A maquete numérica da broca PDC foi gerada no programa SolidWorks 2015® (Dassault Systemes) e pode ser visualizada na Figura 4.1 (Vistas Isométrica e Inferior). Algumas simplificações foram adotadas no modelo tridimensional. Os discos de diamante dos cortadores e a rosca para conexão com a coluna não foram adicionados.

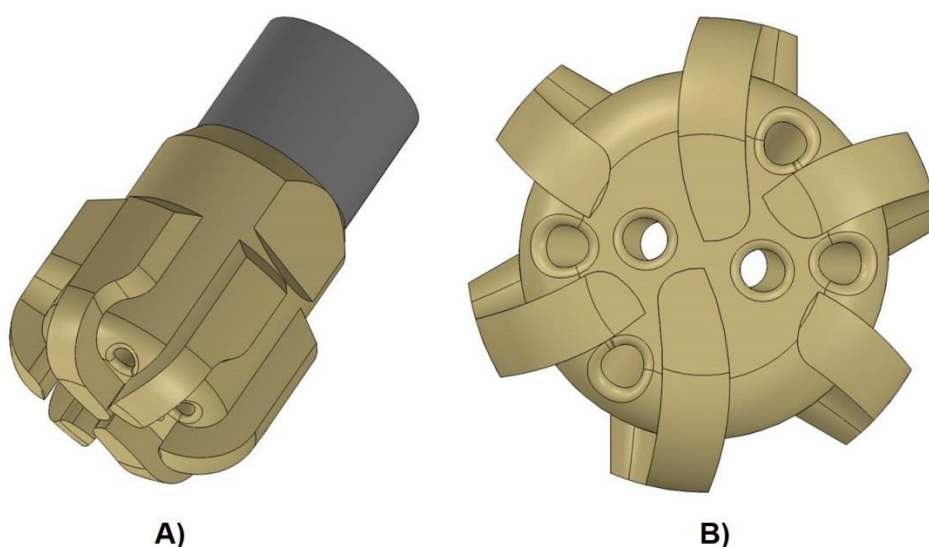


Figura 4.1 – Modelo 3D da broca PDC: A) Vista isométrica e B) Vista inferior.

A coluna de perfuração tem a forma de um tubo anular, com diâmetro externo de 139,7 mm e interno de 76,2 mm. O comprimento da coluna adotado foi de 10 metros, para assegurar o completo desenvolvimento do escoamento. A coluna é acoplada à parte superior da broca.

O domínio do fluido foi conseguido através de uma operação booleana, que consiste em um método de combinação de objetos sólidos para criação de uma nova forma. As geometrias da broca e da coluna foram subtraídas de um cilindro sólido com 215,9 mm de diâmetro. Foi utilizado um raio de arredondamento de 56,3 mm na base inferior do cilindro, representando melhor o formato do poço. Uma folga foi adicionada ao comprimento, com a base do cilindro sendo posicionada 3,18 mm abaixo da cabeça da broca.

Devido à simetria do conjunto broca-coluna, um corte foi feito no plano YZ do modelo. Foi adotado como domínio numérico metade da geometria, reduzindo o esforço computacional das simulações. A Figura 4.2 mostra o perfil final do domínio fluido do problema. Para melhorar a visualização, o comprimento total do espaço anular e do interior da coluna foi omitido.

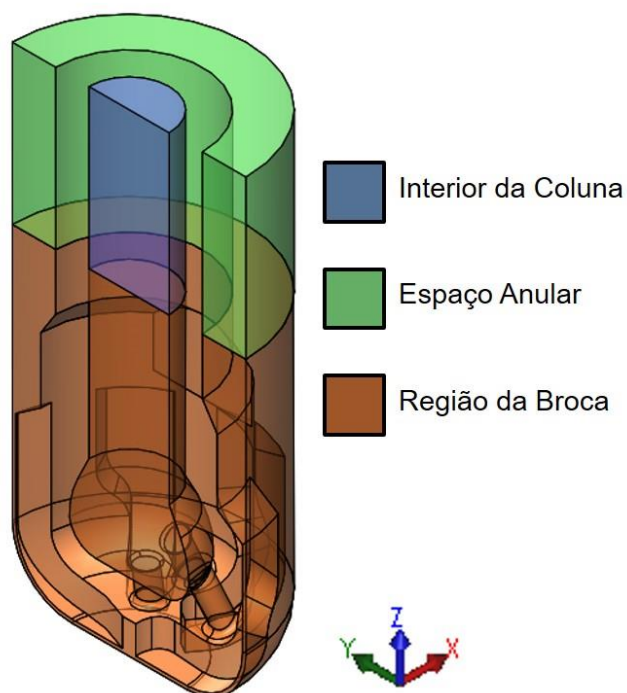


Figura 4.2 – Ilustração do domínio fluido do problema.

4.2 Condições de Contorno

Na Figura 4.3 são ilustradas as condições de contorno da região da broca. O espaço anular e interior da coluna são prolongamentos dos semicírculos superiores da imagem (áreas em verde e azul). As condições de contorno em verde claro, cinza, marrom claro e vermelho são aplicadas também para essas duas geometrias.

As superfícies de entrada e saída do fluido variam com o tipo de circulação (direta ou reversa) sendo simulada. Para circulação direta, a entrada acontece na região azul e a saída na região verde. Para circulação reversa é o contrário, ou seja, entrada em verde e saída em azul.

É considerada uma vazão mássica uniforme na entrada. O fluxo de fluido é direcionado normalmente à superfície. Para a saída, é adotada uma condição de abertura com pressão relativa nula. Com essa configuração, é permitida a passagem de fluido para dentro e para fora do domínio.

A área em verde claro corresponde à condição de periodicidade rotacional. Assim, se a superfície da esquerda for rebatida sobre a da direita, a posição dos nós de cada uma delas será coincidente. Todas as variáveis do problema são repetidas após 180° .

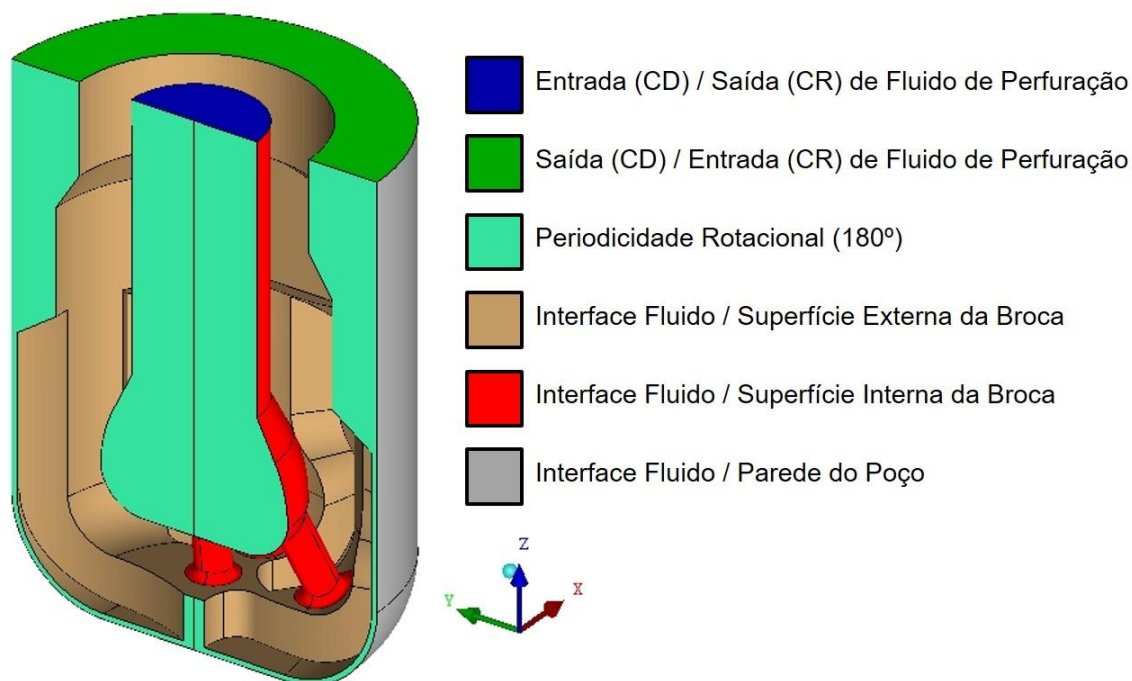


Figura 4.3 – Condições de contorno da região da broca.

Durante a operação de perfuração, a coluna e a broca são rotacionadas e o poço fica estacionário. Para atender a esses requisitos, são aplicadas configurações de parede lisa e sem deslizamento nas interfaces do fluido. Velocidade angular é imposta nas interfaces em vermelho e marrom claro. Na região cinza, uma rotação em sentido contrário é utilizada para manter o movimento relativo nulo com as partes que revolucionam.

A Tabela 4.1 mostra as condições de contorno do modelo numérico em suas formulações matemáticas:

Tabela 4.1 – Formulações matemáticas das condições de contorno do modelo numérico.

Condição de Contorno	Expressão Matemática
Entrada	$\dot{m} = \rho Q$
Saída	$p_{\text{relativa}} = 0$
Periodicidade	$\varphi(r, \theta, z) = \varphi(r, \theta + 180^\circ, z)$
Parede Rotativa	$U_{\text{parede}} = r\Omega$
Parede Estacionária	$U_{\text{parede}} = 0$

em que \dot{m} é a vazão mássica, φ é uma propriedade genérica, e (r, θ, z) é a posição em coordenadas cilíndricas.

4.3 Discretização das Equações de Balanço

O método usado pelo programa ANSYS CFX para a discretização das equações de conservação é o de volumes finitos baseado em elementos (MVFbE). O MVFbE é uma variação do Método de Volumes Finitos (MVF), com a possibilidade de se trabalhar com malhas compostas de elementos com falta de conectividade (não estruturadas) (Maneira, 2013). O processo de discretização das equações é apresentado por ANSYS (2013b). Uma síntese desse procedimento é mostrada nesta seção.

Com o MVFbE, o programa primeiramente emprega uma malha tridimensional para discretizar o domínio espacial e construir volumes finitos. As informações

requeridas do escoamento, como a massa e a velocidade, são guardadas nessas geometrias geradas.

Todas as propriedades do fluido e as variáveis da solução são armazenadas nos nós (vértices da malha). O volume de controle é formado ao redor de cada nó, conectando-se as linhas que vão dos centroides dos elementos até as medianas de seus vértices. Para se entender melhor essa ideia, a Figura 4.4 ilustra o volume de controle de uma malha bidimensional.

Em seguida, as equações da conservação da massa (Equação (4.1)), conservação da quantidade de movimento (Equação (4.2)) e conservação de um escalar genérico φ (Equação (4.3)) são integradas sobre cada volume de controle.

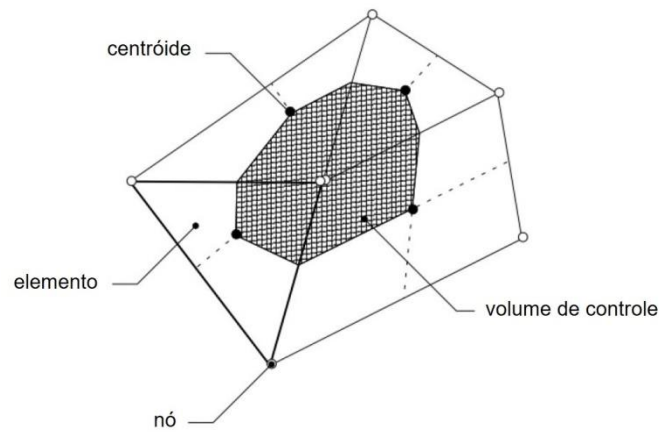


Figura 4.4 – Volume de controle de uma malha bidimensional.

Fonte: Adaptado de ANSYS (2013b).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\varphi \quad (4.3)$$

em que μ_{eff} é a viscosidade efetiva ($\mu + \mu_t$), Γ_{eff} é a difusividade efetiva ($\Gamma + \Gamma_t$) e S é um termo fonte.

O teorema da Divergência de Gauss é então aplicado para converter as integrais de volume em integrais de superfície. As equações se transformam em:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = - \int_S P dn_j + \int_S \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV \quad (4.5)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_S \rho U_j \varphi dn_j = \int_S \Gamma_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_{\varphi} dV \quad (4.6)$$

onde V e S indicam regiões de integração de volume e superfície, respectivamente. dn_j são os componentes cartesianos do vetor de área normal à superfície. As integrais de volume representam quantidades de geração ou acumulação e as integrais de superfície são as somas dos fluxos dessas quantidades atravessando as superfícies.

A próxima etapa é discretizar as integrais de volume e de superfície. As expressões das equações de conservação são assim modificadas para:

$$\forall \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 \quad (4.7)$$

$$\forall \left(\frac{\rho U_i - \rho^0 U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_j)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} \forall \quad (4.8)$$

$$\forall \left(\frac{\rho \varphi - \rho^0 \varphi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \varphi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{\varphi}} \forall \quad (4.9)$$

sendo $\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}$, \forall é o volume de controle, Δt é o intervalo de tempo e Δn_j é o vetor área normal à superfície discretizado. O subscrito *ip* denota o cálculo em um ponto de integração (*integration point*) e os somatórios são executados sobre todos esses pontos do volume de controle. O sobrescrito ⁰ indica o passo de tempo anterior. Uma explicação detalhada do cálculo de cada termo das Equações (4.7), (4.8) e (4.9) é descrita em ANSYS (2013b).

4.4 Fluxograma de Resolução do CFX

A simulação se desenvolve conforme o fluxograma simplificado mostrado na Figura 4.5. Depois de configurados a geometria, a malha, as condições de contorno e o valor inicial das variáveis, o programa CFX inicia a resolução das equações em regime permanente do problema. Para cada etapa, duas operações numéricas são realizadas (ANSYS, 2013b):

1. Geração de Coeficientes: As equações não lineares são linearizadas e agregadas na matriz de solução;
2. Solução das Equações: O método *Multigrid* é aplicado para solucionar as equações lineares. Esse processo envolve transportar iterações de tempos anteriores e posteriores para malhas virtuais progressivamente mais grosseiras. Depois de calculados, os resultados são trazidos de volta para a malha original mais refinada.

O algoritmo é executado até atingir o critério de convergência definido. Foi utilizado um valor eficaz do resíduo de 10^{-5} , para todas as equações de conservação, baseado nas simulações feitas por Maneira (2013).

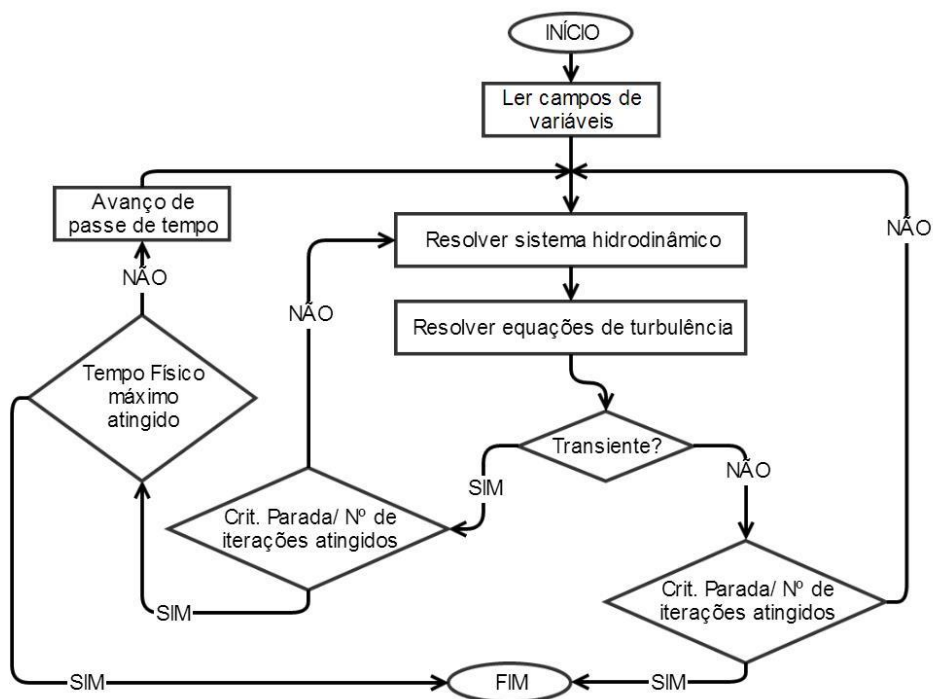


Figura 4.5 – Fluxograma simplificado de resolução do CFX.
 Fonte: Maneira (2013).

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do projeto: a validação do modelo numérico, o teste de malha e as análises das simulações com circulações direta e reversa em uma broca PDC.

5.1 Validação do Modelo Numérico

O artigo de Rothe e Pfitzer (1997) foi utilizado para verificar o modelo numérico do trabalho e, para isso, as mesmas configurações do experimento foram recriadas com o programa ANSYS CFX 15.0[®]. O procedimento em questão envolve o escoamento de fluido newtoniano através de tubos horizontais com rotações em direções opostas.

As dimensões exatas dos tubos não foram especificadas no artigo, mas foram citadas duas razões de referência, conforme as Equações (5.1) e (5.2):

$$\frac{L}{D_H} = 60 \quad (5.1)$$

$$\frac{R_1}{R_2} \approx 0,86 \quad (5.2)$$

com L sendo o comprimento dos tubos, R₁ e R₂ os raios interno e externo respectivamente, e D_H o diâmetro hidráulico. Para um espaço anular, o diâmetro hidráulico é a diferença entre o diâmetro externo e o interno. Os parâmetros geométricos utilizados na validação são apresentados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Parâmetros geométricos para a validação numérica.

R ₁	70,0 mm
R ₂	81,5 mm
D _H	23,0 mm
L	1380,0 mm

O fluido empregado foi água a 25 °C, com massa específica de 997,13 kg/m³ e viscosidade dinâmica de 8,91×10⁻⁴ Pa.s. A velocidade normal do escoamento na entrada do domínio foi igual a 3,849 x10⁻¹ m/s, com um número de Reynolds de 10.000 (o mesmo do artigo de referência). A velocidade de rotação foi de 60 rpm, com o tubo interno girando em sentido anti-horário e o tubo externo em sentido horário.

As malhas foram construídas no programa ANSYS ICEM CFD 15.0[®], procurando atender a recomendação de $y_+ < 300$. Essa orientação tem por objetivo garantir a correta aplicação da lei de parede pelo programa. Assim, foi feito um refino nas regiões próximas às paredes, conforme indicado em detalhe na Figura 5.1. A malha resultante possui aproximadamente 800.000 elementos e o valor máximo de y_+ foi de 1,089 em toda a geometria.

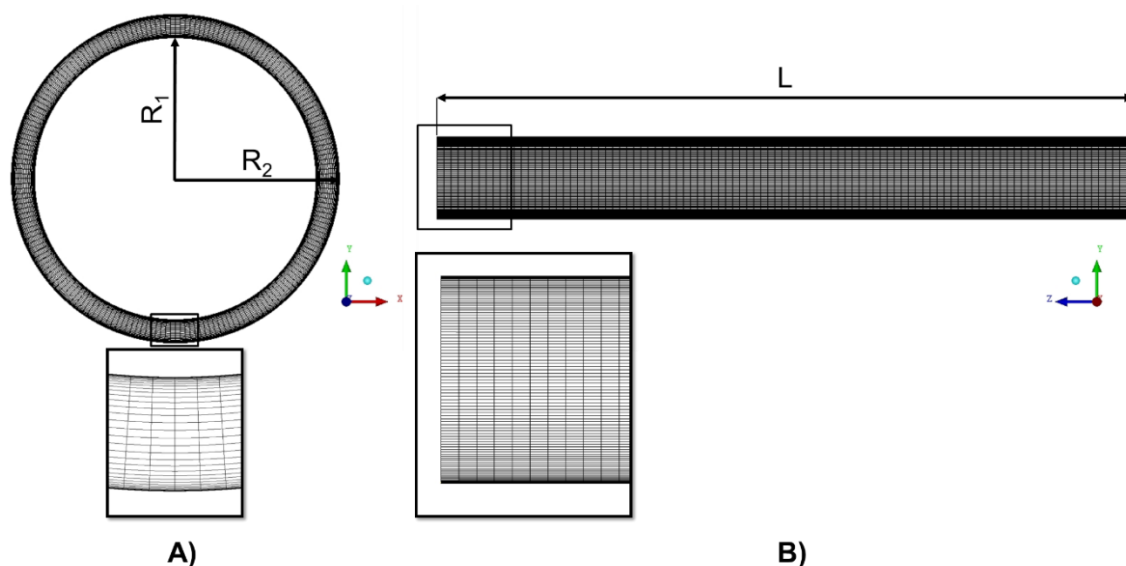


Figura 5.1 – Vistas frontal (A) e lateral (B) da malha da validação numérica.

Os perfis de velocidade axial e tangencial são mostrados na Figura 5.2 e na Figura 5.3, respectivamente, com a comparação dos dados experimentais (Rothe e Pfitzer, 1997) e numéricos de maneira adimensional. Para a velocidade axial, as curvas são praticamente idênticas e indicam uma boa precisão do modelo numérico. Já para a velocidade tangencial existe uma pequena diferença nos resultados localizados entre R/R_2 igual a 0,865 e 0,960.

Uma possível explicação para a diferença verificada é o número de elementos da malha nesse intervalo, com a necessidade de se aumentar o refino. Para as

simulações posteriores, a elaboração das malhas no espaço anular foi aprimorada. Outra fonte de erros é o fato de os dados experimentais terem sido obtidos de maneira gráfica, pois os autores do artigo não forneceram os valores analíticos dos seus testes.

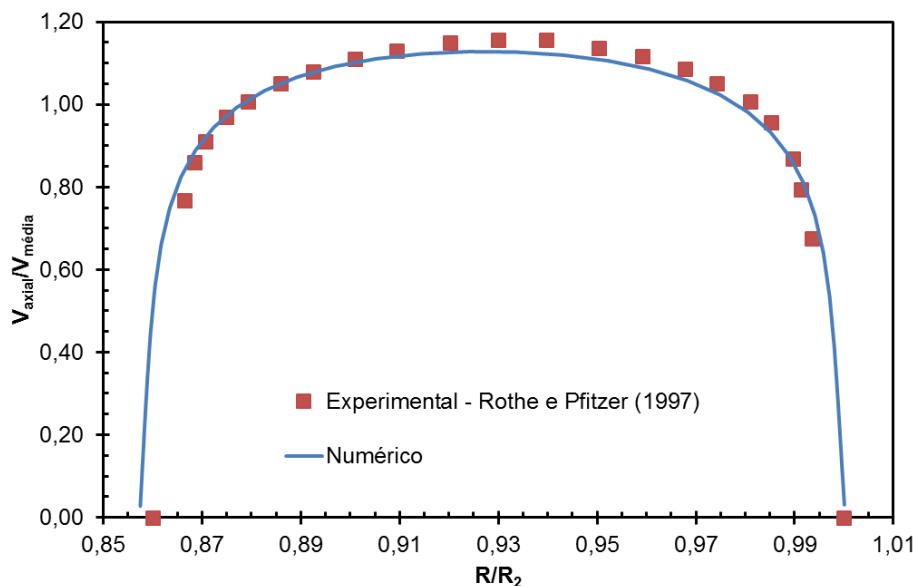


Figura 5.2 – Comparação dos perfis de velocidade axial experimental e numérico para escoamento em tubo anular ($Re=10.000$).

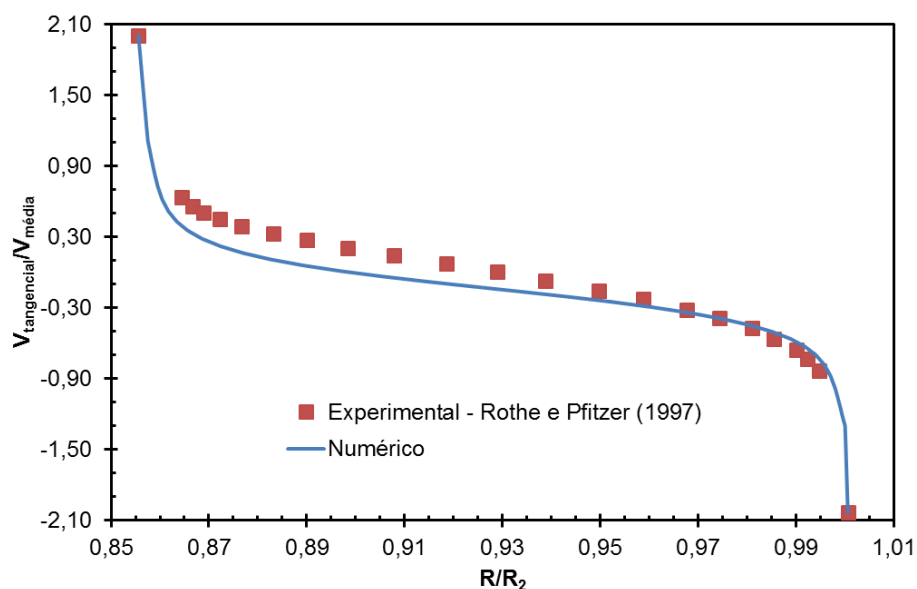


Figura 5.3 – Comparação dos perfis de velocidade tangencial experimental e numérico para escoamento em tubo anular ($Re=10.000$).

5.2 Teste de Malha

Os resultados numéricos devem ser independentes do número de elementos utilizados. Assim, no teste de malha são feitos refinamentos progressivos para se determinar quando os pontos de avaliação, usados como controle, não apresentam variação significativa. O caso com a malha mais refinada é tido como a solução de referência. Conforme descrito na Seção 4.1, o domínio é constituído pela broca, pelo espaço anular e pelo interior da coluna. Foram testadas três malhas para cada uma dessas regiões.

Devido à complexidade geométrica, a concepção da malha da broca foi feita de maneira não estruturada (Figura 5.4). O tamanho máximo dos elementos foi de 3 mm, com o fator de escala sendo variado para se aumentar o refino. A dimensão final do elemento é o resultado da multiplicação desse fator pelo tamanho máximo, logo a redução do fator implica em uma malha menos grosseira. Cinco camadas prismáticas regulares (com altura total de 1 mm) foram criadas próximas às paredes para que os valores de y_+ atendessem às condições recomendadas.

O espaço anular e o interior da coluna foram produzidos com malhas estruturadas (Figura 5.5), com o aumento progressivo do número de divisões na direção axial (eixo Z). Novamente, um maior refino foi feito nas regiões mais perto das paredes. A Tabela 5.2 sintetiza as configurações de todas as malhas, com os seus números de elementos.

Tabela 5.2 – Configurações das malhas empregadas com seus números de elementos.

Malha	Broca		Espaço Anular		Interior da Coluna	
	Fator de Escala	Nº de Elementos	Divisão Axial	Nº de Elementos	Divisão Axial	Nº de Elementos
M1	2,4	764.865	150	391.755	150	122.988
M2	1,9	1.402.382	300	781.305	300	245.388
M3	1,5	2.568.691	400	1.041.005	400	326.988

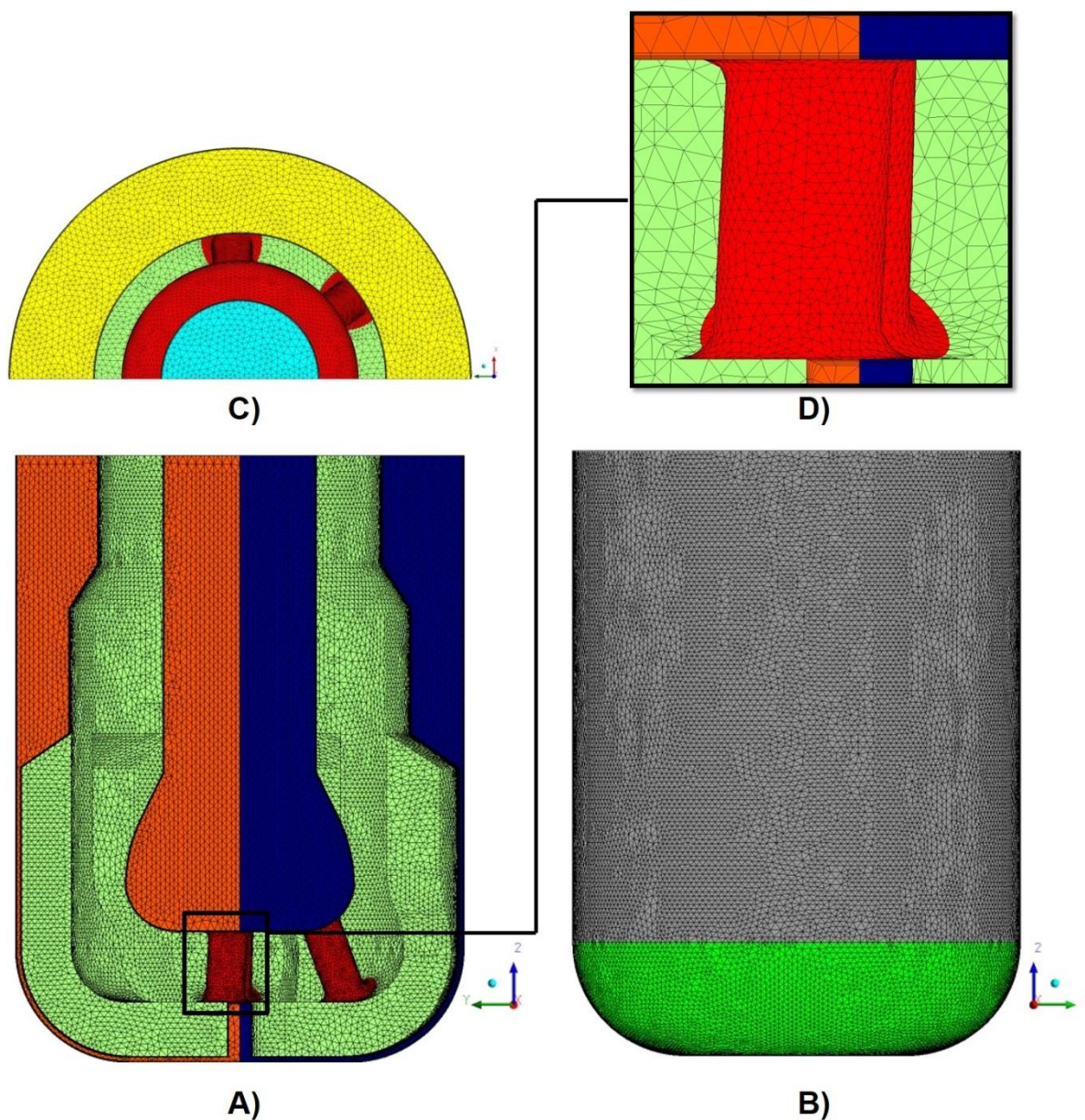


Figura 5.4 – Malha não estruturada da broca PDC: (A) Vista frontal, (B) Vista posterior, (C) Vista superior e (D) Vista em detalhe do ejetor central.

Os parâmetros operacionais do teste de malha de referência são apresentados na Tabela 5.3. Buscou-se analisar a situação mais crítica durante a perfuração, ou seja, a com o maior número de Reynolds em relação às simulações posteriores. O teste foi feito em regime permanente, com circulação direta do fluido de perfuração.

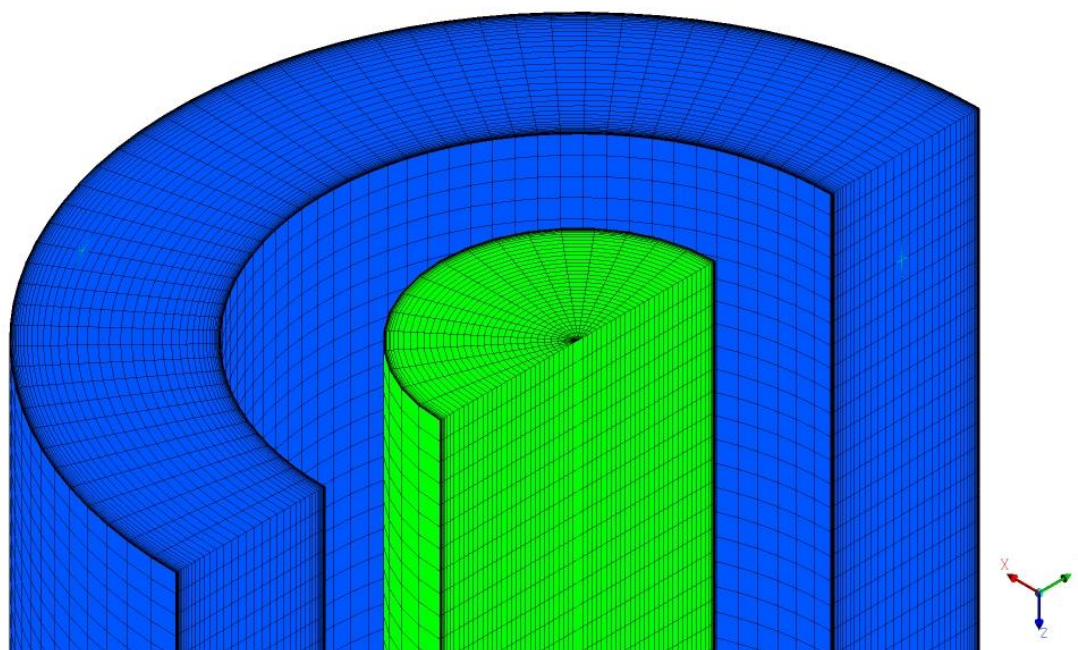


Figura 5.5 – Vista isométrica das malhas estruturadas do espaço anular (azul) e do interior da coluna (verde).

Tabela 5.3 – Parâmetros operacionais empregados no teste de malha de referência.

Parâmetro	Valor	Unidade
Viscosidade Dinâmica (μ)	10	cP
Vazão de Entrada (Q)	800	gpm
Rotação da Coluna (Ω)	200	rpm
Massa Específica (ρ)	1600	kg/m ³

Foram usados quatro critérios para a seleção de malha. O primeiro foi a força de impacto média exercida pelo fluido de perfuração no fundo do poço (F_p), e foi calculada pela integral de superfície da pressão (Equação (5.3)).

$$F_p = -\int_S p \vec{n} \cdot d\vec{S} \quad (5.3)$$

Sendo \vec{n} o vetor normal à superfície S.

O segundo critério de escolha foi a perda de carga (H_L), que indica a perda de energia dinâmica do sistema (Maneira, 2013) e é igual à diferença de pressão entre a entrada e a saída, mais a variação da energia cinética (Equação (5.4)). O terceiro foi

o tempo total de simulação de cada malha. Por último, foram comparados os perfis de velocidade axial na saída do ejetor central (Figura 5.6).

$$H_L = \left(p + \frac{\rho}{2} U \right)_{\text{Entrada}} - \left(p + \frac{\rho}{2} U \right)_{\text{Saída}} \quad (5.4)$$

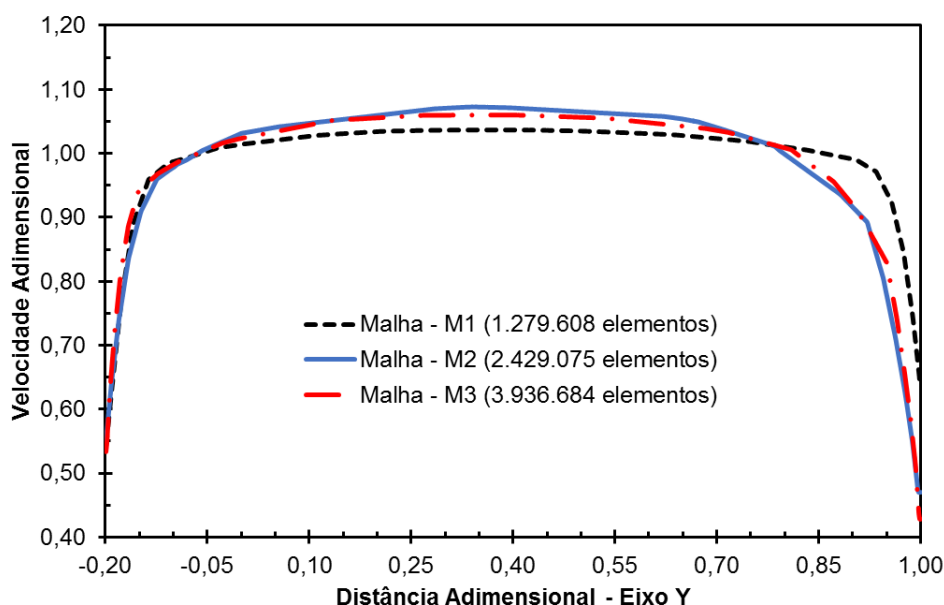


Figura 5.6 – Comparação dos perfis de velocidade axial na saída do ejetor central (Re=100.000).

Os resultados do teste de malha são exibidos na Tabela 5.4. Também foram calculadas as diferenças percentuais de F_P e H_L para a malha mais refinada (M3), pela Equação (5.5). O máximo valor de y_+ foi de 54,10 para todos os testes realizados.

Tabela 5.4 – Resultados do teste de malha.

Malha	F_P (N)	Diferença (%)	H_L (kPa)	Diferença (%)	Tempo de Simulação
M1	1.046,03	15,07	730,00	9,46	8h26min
M2	1.225,92	0,46	771,33	4,33	17h04min
M3	1.231,59	-	806,25	-	1d13h08min

$$\text{Diferença \%} = \frac{\text{Critério}(M3) - \text{Critério}(M_i)_{i=1}^2}{\text{Critério}(M3)} \quad (5.5)$$

Dentre as três malhas testadas, foi adotada a M2 para ser utilizada nas simulações do projeto. A razão principal dessa opção foi a pouca variação de F_P , H_L (menores do que 5%) e do perfil de velocidade do ejetor em relação à M3, além disso, o tempo de simulação foi bem maior para a malha mais refinada.

5.3 Grade de Simulações

As simulações foram planejadas para se avaliar a influência da viscosidade dinâmica (μ), da vazão de entrada (Q), da rotação da coluna (Ω) e da massa específica (ρ) no escoamento em regime permanente do fluido de perfuração. Cada um desses parâmetros foi variado em uma faixa de valores adequada. Enquanto se alternava uma propriedade, as outras eram mantidas constantes em suas médias. A Tabela 5.5 apresenta os valores usados para cada parâmetro operacional, e suas médias, das simulações com circulações direta e reversa.

Tabela 5.5 – Valores dos parâmetros operacionais utilizados nas simulações.

Parâmetro	Circulação Direta	Média	Circulação Reversa	Média
μ (cP)	10; 20; 30; 40; 50	30	10; 20; 30; 40; 50	30
Q (gpm)	200; 350; 500; 650; 800	500	100; 200; 300; 400	250
Ω (rpm)	0; 50; 100; 150; 200	100	0; 50; 100; 150; 200	100
ρ (kg/m ³)	1000; 1200; 1400; 1600	1300	1000; 1200; 1400; 1600	1300

5.4 Características das Circulações Direta e Reversa

O modo como o fluido de perfuração é bombeado para dentro do poço altera as características gerais do escoamento. Nesta seção, são avaliados alguns aspectos dos casos médios das simulações para as circulações direta e reversa.

Na Figura 5.7, podem ser observadas as linhas de corrente na região da broca para a circulação direta. O fluido entra pelo interior da coluna e é acelerado nos ejetores. Logo antes, o fluido acaba formando vórtices nas paredes laterais e perdendo energia cinética. Após atingir o fundo do poço, o fluido se espalha, passa por entre os cortadores e inicia seu retorno pelo espaço anular com velocidades mais baixas. Vários locais com recirculações são formados, indicando perdas de eficiência na remoção dos cascalhos.

Para a circulação reversa, as linhas de corrente são mostradas na Figura 5.8. O fluido desce pelo espaço anular e, diferentemente da circulação direta, aumenta sua velocidade ao adentrar o interior da coluna (como pode ser notado pela escala da Figura 5.8). Esse aumento da quantidade de movimento auxilia no transporte dos cascalhos e na limpeza do poço. O número de recirculações é menor, com a presença de alguns vórtices no fundo do poço e na região de saída dos ejetores. O caminho de ascensão do fluido é mais direto e conciso para a circulação reversa.

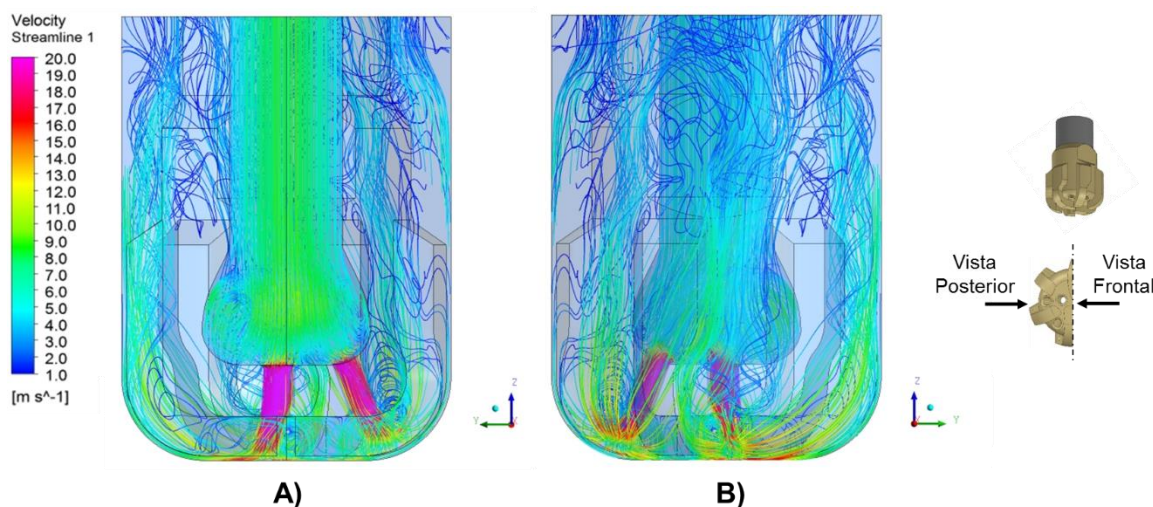


Figura 5.7 – Linhas de corrente para a circulação direta:
(A) Vista frontal e (B) Vista posterior.
 $(\mu = 30 \text{ cP}; Q = 500 \text{ gpm}; \Omega = 100 \text{ rpm}; \rho = 1300 \text{ kg/m}^3)$

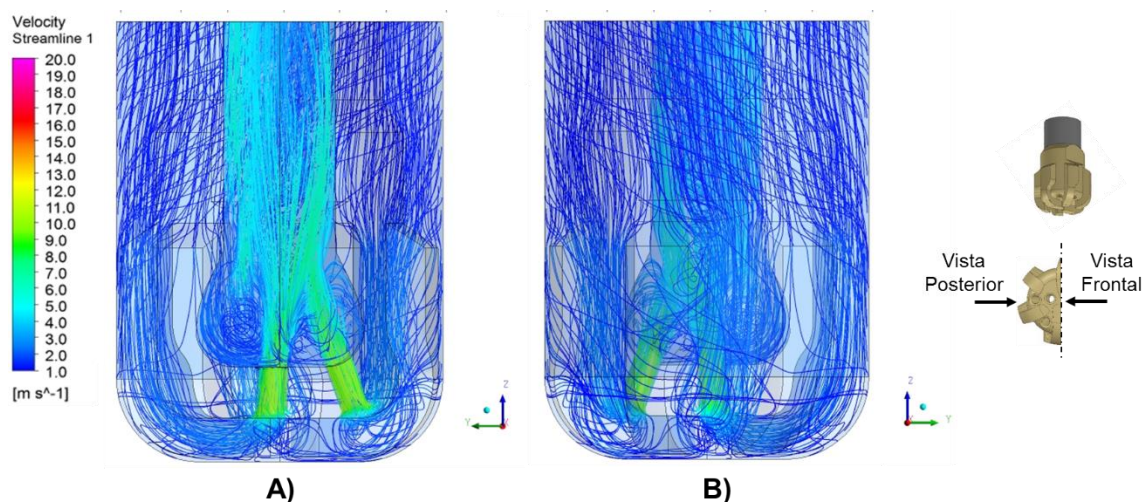
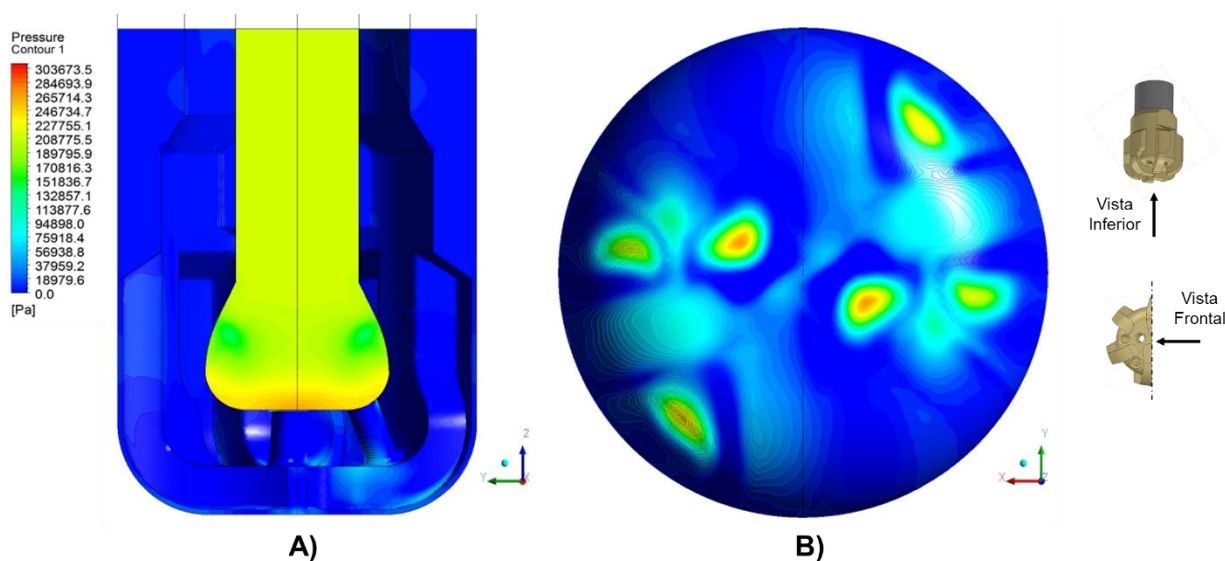


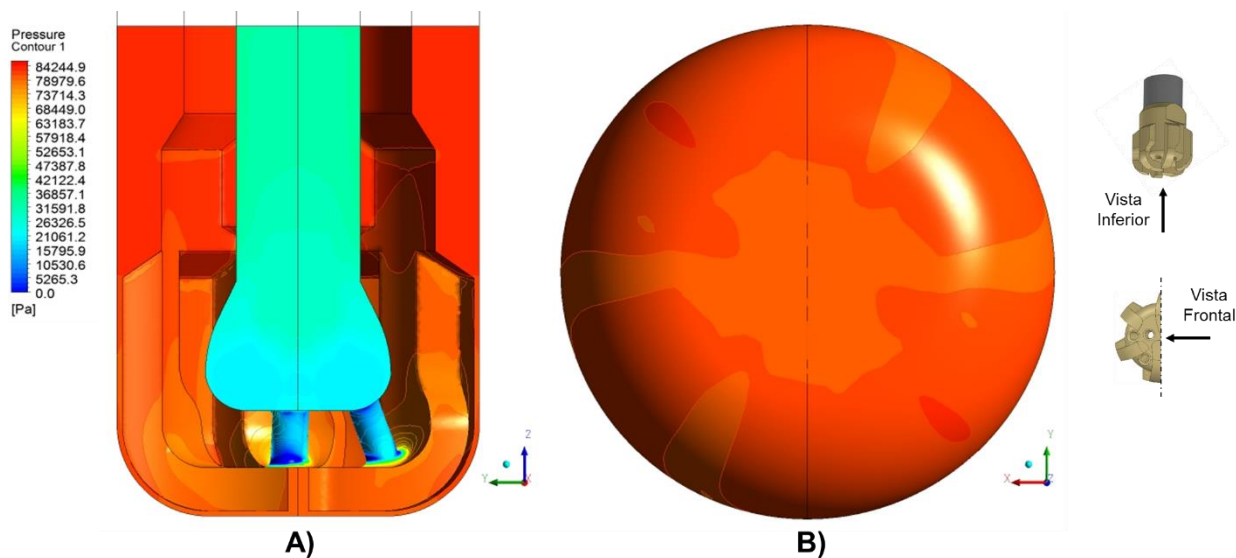
Figura 5.8 – Linhas de corrente para a circulação reversa:
(A) Vista frontal e (B) Vista posterior.
 $(\mu = 30 \text{ cP}; Q = 250 \text{ gpm}; \Omega = 100 \text{ rpm}; \rho = 1300 \text{ kg/m}^3)$

As distribuições de pressão para as circulações direta e reversa são mostradas na Figura 5.9 e na Figura 5.10, respectivamente. Das escalas das figuras, é possível notar que a magnitude da pressão na circulação direta é bem maior. Contudo, seus maiores valores estão localizados no interior da coluna e na saída dos ejetores, em pequenas áreas de pico. Já para a circulação reversa, a pressão no fundo do poço é mais uniforme e melhor distribuída. Isso ajuda no processo de perfuração, com o fluido exercendo uma força média maior sobre as rochas e facilitando a retirada de material.

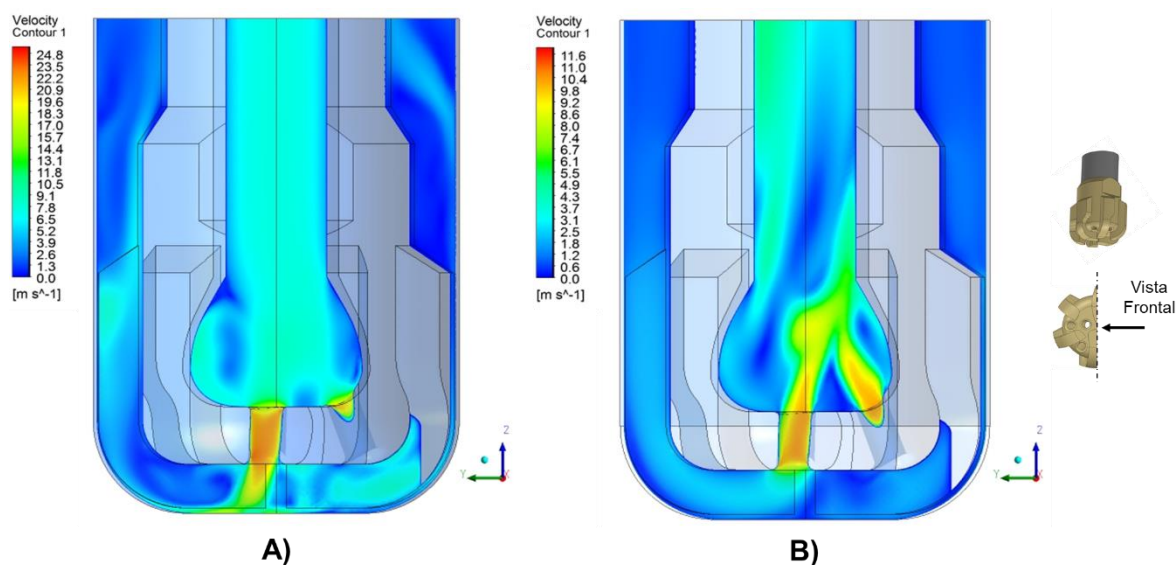
Os ejetores são as regiões com os maiores gradientes de velocidade. Conforme pode ser visto na Figura 5.11, os campos de velocidade no ejetor central são distintos para os dois tipos de circulação. Na direta, apesar da velocidade ser maior no interior do ejetor, ela decai bruscamente quando o escoamento atinge o fundo do poço. Na reversa isso não acontece, pois, o fluido não tem nenhuma restrição física imediata. Os jatos provenientes dos outros ejetores também se combinam mais facilmente nessa situação, e a velocidade média de saída é maior.



**Figura 5.9 - Distribuição de pressão para a circulação direta:
(A) Vista frontal e (B) Vista inferior.
($\mu = 30$ cP; $Q = 500$ gpm; $\Omega = 100$ rpm; $\rho = 1300$ kg/m³)**



**Figura 5.10 – Distribuição de pressão para a circulação reversa:
 (A) Vista frontal e (B) Vista inferior.
 ($\mu = 30$ cP; $Q = 250$ gpm; $\Omega = 100$ rpm; $\rho = 1300$ kg/m³)**



**Figura 5.11 – Vista frontal dos campos de velocidade no ejetor central para as circulações direta (A) e reversa (B).
 (A) – ($\mu = 30$ cP; $Q = 500$ gpm; $\Omega = 100$ rpm; $\rho = 1300$ kg/m³)
 (B) – ($\mu = 30$ cP; $Q = 250$ gpm; $\Omega = 100$ rpm; $\rho = 1300$ kg/m³)**

5.5 Análise da Variação da Viscosidade Dinâmica

Para a análise da variação da viscosidade dinâmica nos resultados, além da força de impacto média no fundo do poço e da perda de carga, também foram calculadas outras duas variáveis. A primeira foi a tensão de cisalhamento média na broca (τ_w), que indica a capacidade do fluido para lubrificar e limpar o equipamento durante a perfuração. A limpeza das paredes da broca é uma função importante, pois evita o seu emperramento.

A outra variável calculada foi a velocidade média em um volume de controle localizado nas regiões de saída do domínio (espaço anular para a circulação direta e interior da coluna para a reversa). Quanto maior a velocidade do fluido nessas regiões, mais eficiente é o transporte dos cascalhos gerados durante a perfuração. Os valores de F_P , H_L , τ_w e velocidade média na saída foram determinados também para os outros parâmetros operacionais – vazão de entrada, massa específica e velocidade de rotação – junto com curvas de ajuste dos dados (exceto para aqueles que são invariáveis).

Na Figura 5.12, pode-se observar que a força média de impacto tem relação diretamente proporcional à viscosidade dinâmica. Os valores de F_P para a circulação reversa são mais altos, facilitando o processo de limpeza do fundo do poço. As curvas de ajuste indicam uma variação linear de F_P com μ .

A perda de carga segue a mesma tendência da força, conforme pode ser visto na Figura 5.13, aumentando com o incremento da viscosidade. Dessa vez, H_L é maior para a circulação direta, devido à presença de um número maior de recirculações e do estrangulamento do escoamento nos ejetores. A energia dinâmica do escoamento acaba sendo mais dissipada nessa situação e são necessárias maiores vazões para garantir o carregamento de detritos para a superfície.

Da Figura 5.14, nota-se que a tensão de cisalhamento média nas paredes da broca tem magnitude maior para a circulação direta em comparação com a reversa. Devido aos vórtices presentes, existe um aumento dos gradientes de velocidade do escoamento e, conseqüentemente, são gerados maiores esforços mecânicos. Quanto maior o valor de τ_w , melhor é o processo de limpeza e lubrificação da broca.

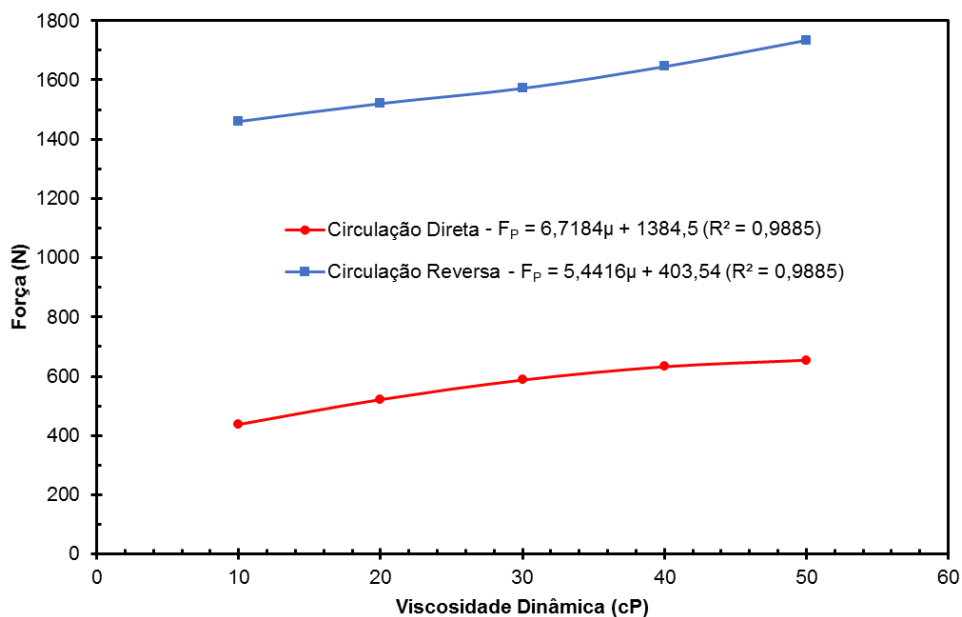


Figura 5.12 – Variação da força no fundo do poço em função da viscosidade dinâmica.

A velocidade média na saída do escoamento (espaço anular para a circulação direta e interior da coluna para a reversa) permanece quase constante com a variação de μ para ambos os casos (Figura 5.15). Contudo, ela é maior para a circulação reversa, devido à menor área da seção transversal do interior da coluna e das menores dissipações da quantidade de movimento.

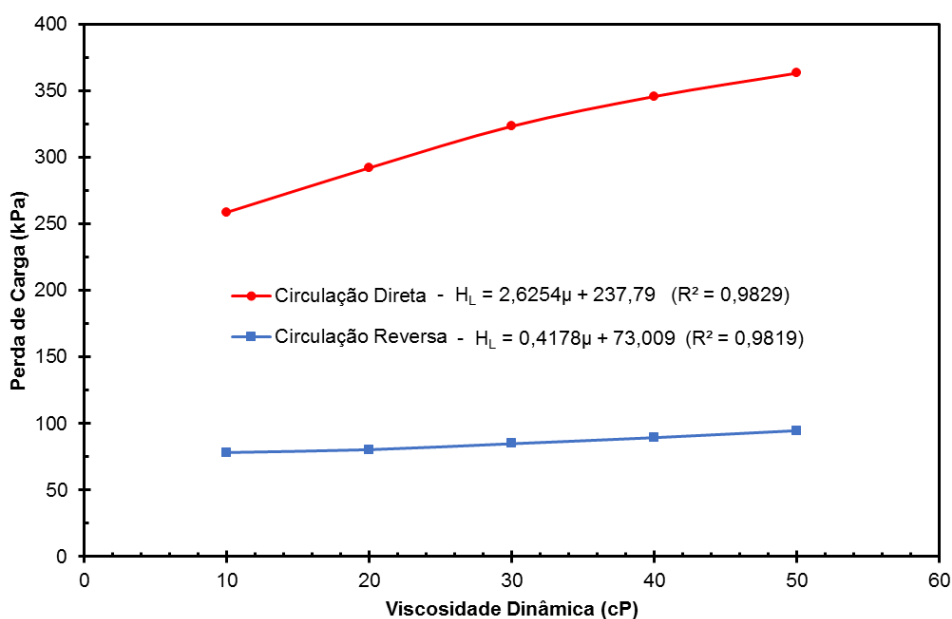


Figura 5.13 – Variação da perda de carga em função da viscosidade dinâmica.

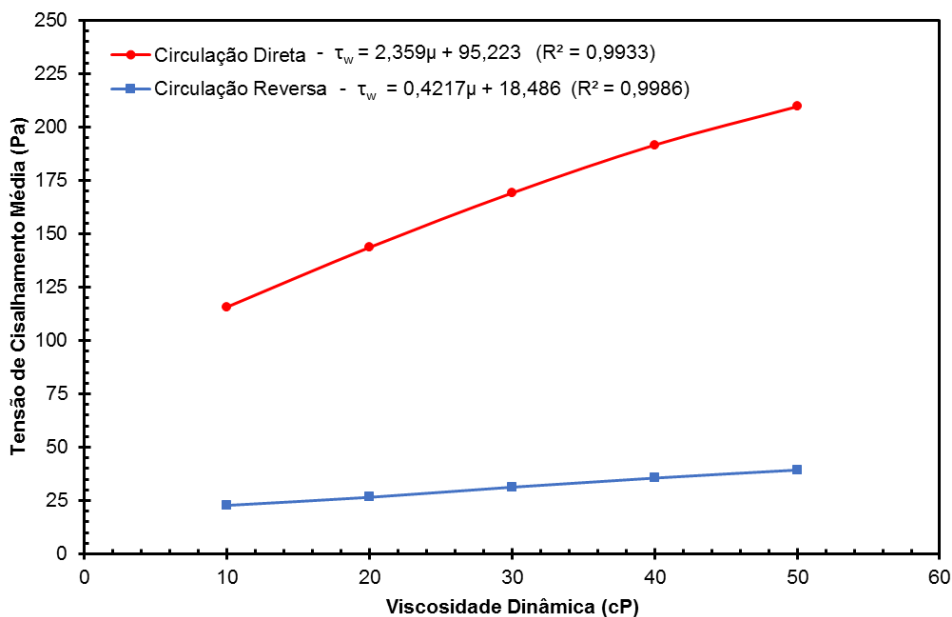


Figura 5.14 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da viscosidade dinâmica.

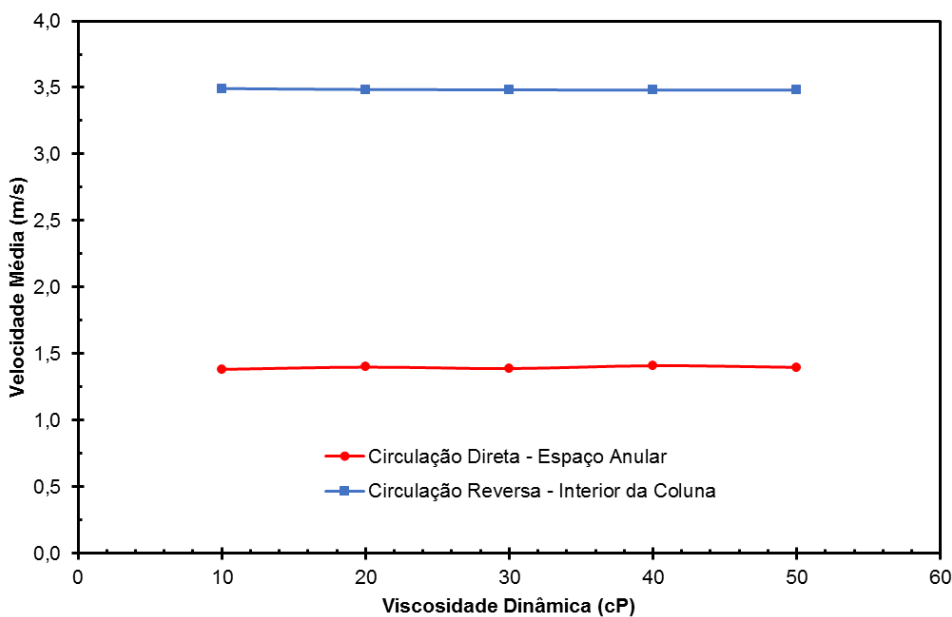


Figura 5.15 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da viscosidade dinâmica.

5.6 Análise da Variação da Vazão de Entrada

Conforme pode ser visualizado na Figura 5.16, na Figura 5.17 e na Figura 5.18, a vazão de entrada tem grande influência nas características do escoamento. Os

valores da força de impacto no fundo do poço, da perda de carga e da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca, respectivamente, aumentam significativamente com o acréscimo da injeção de fluido de perfuração para ambos os tipos de bombeio.

Da Figura 5.16, da Figura 5.17 e da Figura 5.18 é importante notar que para a mesma faixa de vazões utilizada nas duas circulações – compreendida entre 200 e 400 gpm – a reversa se mostra mais eficiente em relação às variáveis F_P e H_L . A força de impacto média exercida pelo fluido é maior, e ao mesmo tempo se tem uma menor perda de carga. A tensão de cisalhamento média é menor para a reversa, o que é uma desvantagem em comparação com a circulação direta.

A vazão é um dos parâmetros de maior impacto no custo operacional, pois exige a aplicação de equipamentos mais potentes e consumo de mais energia para atender maiores demandas. A circulação reversa opera com valores menores de Q , mas pode apresentar deficiências no processo de limpeza da broca por causa dos menores valores de τ_w . Essas considerações devem ser levadas em conta para a determinação de qual tipo de bombeamento tem o melhor custo-benefício.

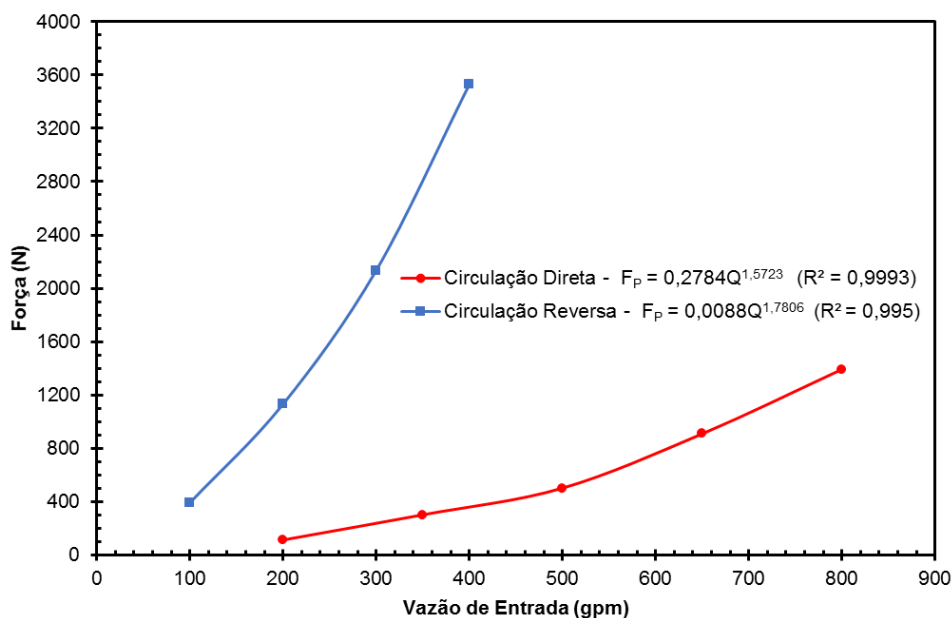


Figura 5.16 – Variação da força no fundo do poço em função da vazão de entrada.

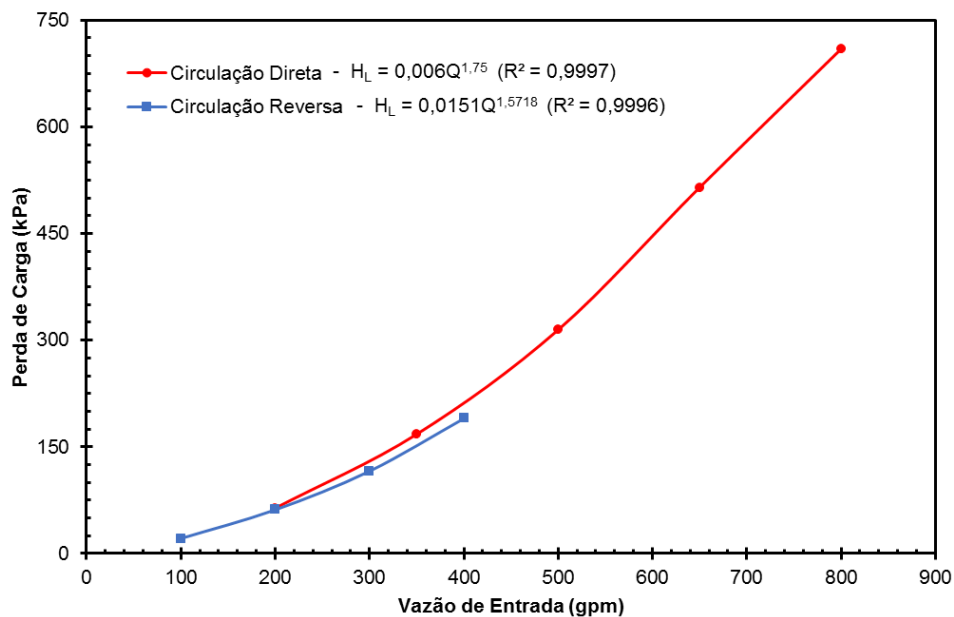


Figura 5.17 – Variação da perda de carga em função da vazão de entrada.

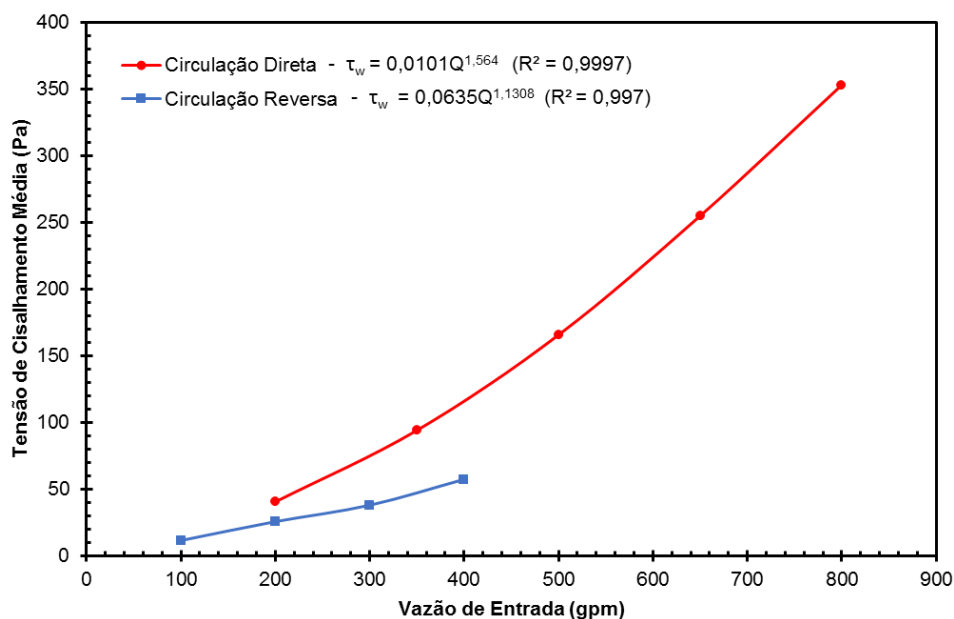


Figura 5.18 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da vazão de entrada.

A velocidade média do fluido nas regiões de saída do escoamento tem crescimento linear, como mostrado na Figura 5.19, e é maior para a circulação reversa. O incremento da vazão aumenta o número de Reynolds, ou seja, o

escoamento fica mais turbulento. Consequentemente, o transporte de partículas sólidas para a superfície é melhorado.

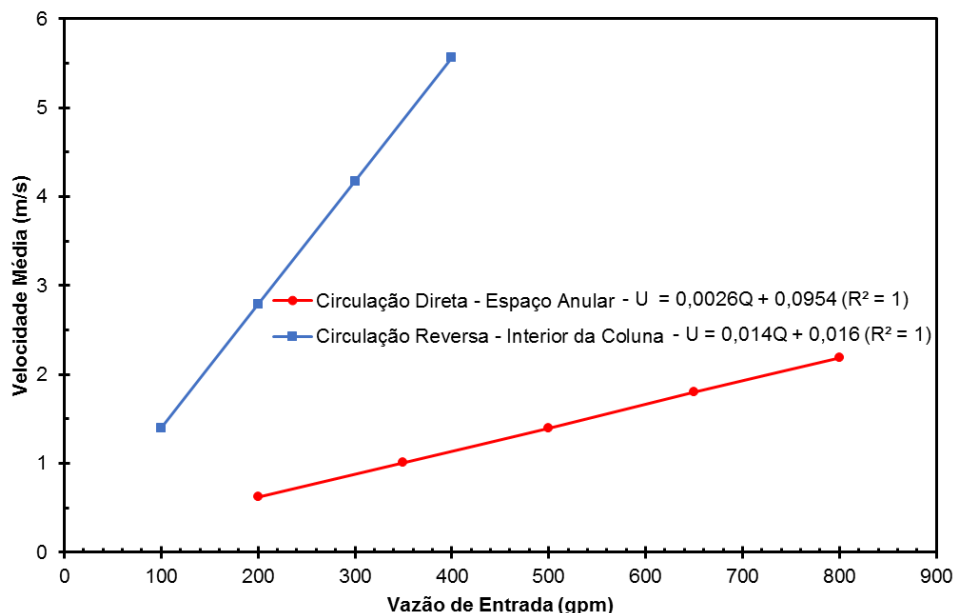


Figura 5.19 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da vazão de entrada.

5.7 Análise da Variação da Massa Específica

O efeito da variação da massa específica sobre F_P (Figura 5.20), H_L (Figura 5.21) e τ_w (Figura 5.22), é o de aumentar linearmente seus valores para maiores ρ empregados. Novamente, a circulação reversa tem características mais convenientes em relação à força de impacto média e à perda de carga, mas apresenta menores tensões de cisalhamento médias na broca. Os resultados e as discussões são similares aos da alteração de viscosidade (Seção 5.5). No volume de controle das regiões de saída do escoamento, a velocidade média permanece praticamente constante com a mudança de ρ (Figura 5.23) para ambos os casos.

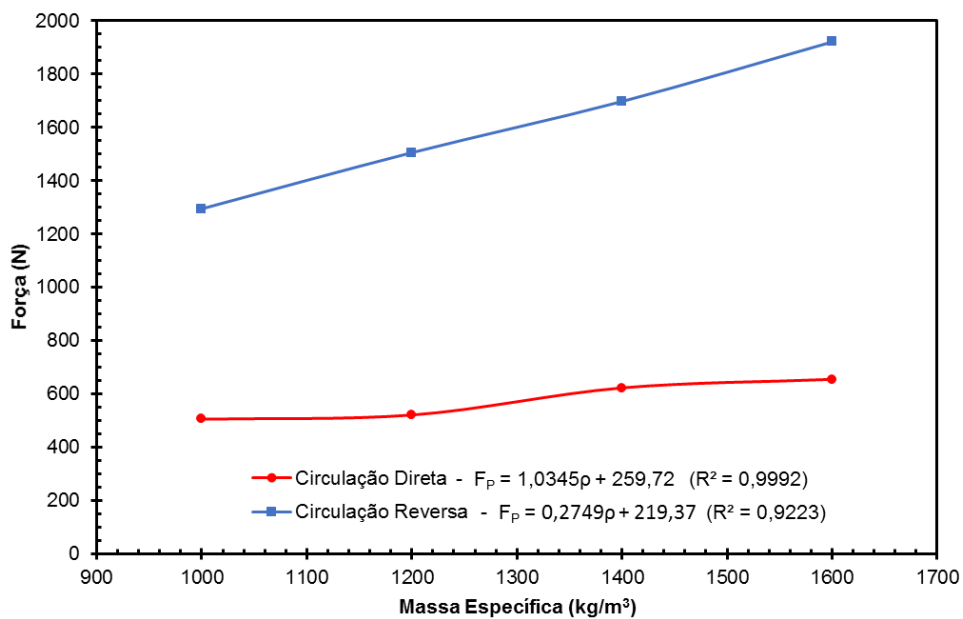


Figura 5.20 – Variação da força no fundo do poço em função da massa específica.

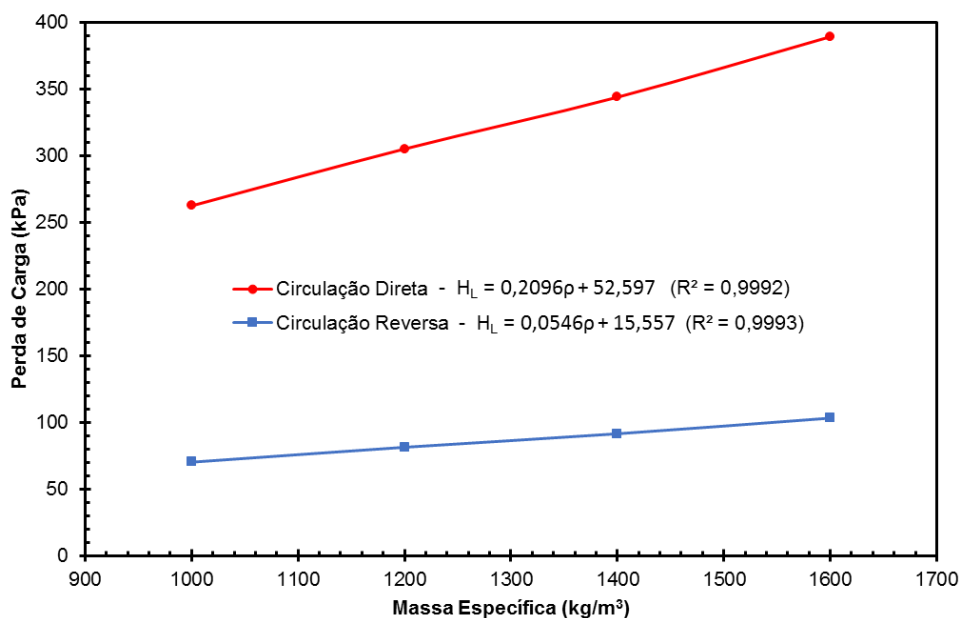


Figura 5.21 – Variação da perda de carga em função da massa específica.

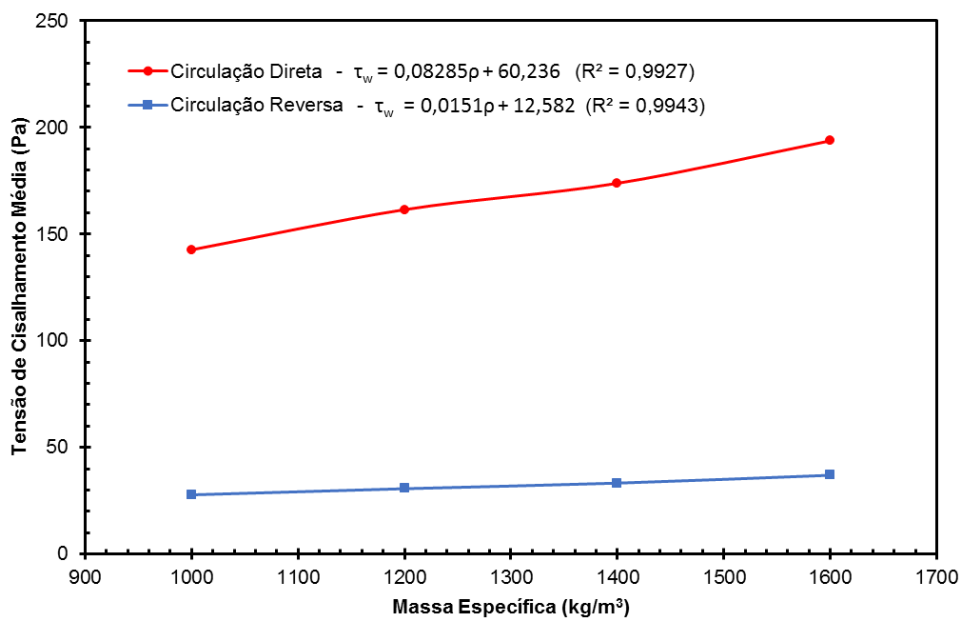


Figura 5.22 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da massa específica.

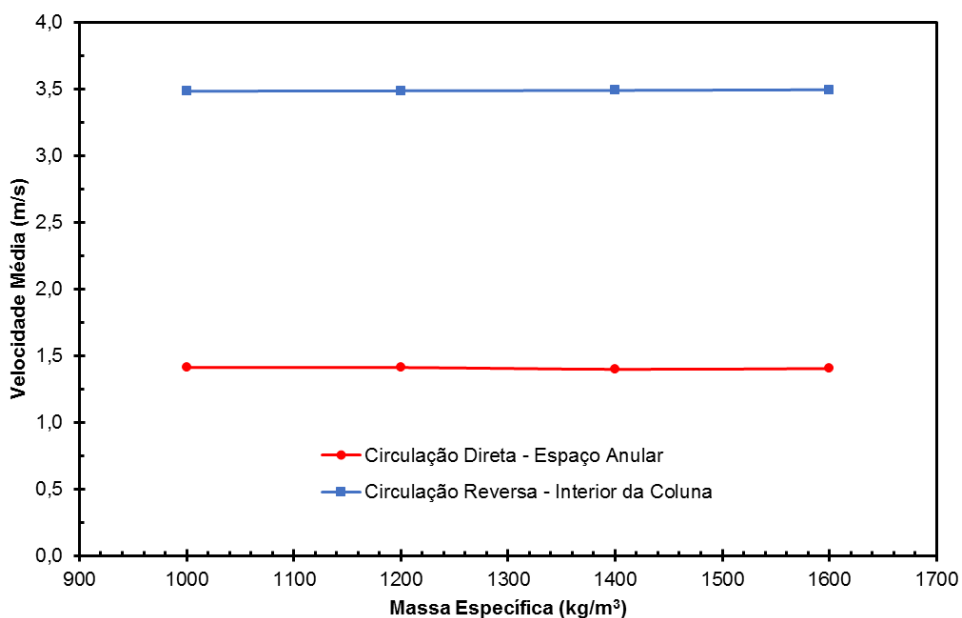
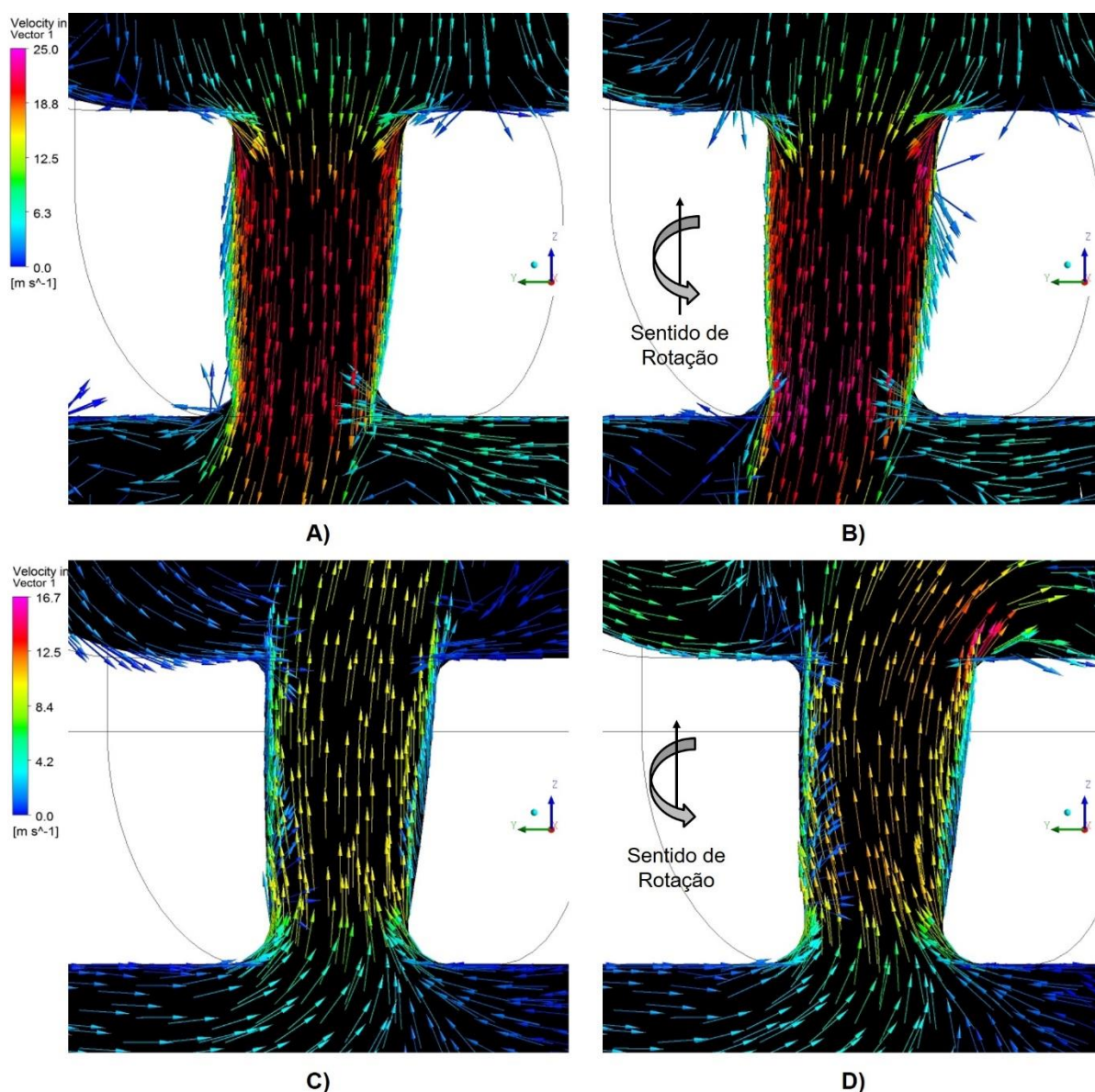


Figura 5.23 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da massa específica.

5.8 Análise da Variação da Rotação da Coluna

O último parâmetro analisado foi a rotação da coluna de perfuração. Sua influência nas características do escoamento pode ser observada na Figura 5.24, onde são mostrados os vetores de velocidade no ejetor central para $\Omega = 0$ rpm e $\Omega = 200$ rpm. Pode ser notado o aumento da velocidade tangencial, pois as setas estão mais inclinadas em relação ao eixo Z para a coluna rotacionando. Esse efeito é mais pronunciado nos vetores próximos às paredes e para a circulação reversa.



**Figura 5.24 – Campo vetorial de velocidade no ejetor central:
Circulação direta – (A) $\Omega = 0$ rpm e (B) $\Omega = 200$ rpm
Circulação reversa – (C) $\Omega = 0$ rpm e (D) $\Omega = 200$ rpm.**

A atuação da rotação na força média exercida no fundo do poço é apresentada na Figura 5.25. Para a circulação direta, não há variação expressiva de F_P . Já para a reversa, a força aumenta de maneira linear. Como a distribuição de pressão é mais uniforme para a circulação reversa, este tipo de circulação sofre maior influência do aumento da velocidade tangencial com Ω . O fluido escoa com mais energia em direção às paredes laterais. Na direta, as áreas de maior pressão estão concentradas no fundo do poço – logo abaixo dos ejetores – e por isso a força média calculada não se altera significativamente com a velocidade de rotação da coluna de perfuração.

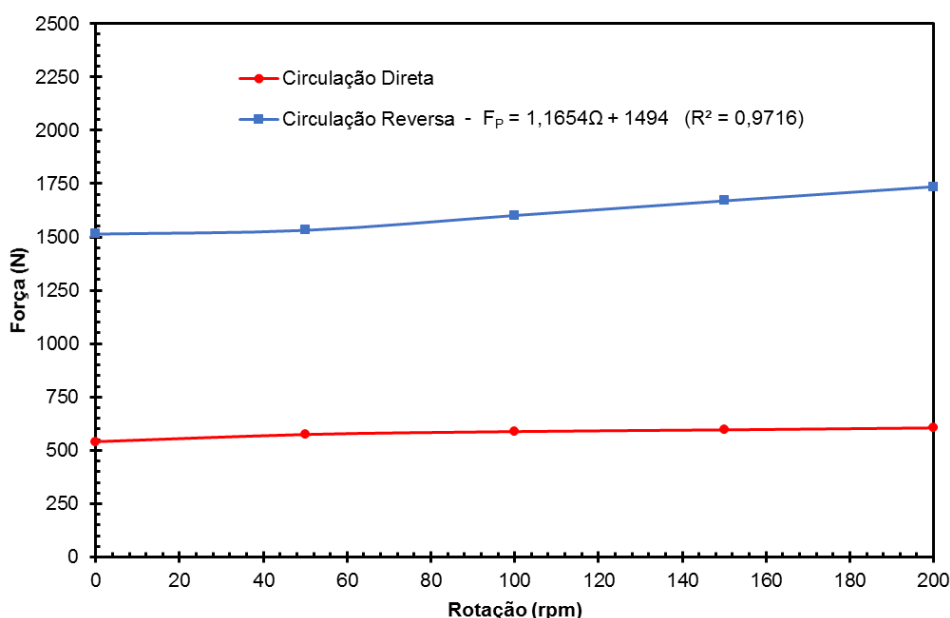


Figura 5.25 – Variação da força no fundo do poço em função da rotação da coluna.

A perda de carga teve aumentos moderados para ambas as circulações, como pode ser notado pelos coeficientes angulares das correlações da Figura 5.26. A tensão de cisalhamento média (Figura 5.27) exibe um comportamento similar ao de F_P , com um leve acréscimo para a reversa e pouca variação para a direta em função da variação de rotação.

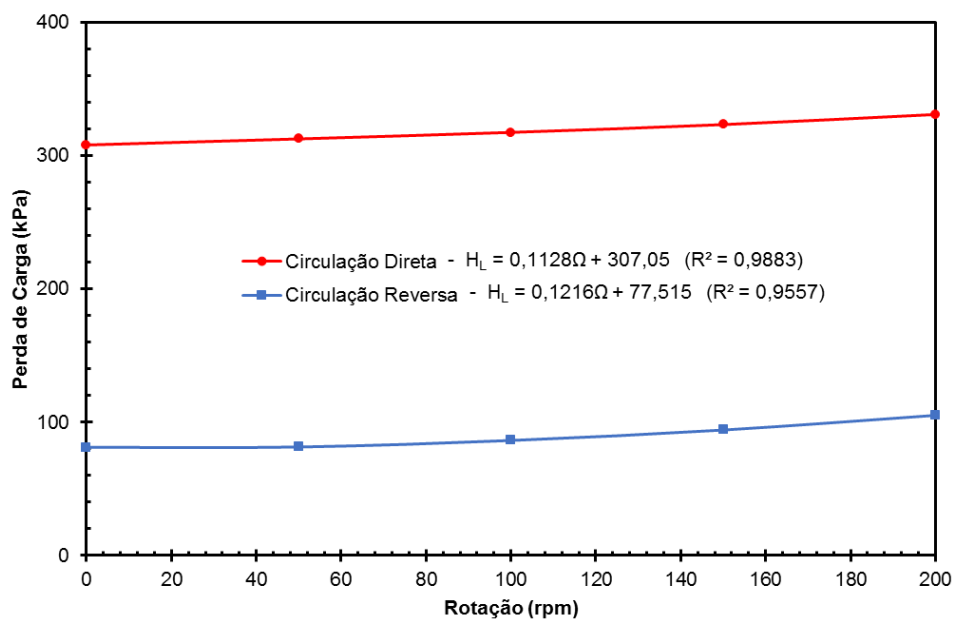


Figura 5.26 – Variação da perda de carga em função da rotação da coluna.

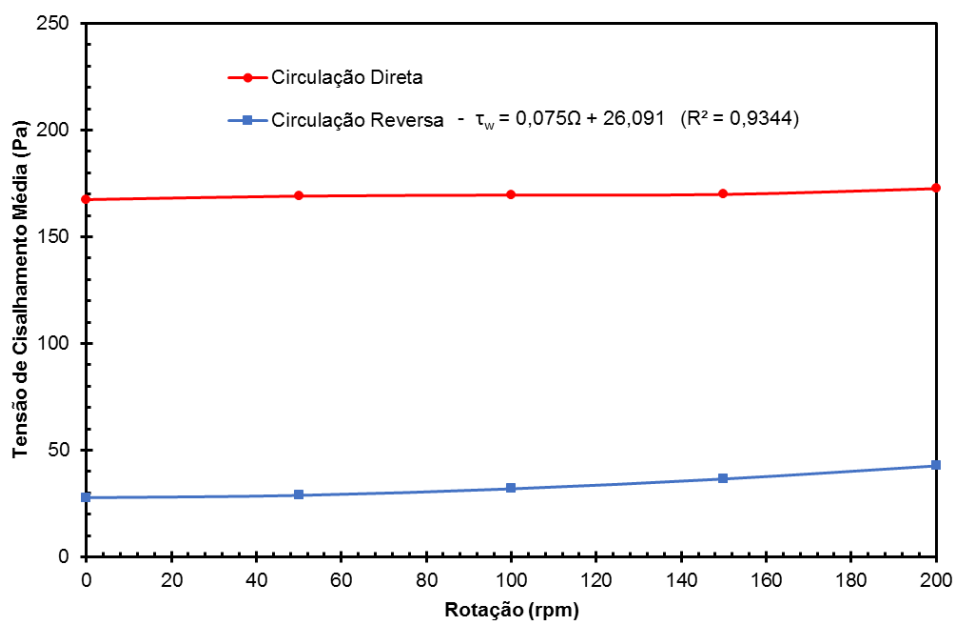


Figura 5.27 – Variação da tensão de cisalhamento média nas paredes da broca em função da rotação da coluna.

As curvas de velocidade média na saída do escoamento se mantiveram constantes dentro da faixa de rotações empregadas (Figura 5.28).

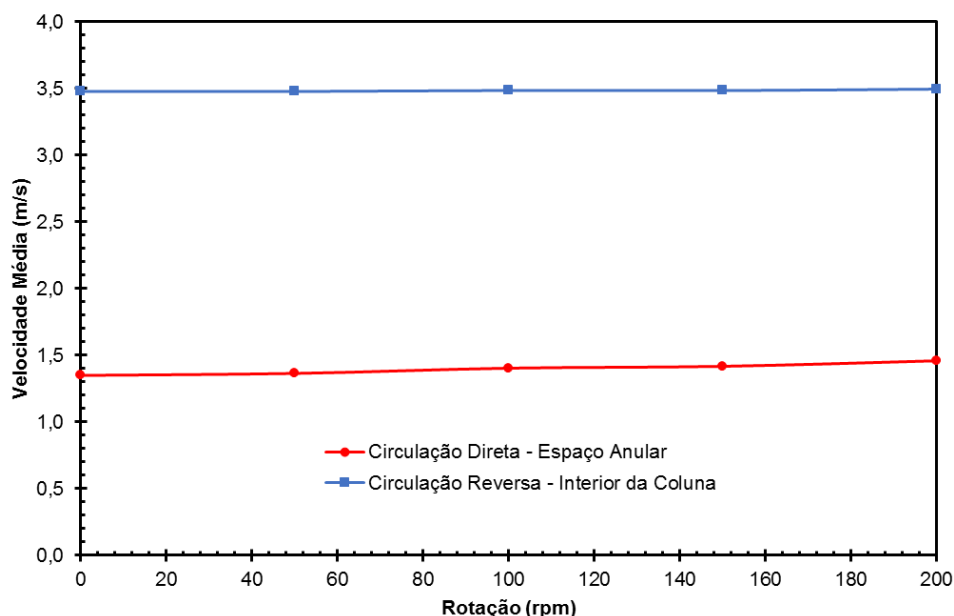


Figura 5.28 – Variação da velocidade média nas regiões de saída do escoamento em função da rotação da coluna.

5.9 Síntese dos Resultados

A vazão de entrada foi a propriedade de maior influência nas variáveis estudadas (F_P , H_L , τ_w e velocidade média na saída), para os dois tipos de circulação. A viscosidade dinâmica e a massa específica tiveram influências parecidas nos resultados, com os dados variando linearmente em função de μ e ρ . Por último, a velocidade de rotação modificou discretamente ou não alterou as variáveis analisadas.

A circulação reversa se mostrou vantajosa em relação à limpeza do fundo do poço e ao transporte de cascalhos para a superfície, com menores perdas de carga e a possibilidade de ser utilizada com vazões mais baixas do que a circulação direta. No entanto, as funções de lubrificação e arrefecimento das paredes da broca são melhores com a circulação direta.

6 CONCLUSÕES

Dois tipos de circulação do escoamento de fluido foram analisados por meio de simulação numérica: a direta e a reversa. A diferença entre as circulações está no modo de bombeio, com o fluido sendo injetado pelo interior da coluna para a direta, e pelo espaço anular para a reversa. A geometria do problema consistiu em uma broca do tipo PDC acoplada à extremidade de uma coluna de perfuração. O fluido foi considerado newtoniano e incompressível, e o escoamento foi tratado como turbulento (modelo SST) e em regime permanente. Foi utilizado o programa ANSYS CFX 15[®] para a execução das simulações.

Primeiramente, o modelo numérico foi validado. Foram comparados os perfis de velocidade axial e tangencial com os do experimento descrito no artigo de Rothe e Pfitzer (1997), usando configurações análogas. Os resultados indicaram uma boa concordância entre as curvas numéricas e experimentais.

Foram avaliadas as influências de quatro parâmetros do processo de perfuração sobre o escoamento, a saber: a viscosidade dinâmica, a vazão de entrada, a massa específica e a velocidade de rotação da coluna. Para os casos com valores médios desses parâmetros, algumas características das circulações direta e reversa foram identificadas. A direta apresentou maior número de recirculações no campo de escoamento e as maiores pressões em pequenas áreas do fundo do poço, na direção de saída dos ejetores. O escoamento reverso apresentou menores quantidades de perturbações e um perfil de pressões mais uniforme na região da broca. No ejetor central, pode ser vista a aceleração do fluido e a dissipação da sua quantidade de movimento ao colidir com o fundo do poço. Tal efeito não ocorreu para a reversa, pois não há restrições físicas imediatas quando o fluido está saindo do ejetor para o interior da broca.

Para a análise dos resultados, foram calculadas: a força média de impacto no fundo do poço, a perda de carga do sistema, a tensão de cisalhamento média na broca e a velocidade média nas regiões de saída do fluido. A vazão de entrada teve a maior influência sobre as variáveis F_P , H_L e τ_w , com seus valores aumentando significativamente em função de Q para ambas circulações. A velocidade média de saída só teve variação com a vazão, de forma linear.

A viscosidade dinâmica e a massa específica atuaram de maneira semelhante. A força, a perda de carga e a tensão de cisalhamento média cresceram linearmente com μ e ρ . O efeito principal da rotação foi o de aumentar a componente tangencial da velocidade do escoamento. Para a circulação direta, Ω teve influência somente em H_L . Para a reversa, também modificou moderadamente os valores de F_P e τ_w .

A circulação reversa se mostrou mais eficiente em relação à F_P . A força média de impacto foi maior para a reversa em todos os casos, o que ajuda no processo de carregamento dos cascalhos no fundo do poço. A perda de carga e a tensão de cisalhamento média foram maiores para a direta, indicando uma maior dissipação de energia dinâmica (desvantagem) e uma maior capacidade de limpeza das paredes da broca (vantagem), respectivamente. A velocidade na região de saída é maior para a circulação reversa, pois a área da seção transversal é menor. Isso auxilia no transporte de cascalhos para fora do poço.

Os resultados obtidos apresentam aspectos importantes sobre a dinâmica do escoamento durante a perfuração com broca PDC. Estudos mais aprofundados do tema, com a utilização de um modelo da broca e do poço mais fidedignos, é o recomendado. Assim, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Considerar a condição de contorno de rugosidade nas paredes;
- Inserir partículas sólidas para verificar o transporte de cascalhos do fundo do poço para a superfície;
- Representar o fluido de perfuração com modelos não-newtonianos;
- Resolver outras geometrias de broca PDC;
- Investigar as causas do desgaste prematuro da broca PDC durante a perfuração.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, Inc. **ANSYS CFX Introduction**. Release 15.0. USA. 2013a. 59 p.
- ANSYS, Inc. **ANSYS CFX - Solver Theory Guide**. Release 15.0. USA. 2013b. 350 p.
- BAKER HUGHES INCORPORATED. **Drill Bits Catalog**. Pág. 17. Disponível em <<http://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/reference-guides/drill-bits-catalog>>. Acesso em 24 de outubro de 2015.
- CHUNG, S. Y.; SUNG, H. J. **Large-eddy simulation of turbulent flow in a concentric annulus with rotation of an inner cylinder**. *International Journal of Heat and Flow*, v. 26, n. 5, p. 191-203, 2005.
- CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. 1st Edition. Boca Raton, Florida (USA). CRC Press, 2005. 1156 p.
- CUNHA JR., A.; SOIZE, C.; SAMPAIO, R. **Numerical study of the nonlinear dynamics of horizontal drillings**. ENOC 2014, Vienna (Austria), p. 6 – 11, 2014.
- DAROZ, V.; FRANCO, A. T.; MANEIRA, E. L. **Numerical investigation of direct and reverse drilling techniques in oil well drilling**. Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração, Rio Quente (GO), 2015.
- GEOFÍSICA BRASIL. **Pacific Rubiales anuncia descoberta na bacia de Santos**. Disponível em <<http://geofisicabrasil.com/noticias/174-petroleo/6915-pacific-rubiales-anuncia-descoberta-na-bacia-de-santos>>. Acesso em 09 de dezembro de 2015.
- HOUGHTON MIFFLIN HARCOURT PUBLISHING COMPANY. **The American Heritage® Dictionary for English Language**. Disponível em <<https://www.ahdictionary.com/>>. Acesso em 05 de outubro de 2015.
- MANEIRA, E. L. **Estudo da hidráulica de brocas de perfuração de poços – efeitos dos parâmetros do processo de perfuração**. 2013. 91f. Monografia. Departamento de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.
- MELLO, L. F. de S. **Uma proposta de indicadores de desempenho na área internacional da PETROBRAS: Uma abordagem sob o ponto de vista logístico**. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.
- MITCHELL, R. F.; MISKA, S. Z. **Fundamentals of Drilling Engineering**. SPE Textbook Series Vol. 12. Society of Petroleum Engineers, 2011. 676 p.
- PETROBRAS. **Relatório de Tecnologia Petrobras 2014**. Relatório Técnico, 2015. 89 p.

REYNOLDS, O. **On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion.** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, v. 186, p. 123, 1895.

ROTHER, T.; PFIZER, H. **The influence of rotation on turbulent flow and heat transfer in an annulus between independently rotating tubes.** *Heat and Mass Transfer*, Springer, v. 32, n. 5, p. 353 – 364, 1997.

SANSONI JR., U. **Avaliação por Simulação Computacional da Circulação Reversa na Perfuração de Poços de Petróleo.** 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Engenharia Mecânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

SHOPBAKERHUGHES. **8 - 7/8" TCI Tricone Drill Bit, IADC 537.** Disponível em < <http://www.shopbakerhughes.com/8-7-8-tci-tricone-drill-bit-iadc-537> >. Acesso em 02 de novembro de 2015.

SIVAGNANAM, M. **PDC Drill Bit Redesign and Simulation for Optimized Performance.** 2014. 145 f. Dissertação (Mestrado em Science) – Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, Calgary, 2014.

SOUZA, J. F. A. et al. **Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem.** *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, n. 1, p. 21-41, 2011.

TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer.** 2nd Edition. USA. Taylor & Francis, 1997. 713 p.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence.** [S.l.]. USA. The MIT Press, 1972. 287 p.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.** 2nd Edition. USA. Prentice Hall, 2007. 520 p.

WHITE, F. M. **Viscous fluid flow.** 3rd Edition. USA. McGraw-Hill Education, 2005. 656 p.

WILCOX, D. C. **Turbulent Modeling for CFD.** 2nd Edition. La Canãda, California (USA). DCW Industries, 2000. 400 p.