

SAMMY CRISTOPHER PAREDES PUELLES

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO
ESTUDO DE ESCOAMENTOS NO FUNDO DE POÇO,
CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2019

SAMMY CRISTOPHER PAREDES PUELLES

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTOS NO FUNDO DE POÇO, CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Transferência de energia térmica e Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Francisco José de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Elie Luis Martínez Padilla

UBERLÂNDIA – MG

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P977 2019	<p>Puelles, Sammy Christopher Paredes, 1992- APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTOS NO FUNDO DE POÇO, CONSIDERANDO BROCCAS SIMPLIFICADAS [recurso eletrônico] / Sammy Christopher Paredes Puelles. - 2019.</p> <p>Orientador: Francisco José de Souza. Coorientador: Elie Luis Martínez Padilla. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2299 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. de Souza , Francisco José , 1973- (Orient.). II. Martínez Padilla, Elie Luis , 1967-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 553, COPEM				
Data:	trinta de agosto de dois mil e dezenove	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16h30
Matrícula do Discente:	11722EMC017				
Nome do Discente:	Sammy Cristopher Paredes Puelles				
Título do Trabalho:	Aplicação do Método de Fronteira Imersa no Estudo de Escoamento no Fundo de Poço, Considerando Brocas Simplificadas				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se no Auditório do Laboratório de Mecânica dos Fluidos - Bloco 5P, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Admilson Teixeira Franco - UTFPR; Aristeu da Silveira Neto - FEMEC/UFU; Francisco José de Souza - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Francisco José de Souza, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Superior, em 30/08/2019, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aristeu da Silveira Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/08/2019, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Admilson Teixeira Franco, Usuário Externo**, em 30/08/2019, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1511635** e o código CRC **71C217C7**.

A Deus, família, docentes e amigos....

AGRADECIMENTOS

A Deus porque ele está sempre me ajudando, e continuará até que o propósito dele seja cumprido na minha vida.

Aos meus pais, Freddy Paredes e Carmen Puelles que sempre estão me apoiando, moral e espiritualmente, no ensinamento baseado nos princípios e valores que sempre ficaram na minha mente e no meu coração.

As minhas irmãs que sempre deram muito alegrias e apoiaram enquanto estavam perto delas. À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este trabalho, e conhecer excelentes pessoas no trajeto do mestrado.

Ao Professor Elie Luis Martínez Padilla pela orientação, incentivo, ensinamento e o conhecimento adquirido e a meu colega Jonatas Emmanuel Borges, que graças a seu apoio e ensinamento, foi parte fundamental no meu trabalho do mestrado.

Ao Professor Francisco José de Souza, por acreditar no meu trabalho, pela confiança e o apoio no avanço do trabalho.

Ao Professor Aristeu da Silveira Neto, pelo conhecimento e as dicas para melhorar como pesquisador.

Aos amigos da Universidade Mayor de San Marcos que a pesar da distância, se comunicaram comigo para saber sobre minha vivencia no Brasil.

Aos amigos do MFLab, pelo apoio incondicional.

À CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos.

PUELLES, S. C. P., APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTOS NO FUNDO DE POÇO, CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS.

2019. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

O presente trabalho trata sobre problemas presentes em processos de perfuração, especificamente na região do fundo de poço. O fluido de perfuração é bombeado através da coluna de perfuração e ejetada pelos bocais da broca, os jatos impactam o fundo de poço ajudando na dispersão do material particulado produto do corte, finalmente o escoamento continua sua trajetória pela parte anular. Para representar o processo foi utilizado um sistema simplificado composto pelo poço e coluna de perfuração. Considerando o fluido como newtoniano, sem partículas e o escoamento incompressível. O sistema poço-coluna foi considerado rígido e sem mudança de seção, também foi excluída qualquer força externa que possa interagir com o sistema. Como ferramenta de estudo foi utilizado um código numérico paralelizado baseado na solução das equações de Navier-Stokes com segunda ordem de aproximação espacial e temporal, para a discretização foi utilizado o método dos volumes finitos e metodologia de simulação de grandes escalas para o tratamento do fenômeno de turbulência. O Método de fronteira imersa foi usado para representar o sistema poço-coluna, por meio do campo da força. São propostas três brocas simplificadas, duas do tipo PDC e uma tricônica. Os resultados foram satisfatórios, já que as variáveis fluidodinâmicas foram influenciadas de forma proporcional com a rotação da coluna de perfuração, o trajeto do escoamento e o tipo de broca. Maior intensidade turbulenta foi encontrada entre a broca e a superfície do fundo como consequência da ação dos jatos, da geometria e rotação das brocas. A força de impacto, parâmetro fundamental no processo de perfuração, apresenta importante dependência com a velocidade de rotação e a distância entre o bocal e o fundo de poço. Outra importante contribuição do presente trabalho está associada ao potencial da ferramenta numérica em desenvolvimento, para tratar problemas complexos de engenharia.

Palavras chave: Broca de perfuração, Método de Fronteira Imersa, Escoamento turbulento.

PUELLES, S. C. P., **APPLICATION OF THE IMMERSSED BOUNDARY METHOD IN THE STUDY OF BOTTOM HOLE FLOWS, CONSIDERING SIMPLIFIED BIT DRILLS**. 2019. Master thesis, University Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

Abstract

The present work deals with problems present in drilling processes, specifically in the bottom hole region. The drilling mud is pumped through the drilling column and ejected through the drill nozzles, the jets impact the bottom hole surface helping the dispersion of the particulate material result of cut, finally the flow continues its trajectory through the annular part. To represent this process, a simplified system composed by the well and drilling column was used, considering a Newtonian, incompressible fluid and without particles. The well-column system was considered rigid and with no section change, any external force that could interact with the system was excluded. As a study tool we used a parallelized numerical code based on the solution of Navier-Stokes equations with second order spatial and temporal approximation, discretization using the finite volume method and large eddy simulation methodology for the treatment of the turbulence phenomenon. The immersed boundary method was used to represent the well-column system by means of a force field. Three simplified drill bits were proposed, two of PDC type and one of Triconic type. The results were satisfactory, since the fluid dynamics variables were proportionally influenced with the rotation of the drilling column, the flow path and the type of drill bit. Higher turbulent intensity was found between the drill and the bottom hole surface as a consequence of the jet action, the geometry and drill bits rotation. The impact force, which is a fundamental parameter in the drilling process, is highly dependent on the speed of rotation and the distance between the nozzle and the bottom hole. Another important contribution of the present work is associated with the potential of the numerical tool, in development, to deal with complex engineering problems.

Keywords: Drill bit, Immersed Boundary Method, Turbulent Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama de Fluxo de Processos (PFD) do processo de perfuração (SOUZA, 2018).	2
Figura 2.1 – Vibração radial para a broca tipo PDC, diminuição da vibração na broca tipo Kymera e vibração axial para a broca tipo Tricônica (TCI) no fundo de poço (BAKER-HUGHES).	6
Figura 2.2 –Efeito reboco imagem da esquerda e esforços tangenciais na imagem da direita (WEATHERFORD).	6
Figura 2.3 – Kelly hexagonal e quadrado (GRANT-PRIDECO, 2017).	9
Figura 2.4 – Duto de perfuração sem e com uniões nos extremos, da acima para abaixo respectivamente (GRANT-PRIDECO, 2017).	9
Figura 2.5 – Padrão, Tri-espiral e Espiral Wate, do duto pesado da acima para abaixo respectivamente (GRANT-PRIDECO, 2017).	10
Figura 2.6 – Comandos de perfuração, imagem da acima, desenho de duto espiral e duto liso. Imagem em baixo, vista transversal dos dutos e poço, duto espiral e liso respectivamente (GRANT-PRIDECO, 2017).	11
Figura 2.7 – Alguns tipos de estabilizadores: manga linear, padrão, espiral integral e não rotativo, (Disponível em: < www.perfoblogger.wordpress.com > Acesso em: 13 jan.2019).	12
Figura 2.8 – Broca de cones de rolos 17 ½“ WR (SMITH, 2018).	13
Figura 2.9 – Broca Híbrida Kymera 12 ¼“ (NGUYEN, 2012).	14
Figura 2.10 – Broca 2 cones e 2 aletas, Broca 3 cones e 3 aletas (NGUYEN, 2012).	14
Figura 2.11 – Brocas tipo arrasto: Chevron, Gator Back e de Passo (WESTERNDRILLING).	14
Figura 2.12 – Broca PDC IADC: M433 8 ½”. (MICON-DRILLING, 2016)	15
Figura 2.13 – Brocas diamante (NGUYEN, 2012).	15
Figura 2.14 – Broca de martelos de percussão 8 ½” H1512D V6RPD R08 (SMITH, 2018)..	15
Figura 2.15 – Curva taxa de penetração v. peso da broca na esquerda, e na direita, taxa de penetração v. limpeza do bocal, onde HHP (<i>Hydraulic Horse Power</i>) (FORD, 2017).	17
Figura 2.16 – Representação da dirigibilidade e o ângulo de deslocamento. (NGUYEN, 2012).	19

Figura 2.17 – Representação da linha de energia (L.E), linha piezométrica (L.P) e a vena contracta. (FELICES, 2007).	20
Figura 2.18 – Esquema geral do bocal na broca, tomando 2 pontos diferentes para monitorar a pressão e velocidade. (MANEIRA, 2013).	22
Figura 2.19 – Linhas do corrente do jato saindo pelos bocais de uma broca (SMITH, 2018).	22
Figura 2.20 – Disposição dos ejetores da broca tipo de cones de rolos (SMITH, 2018).	23
Figura 2.21 – Aplicações direcionais de vários poços na localização de uma superfície (SHORT, 1993).	24
Figura 2.22 – Duto <i>coiled tubing</i> piloto, campo de Cusiana na Colômbia. (CHAREUF AFGHOUL, AMARAVI, <i>et al.</i> , 2004).	25
Figura 2.23 – Representação de poços de desvio. (Fonte: Disponível em: < https://www.netwasgroup.us/engineering-4/sidetracking.html > Acesso em: 11 mai.2019).	26
Figura 2.24 – Poço de desenho no campo de Oseberg, no mar do norte de Noruega. A seção do poço horizontal foi planejada para atingir vários corpos de canais fluviais sismicamente definidos dentro da formação Ness. (Fonte: Disponível em: < https://wiki.aapg.org > Acesso em: 11 mai.2019)	27
Figura 2.25 – Padrões de endereços. Curva única, curva dupla, alcance estendido e poço inclinado (SHORT, 1993).	27
Figura 2.26 – Poço multilateral, mar do norte do Reino Unido. (Fonte: <i>Geological society</i> Disponível em: < https://wiki.aapg.org/Well_types > Acesso em: 12 mai.2019)	28
Figura 2.27 – Representação de um poço horizontal usando uma técnica de direcional, com os pontos importantes na trajetória. (Fonte: Disponível em: < https://wiki.aapg.org/Well_types > Acesso em: 12 mai.2019)	28
Figura 2.28 – Representação da Broca tipo PDC código IADC-M433 (MICON-DRILLING, 2016)	31
Figura 2.29 – Representação das propostas feitas baseados na broca tipo PDC-IADC M433.	32
Figura 2.30 – Representação da broca tipo PDC e a coluna de perfuração.	32
Figura 2.31 – Representação da coluna de perfuração e poço, para a broca tipo PDC.	33
Figura 2.32 – Posição dos bocais referente ao fundo de poço para a Broca tipo PDC. Medidas estão em milímetros.	33
Figura 2.33 – Representação da broca tipo Cones de Rolos código IADC-617X. (SMITH, 2018).	34
Figura 2.34 – Representação das propostas feitas baseados nas broca tipo Tricônica-IADC 617X.	35
Figura 2.35 – Representação da broca tipo Tricônica e a coluna de perfuração.	35

Figura 2.36 – Representação da coluna de perfuração e poço para a broca tipo Tricônica.	36
Figura 2.37 – Plano vista frontal da broca tricônica. Todas a medidas estão em milímetros	36
Figura 2.38 – Estruturas coerentes alinhados na direção do escoamento (ADRIAN, MEINHART e TOMKINGS, 2000).	37
Figura 2.39 – Representação da velocidade instantânea, velocidade média e velocidade flutuante.	39
Figura 2.40 – Espectro de energia cinética turbulenta. I Intervalo para grandes escalas, II subintervalo inercial, III Intervalo de pequenas escalas isotrópicas (DAVIDSON, 2017).	40
Figura 2.41 – Distribuição de densidade espectral de energia cinética turbulenta (SILVEIRA NETO, 2019)	41
Figura 2.42 – Representação de um ponto para resolver as escalas em um escoamento turbulento estatisticamente permanente (ANDERSSON, ANDERSSON, <i>et al.</i> , 2012).	42
Figura 2.43 – Diagrama que representa alguns modelos de fechamento mencionados anteriormente (ANDERSSON, ANDERSSON, <i>et al.</i> , 2012).	44
Figura 3.1 – Distribuição da densidade espectral de energia associada à distribuição temporal da informação $\phi(x, t)$ (SILVEIRA NETO, 2019).	46
Figura 3.2 – Representação da malha lagrangiana e a malha euleriana (VANELLA e BALARAS, 2009).	53
Figura 3.3 – Diagrama adaptado para explicar os tipos de Métodos de fronteira Imersa (SOTIROPOULOS e YANG, 2014).	53
Figura 3.4 – Representação da malha lagrangiana e a malha euleriana nas cores vermelho e preto, respectivamente. (a) vista isométrica (b) vista de aproximação.	54
Figura 4.1 – Técnicas de discretização. Modificação baseado na referência (ANDERSON, 1995).	55
Figura 4.2 – Características geométricas no volume ou célula.	56
Figura 5.1 – Plano do domínio lagrangiano, medidas em milímetros.	67
Figura 5.2 – Malha lagrangiana feita no Blender 2.69 com razão de contração de 1,967. ...	68
Figura 5.3 – Representação dos domínios euleriano e lagrangiano, e condições de contorno.	69
Figura 5.4 – Figura adaptada para explicar as posições dos perfis que serão analisados. Posições -0,026; -0,039; -0,052; -0,079; -0,104; -0,183; -0,236; -0,288 (SÁNCHEZ, 2011).	70
Figura 5.5 – Perfis de velocidades da componente w/W para malhas eulerianas de 70x70x196, 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições (a) -0,026 e (b) -0,079.	70
Figura 5.6 – Perfis de velocidades da componente w/W para malhas eulerianas de 70x70x196, 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições (a) -0,236 e (b) -0,288.	71
Figura 5.7 – Perfis de velocidades da componente v/W para malhas eulerianas de 70x70x196, 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições -0,039 e -0,052.	71

Figura 5.8 – Perfis de velocidades da componente v/W para malhas eulerianas de 70x70x196; 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições -0,104 e -0,183.....	72
Figura 5.9 – Perfis de velocidades da componente w/W para malha 60x60x168 nas posições (a) -0,026, (b) -0,079 e velocidades de rotação de 0; 50; 100; 150 e 200 rpm.	73
Figura 5.10 – Perfis de velocidades na componente u/W para malha euleriana de 60x60x168. Nas posições (a) -0,026, (b) -0,079.....	73
Figura 5.11 – Esquema geométrico do problema para os dois tipos de broca, PDC e Tricônica.	75
Figura 5.12– Representação das condições de contorno no domínio de interesse.....	76
Figura 5.13 – Desenvolvimento temporal para 0rpm e tempos: (a) 0,175s, (b) 0,325s, (c) 0,45s, (d) 0,7s, (e) 1s.	78
Figura 5.14 – Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=0,45\text{m/s}$ e $w=-0,34\text{m/s}$ (azul); para 25 rpm e tempos: (a) 3,8s (b) 4,0s (c) 4,2s (d) 4,4s (e) 4,6s (f) 4,8s.	79
Figura 5.15 – Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=1\text{m/s}$ e $w=-0,55\text{m/s}$; para 100 rpm e tempos: (a) $t=1,55\text{s}$ (b) 1,6s (c) 1,65s (d) 1,7s (e) 1,75s (f) 1,8s.	80
Figura 5.16 – Iso-superfícies de velocidade instantânea $w=0,45\text{m/s}$ e $w=-0,4\text{m/s}$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) $t=14\text{s}$ e 0rpm, (b) $t=4,8\text{s}$ e 25rpm, (c) 2,4s e 50rpm (d) 1,6s e 75rpm, (e) 1,2s e 100 rpm.....	81
Figura 5.17 – Iso-superfícies de viscosidade turbulenta $\nu_t/\nu = 10$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) 0 rpm (b) 25 rpm, (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100 rpm.....	82
Figura 5.18 – Campos médios para $Re= 3500$ e 0rpm; (a) v , (b) w , (c) v_{rms} , (d) w_{rms} (e) P^*	83
Figura 5.19 – Desenvolvimento espacial da velocidade axial na coluna de perfuração com velocidade de rotação 0 rpm, broca tipo PDC; (a) w , (b) w_{rms}	83
Figura 5.20 – Perfis de velocidade no campo médio, na posição $z=1\text{m}$: (a) v , (b) w	84
Figura 5.21 – Perfis de velocidade no campo médio, na posição $z=2,49\text{m}$: (a) v , (b) w	84
Figura 5.22 – Perfis de velocidade no campo médio, na posição $z=1,5\text{m}$: (a) v (b) w	84
Figura 5.23 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=1.5\text{m}$. (a) v_{rms} (b) w_{rms}	86
Figura 5.24 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=2.49\text{m}$. (a) v_{rms} (b) w_{rms}	86
Figura 5.25 – Flutuações de velocidade na sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo PDC; (a) u e (b) w	87
Figura 5.26 – Potência espectral das flutuações da velocidade em A(0,43;0,43;2,46) para a broca tipo PDC: (a) u e (b) w	88

Figura 5.27 – Flutuações da velocidade na sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo PDC; (a) u, (b) w.....	89
Figura 5.28 – Espectro de energia; sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo PDC; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm.	90
Figura 5.29 – Espectro de energia; sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo PDC; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm,	90
Figura 5.30 – Representação das estruturas turbilhonares utilizando o critério Q; PDC; altura do bocal 90,43mm, (a) 0rpm, (b) 25 rpm, (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100 rpm.	91
Figura 5.31 – Desenvolvimento temporal; planos XZ e XY com valores de velocidade axial máxima entre 0,53 m/s e 3,36m/s; rotação 0rpm e tempos: (a)0,1s (b)0,3s (c)0,65s (d)1s (e)1,3s.	92
Figura 5.32– Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=0,45\text{m/s}$ e $w=-0,35\text{m/s}$; 25rpm e tempos: (a) $t=4\text{s}$, (b) 4,2s (c)4,4s, (d) 4,6s, (e) 4,8s, (f) 5s.	93
Figura 5.33 – Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=1\text{m/s}$ e $w=-0,55\text{m/s}$; 100 rpm e tempos: (a) $t=1,55\text{s}$ (b)1,6s (c)1,65s (d) 1,7s (e) 1,75s (f) 1,8s.	94
Figura 5.34– Iso-superfícies de velocidade instantânea, $w= 0,45\text{m/s}$ e $w=-0,35\text{m/s}$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) $t=14\text{s}$ e 0rpm, (b) $t=4,8\text{s}$ e 25rpm, (c) 2,4s e 50rpm (d) 1,6s e 75rpm, (e) 1,2s e 100 rpm.....	95
Figura 5.35 – Iso-superfícies de viscosidade turbulenta $\nu_t/\nu = 10$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) 0 rpm (b) 25 rpm, (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100 rpm.....	95
Figura 5.36 – Campos médios para $Re=3500$ e 0rpm (a) v, (b) w, (c) vrms, (d) wrms (e) P^*	96
Figura 5.37 – Desenvolvimento espacial da velocidade axial na coluna de perfuração com velocidade de rotação 0 rpm; broca tricônica; a) w, b) wrms.....	96
Figura 5.38– Perfis de velocidade no campo médio na posição $z=1\text{m}$: (a) v, (b) w.	97
Figura 5.39 – Perfis de velocidade no campo médio na posição $z=2,49\text{m}$: (a) v, (b) w.	97
Figura 5.40– Perfis de velocidade no campo médio na posição $z=1,5\text{m}$: (a) v, (b) w.	97
Figura 5.41 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=1,5\text{m}$; (a) vrms, (b) wrms.....	98
Figura 5.42 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=2,49\text{m}$; (a) vrms, (b) wrms.....	98
Figura 5.43 – Flutuações da velocidade na sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo Tricônica; (a) v, (b) w.....	99
Figura 5.44– Potência espectral das flutuações da velocidade em A(0,43;0,43;2,46) para a broca tipo Tricônica: (a) u e (b) w.....	100
Figura 5.45 – Flutuações da velocidade na sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo tricônica; (a) v, (b) w.	101

Figura 5.46 – Espectro de energia da componente w; sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo Tricônica; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm.	102
Figura 5.47 – Espectro de energia da componente w; sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo Tricônica; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm.	102
Figura 5.48 – Broca Tricônica; altura do bocal 345,91mm; representação das estruturas turbilhonares utilizando o critério Q. (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 50 rpm (d) 75 rpm (e) 100 rpm.	103
Figura 5.49 – Broca PDC-H1; linhas de corrente; (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 100 rpm.....	104
Figura 5.50 – Broca PDC-H2, linhas de corrente; (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 100 rpm.....	104
Figura 5.51 – Broca Tricônica; linhas de corrente; (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 100 rpm.....	104
Figura 5.52 – Broca PDC-H1. Magnitude da pressão média no fundo de poço, para rotações: (a) 0 rpm, (b) 25 rpm (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100rpm.	105
Figura 5.53 – Broca Tricônica. Magnitude da pressão media no fundo de poço, para rotações: (a) 0 rpm, (b) 25 rpm (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100rpm.	106
Figura 5.54 – Força total no fundo de poço, variação temporal. (a) broca PDC (b) broca tricônica.	107
Figura 5.55 – Sonda de força de total no fundo de poço, para diferentes valores de rotação. Variação temporal. (a) broca PDC-H2 (b) broca tricônica.	108
Figura 5.56 – Força de impacto influenciado pela rotação das brocas propostas.	108
Figura 5.57 – Áreas de seções transversais na região entre a broca e o poço. Unidades de cotas em milímetros.....	110
Figura 5.58 – Valores de queda pressão com influência da rotação. (a) broca tipo PDC-H1, (b) broca tipo Tricônica.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Considerações e exclusões que simplificam o problema.....	7
Tabela 2.2 – Descrição da nomenclatura do código dado pela IADC para broca tipo PDC. (Fonte: Disponível em: < http://www.holemonster.com.tr > Acesso em: 25 mai.2019)	30
Tabela 2.3 – Descrição da nomenclatura do código dado pela IADC para broca tipo Cones de Rolos (Fonte: Disponível em: < http://burintekh.comf > Acesso em: 07 mai.2019).....	30
Tabela 5.1 – Divisão de malha euleriana.	69
Tabela 5.2 – Valores médios da força de impacto no fundo de poço para os tipos de broca PDC e Tricônica.....	107
Tabela 5.3 – Valores médios da força de impacto para os tipos de broca PDC e Tricônica, influenciados pela rotação, correspondentes a Figura 5.56.	109
Tabela 5.4 – Influência da rotação na diferença de pressão na entrada e saída, tipo de broca PDC-H1.	109
Tabela 5.5 – Influência da rotação na diferença de pressão na entrada e saída, tipo de broca Tricônica.	110

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

V	Volume	m^3
C_{ij}	Tensor cruzado	
C_s	Constante de Smagorinsky	
$C(\vec{x}, t)$	Coefficiente dinâmico	
D	Diâmetro maior	m
d	Diâmetro menor	m
e_f	Fator ponderado	
F	Força no domínio lagrangiano	N
f	Força no domínio euleriano	N
H	Altura do bocal com respeito ao fundo de poço	mm
L	Exponente de rotação	
L_{ij}	Tensor de Leonard	
	Peso limiar, ou WOB necessário para causar	
M	falha da formação	
$mH20$	Metros de coluna de água	m
	Queda pressão necessária	
dPb	para atravessar os bocais	PSI
Q	Vazão volumétrica	m^3/s
R	Raio	m
r	Componente radial	m
RHS	Termos advectivos e difusivos	
S_{ij}	Taxa de deformação	
t	Tempo	s
Ta	Número de Taylor	
u	Velocidade na direção do eixo x	m/s
v	Velocidade na direção do eixo y	m/s
w	Velocidade na direção do eixo z	m/s
W	Velocidade média na direção z.	m/s
x	Componente x do sistema de coordenadas cartesianas	
y	Componente y do sistema de coordenadas cartesianas	
z	Componente axial do sistema de coordenadas	

Letras Gregas

β	Razão de contração	
δ_{ij}	Delta de Kronecker	
ε	Potencia específica de transformação viscosa	
μ	Viscosidade dinâmica	<i>ks/m.s</i>
ν	Viscosidade cinemática	<i>m²/s</i>
ν_ε	Viscosidade efetiva	
η	Escala de transformação viscosa de Kolmogorov	
ω	Velocidade angular	<i>rev/min</i>
ω	Ângulo de deslocamento	
Ω	Tensor Vorticidade	
θ	Ângulo de giro	<i>rad</i>
τ_{ij}	Tensor de Reynolds global	
R_{ij}	Tensor de Reynolds sub-malha	
ρ	Massa específica	<i>kg/m³</i>

Letras manuscritas

\wp^k	Injeção de energia cinética k
---------	-------------------------------

Operadores

∂	Derivada parcial
$ $	Valor absoluto
\sum	Somatório
\int	Integral

Indicadores

g	Variável genérica
\bar{g}	Variável filtrada
$\hat{\bar{g}}$	Variável filtrada duas vezes

\hat{g}	Filtragem teste
g'	Flutuação da variável
\vec{g}	Vetor
g_{ij}	Tensor
$\bar{\Delta}$	Comprimento característico do filtro a nível da malha
$\hat{\Delta}$	Comprimento característico do filtro teste

Índices

r	Componente radial
e	Condição de entrada
s	Condição de saída
max	Valor máximo
P	Centro do volume de controle
n	Face norte do volume de controle
N	Ponto central norte do volume de controle
n	Valor normal
o	Valor observado
s	Face sul do volume de controle
S	Ponto central sul do volume de controle
w	Face oeste do volume de controle
e	Face leste do volume de controle
E	Ponto central leste do volume de controle
f	Face frontal do volume de controle
F	Ponto central frontal do volume de controle
b	Face posterior do volume de controle
B	Ponto central posterior do volume de controle
i,j	Ponto central da malha ou componente de um tensor
l	Representação de uma direção
k	Domínio lagrangiano
t	Variável turbulenta
ta	Direção tangencial

Superíndices

<i>*</i>	Grandezas estimadas
<i>~</i>	Grandezas aproximada
<i>t</i>	Tempo precedente
<i>t+1</i>	Tempo atual

ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ADT	Altura dinâmica total
AP	Ponto de acesso (<i>Access Point</i>)
API	Instituto de Petróleo Americano (<i>American Petroleum Institute</i>)
BHA	Montagem do fundo de poço (<i>Bottom Hole Assembly</i>)
CFD	Dinâmica de fluidos computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CFL	Courant-Friedrich-Lewy
DC	Comandos (<i>Drill Collars</i>)
DNS	Simulação Numérica Direta (<i>Direct Numerical Simulation</i>)
DP	Duto de perfuração (<i>Drill Pipe</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FH	(<i>Full Hole</i>)
FS	Fator de segurança
HHP	Cavalos de força hidráulica (<i>Hydraulic Horsepower</i>)
HWDP	Duto pesado de perfuração (<i>Heavy Weight Drill Pipe</i>)
IADC	(<i>International Association of Drilling Contractors</i>)
ID	Diâmetro interno (<i>Inside or inner diameter</i>)
IF	(<i>Internal Flush</i>)
ISO	(<i>International Organization for Standardization</i>)
KOP	Ponto de partida (<i>kickoff point</i>)
MWD	Medida durante a perfuração (<i>Measurement While Drilling</i>)
MLS	Método de mínimo quadrados (<i>Moving Least Squares Method</i>)
NROP	Taxa normalizada de penetração (<i>Normalized rate of penetration</i>)
NPT	Tempo não produtivo (<i>Nonproductive time</i>)
OD	Diâmetro Externo (<i>Outside Diameter</i>)
PDC	Diamante Policristalino Compacto (<i>Polycrystalline Diamond Compact</i>)
PIBpm	Produto Interno Bruto a preços de mercado
ROP	Taxa de penetração (<i>Rate of Penetration</i>)
RSS	Sistema rotativo dirigível (<i>Rotary Steerable System</i>)
SGS	Escalas sub-malha (<i>Subgrid-scales</i>)
rms	Valor quadrático médio (<i>Root mean square</i>)

RPM	Revoluções por minuto
RSS	Sistemas orientáveis rotativos (<i>Rotary steerable systems</i>)
TCI	Broca Tricônica
TSP	Brocas de diamante termicamente estável
UEP	Unidade Estacionaria de Produção
WOB	Peso da broca (<i>Weight On Bit</i>)

SUMÁRIO

Letras Latinas	xv
Letras Gregas	xvi
Letras manuscritas	xvi
Operadores.....	xvi
Indicadores.....	xvi
Índices	xvii
Superíndices.....	xviii
Siglas	xix
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MODELO FÍSICO.....	5
2.1 Processo de perfuração	5
2.2 Coluna de perfuração.....	7
2.2.1 Kelly.....	8
2.2.2 Duto de perfuração (<i>Drill pipe</i>)	9
2.2.3 Duto pesado (<i>Heavy Weight drill Pipe</i>).....	10
2.2.4 Comandos (<i>Drill Collars</i>)	10
2.2.5 Ferramentas especiais.....	11
2.2.6 Broca	12
2.3 Contração abrupta.....	19
2.4 Força de impacto	21
2.5 Erosão.....	22
2.6 Perfuração de poços	23
2.6.1 Tipos de poços pelo procedimento de perfuração	24
2.6.2 Tipos de poços pela direção de perfuração do poço	26
2.7 Normas API para o desenho da broca.....	29
2.8 Modelo físico simplificado da broca.....	31
2.8.1 Broca tipo PDC-IADC M433.....	31
2.8.2 Broca tipo Cone de rolos-IADC 617X.....	34
2.9 Turbulência	36
2.9.1 Cinemática da turbulência.....	38
2.10 Metodologias de tratamento de turbulência	41

CAPÍTULO III - MODELAGEM MATEMÁTICA	45
3.1 Equações representativas	45
3.2 Metodologia de simulação das grandes escalas	46
3.2.1 Processo de Filtragem	47
3.2.2 Modelo Sub-malha Dinâmico	49
3.3 Método de fronteira imersa.....	52
CAPÍTULO IV - MODELAGEM NUMÉRICA.....	55
4.1 Discretização espacial.....	57
4.2 Discretização temporal.....	58
4.2.1 Acoplamento de pressão-velocidade.....	59
4.3 Método de fronteira imersa.....	60
4.4 Passo de tempo automático	64
CAPÍTULO V - RESULTADOS	66
5.1 Verificação e validação	66
5.2 Testes preliminares: Efeito da rotação na contração	72
5.3 Fundo de Poço.....	74
5.3.1 Broca tipo PDC	77
5.3.2 Broca tipo Tricônica	92
5.3.3 Comparações, influencias geométrica e mecânica.....	103
CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
6.1 Conclusões	112
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	113
CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
Apêndice - A.....	A
Apêndice - B.....	B
Apêndice - C.....	C

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Como em toda empresa na indústria de produção de petróleo e gás, têm por objetivo recuperar o investimento a longo prazo e produzir até o fechamento. O tempo de produção depende do tamanho da reserva e da qualidade do óleo cru disponível. Na indústria petrolífera existem etapas envolvidas no projeto de perfuração e extração do petróleo, com objetivo de distribuição e venda do petróleo dentro dos padrões e normas preconizadas.

Dentro dessas etapas, pode-se mencionar a etapa de exploração, implementação do projeto de desenvolvimento e produção do petróleo. Em cada uma das etapas envolvidas no projeto de perfuração e extração do petróleo, existem equipamentos necessários para o desenvolvimento de cada uma delas. O presente projeto abordará o processo de perfuração, identificado nas etapas de exploração e implementação do projeto de desenvolvimento. Nesse sentido, é de extrema importância o conhecimento da engenharia destas etapas.

O primeiro passo para a etapa de exploração inclui o estudo geológico utilizando rastreio por satélite e aquisição de amostras de campo para determinar o tipo de reservatório. Na fase das amostras de campo existe o processo de perfuração, no qual é feito um poço que comunica o reservatório e o exterior para extrair uma amostra do fluido. A amostra do fluido é analisada no laboratório para determinar a qualidade e pureza do petróleo, bem como, determinar as possibilidades de produção e as condições de terreno, identificando a quantidade de poços que podem ser explorados na zona. Finalmente, é realizada a estimativa da reserva mediante um método de cálculo para posteriormente iniciar a fase da implementação do projeto de desenvolvimento. A primeira etapa pode durar entre 3 e 10 anos, e é influenciada pela complexidade geológica e técnica.

Na etapa da implementação do projeto de desenvolvimento, geralmente são perfurados poços secundários e a construção da unidade estacionária de produção (UEP). A fim de estabelecer a construção da UEP é realizada a compra de materiais, montagem e

instalação de equipes, fixação da UEP, interconexão dos componentes, comissionamento e operação.

Como foi mencionado, nas duas primeiras etapas, o processo de perfuração cumpre uma atividade fundamental. Atualmente, existe a engenharia de perfuração, que descreve o mecanismo de fazer poços através do estudo profundo que compreende desde a análise do solo e do fluido de perfuração até a escolha do tipo da broca de perfuração. O objetivo da perfuração é de realizar a menor quantidade de dano no poço, dentro do limite econômico e cumprir as normas ambientais e de segurança.

Segundo os dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Petrobras, estima-se que a contribuição média do setor petrolífero ao PIBpm tenha sido de 2,44% (anos 60), 2,79% (anos 70), 4,20% (anos 80), 3,36% (1990/97), 4,94% (1998/2003), e 8,11% no ano 2004 (ARAGÃO, 2005).

As indústrias petrolíferas podem estar localizadas no ambiente terrestre e marítimo, onde extraem o mineral com auxílio de diferentes engenharias integradas, inclusive a mecânica dos fluidos. O presente trabalho se concentra em um dos diferentes processos da engenharia da perfuração, fundo de poço, onde é produzido o corte e remoção de material (cascalho) que deve ser transportado pelo fluido de perfuração ao ambiente exterior, devido à diferença de pressão. No processo convencional segundo a Figura 1.1, o fluido de perfuração é bombeado através da coluna de perfuração e ejetada pelos bocais da broca, realizando entre outras funções, o resfriamento do sistema, remoção do material sólido produto do corte e a proteção das paredes do poço.

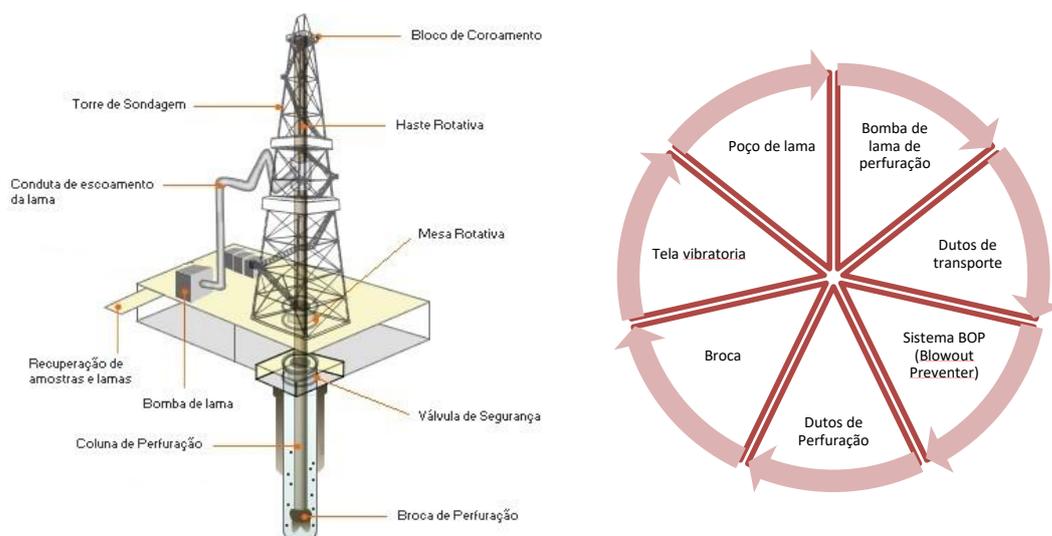


Figura 1.1 – Diagrama de Fluxo de Processos (PFD) do processo de perfuração (SOUZA, 2018).

O objetivo do presente trabalho consiste em estudar escoamentos turbulentos em sistemas de perfuração usando brocas do tipo PDC e tricônica simplificadas, considerando parâmetros como velocidade de rotação da coluna de perfuração e distância entre os bocais das brocas e a superfície do fundo de poço. Especificamente, o trecho final do sistema é de interesse, o qual é representado por um sistema poço-coluna nas proximidades do fundo de poço. Por outro lado, é de interesse avaliar o potencial da ferramenta numérica quando aplicado a problemas de engenharia.

A dissertação está estruturada em oito capítulos, os quais serão comentados nos parágrafos a seguir.

O CAPÍTULO II tem-se a revisão bibliográfica onde será apresentado os componentes da coluna de perfuração, os tipos de broca e tipos de poços para esclarecer ao leitor sobre a engenharia de perfuração e sua importância no projeto petrolífero. As normas na atualidade fornecem regras que servem para evitar incompatibilidade entre os componentes e ferramentas de perfuração.

O CAPÍTULO III retrata a modelagem matemática do problema, onde serão apresentadas as equações de Navier-Stokes que modelam o comportamento do fluido, e a equação da continuidade. Para altos números de Reynolds será utilizado a metodologia de simulação de grandes escalas, com o modelo de dinâmico sub-malha para o fechamento do problema de turbulência. Em seguida destaca-se o método de fronteira imersa que será detalhado no capítulo de modelo numérico.

O CAPÍTULO IV corresponde à modelagem numérica, sendo que todo o procedimento de discretização das equações representativas estão em coordenadas cartesianas utilizando o método dos volumes finitos com malha deslocada, onde a interpolação dos termos difusivo, advectivo e de pressão foram aproximadas pelo esquemas de diferenças centradas. Também comenta-se sobre o método de passos fracionados para o acoplamento de pressão-velocidade, e o método de Adam-Bashforth empregado para o avanço temporal. Neste capítulo também é detalhado como o termo da força é obtido aplicando o método de fronteira imersa.

O CAPÍTULO V trata-se dos resultados do trabalho. O código já apresenta uma base consistente de outras avaliações feitas por outros autores, Borges (2011) e Lourenço (2012) que usaram o mesmo código. Neste trabalho, a contração abrupta foi escolhida como caso de validação, onde os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais obtidos pelos autores Sánchez (2011) e Durst e Loy (1983). Foi avaliada a convergência de malha para o caso da contração sem rotação e, posteriormente, foram impostas diferentes velocidades angulares.

Quanto os resultados com as brocas simplificadas, três grupos são evidenciados: o primeiro compreendendo os resultados para a coluna de perfuração com a implementação do tipo de broca PDC IADC M433 sendo o poço e a coluna representados por cilindros, o segundo caso, utilizando a broca Tricônica IADC 617X e o terceiro grupo apresenta resultados de interesse nos parâmetros de força e queda de pressão, comparando a implementação dos dois tipos de brocas com influências mecânica e geométrica que são característicos neste tipo de projeto.

No CAPÍTULO VI tem-se as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros. O CAPÍTULO VII, apresenta a bibliografia, por fim no final do documento aparece o apêndice do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MODELO FÍSICO

Neste capítulo será apresentado a descrição de conceitos importantes tanto da coluna de perfuração, como o ambiente de trabalho onde é desenvolvido o processo de perfuração. Conceitos teóricos que formam parte da fenomenologia do escoamento serão descritos para compreender o comportamento da interação entre o fluido e o sistema coluna-poço. Posteriormente será detalhado a criação do modelo físico que inicialmente foi baseado nas normas API, finalmente foi utilizado o fator de escala para ter um diâmetro de entrada do fluido na coluna de perfuração de 500mm.

2.1 PROCESSO DE PERFURAÇÃO

O processo de perfuração é complexo, onde a vibração produzida pela parte mecânica do sistema de rotação tem parte, como também por ação das correntes marítimas e interação do escoamento dentro e fora da coluna. Como exemplo das vibrações produzidas no fundo de poço, na Figura 2.1 é mostrado tres colunas de perfuração compostos por tres tipos de broca (ver a seção 2.2.6), Broca tipo PDC, Híbrida (Kymera) e Tricônica (TCI). Segundo o autor, a primeira coluna apresetna vibração radial (ou lateral), ocorrem devido aos escoamentos na coluna e no duto anular, posteriormente a diminuição da vibração em ambos sentidos é mostrado para a coluna composta pela broca tipo híbrida, finalmente a vibração axial é predominante para última coluna composto pela broca Tricônica. (BAKER-HUGHES)

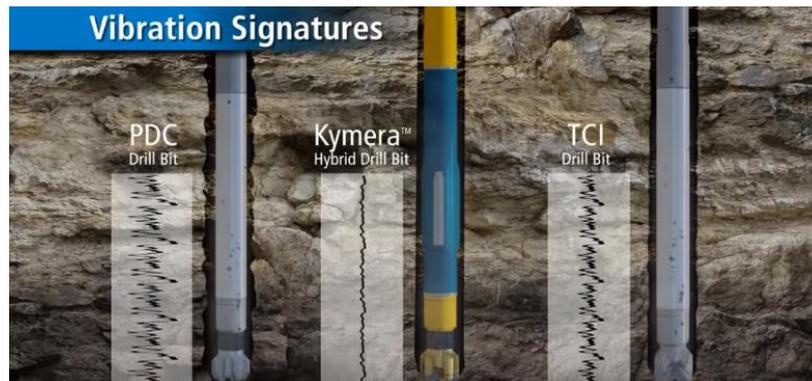


Figura 2.1 – Vibração radial para a broca tipo PDC, diminuição da vibração na broca tipo Kymera e vibração axial para a broca tipo Tricônica (TCI) no fundo de poço (BAKER-HUGHES).

Como consequência da vibração radial, pode acontecer o colapso em algumas zonas do poço, como também o aumento do diâmetro do poço. Um fenômeno produzido pela rotação excêntrica no poço, é conhecido como o efeito reboco (*plastering effect*) criando uma região de baixa porosidade e baixa permeabilidade na parede (Figura 2.2 esquerda), no entanto este efeito incrementa os esforços tangenciais na parede, mostrado na Figura 2.2 direita (KARIMI, MOELLENDICK e HOLT, 2011).



Figura 2.2 –Efeito reboco imagem da esquerda e esforços tangenciais na imagem da direita (WEATHERFORD).

Devido a complexidade do problema, simplificações são necessárias. O presente trabalho foi utilizado fluido newtoniano e sem partículas. Para o sistema coluna-poço, é considerada coluna rígida, brocas simplificadas, poço ideal onde não tem mudança de seção ao longo de seu comprimento. Na Tabela 2.1 são detalhadas as considerações do presente trabalho.

Tabela 2.1 – Considerações e exclusões que simplificam o problema.

CONSIDERAÇÕES	1. O fluido de trabalho é newtoniano sem partículas, e o escoamento incompressível.
	2. Os casos serão trabalhados com base em uma plataforma numérica em desenvolvimento no laboratório MFLab.
	3. Será utilizado um modelo simplificado de poço-coluna de perfuração ideal.
	4. Como parte da simplificação poço-coluna, será assumido que não há colapso das paredes laterais.
	5. Será assumido que não há transformação de energia pelo atrito entre o fluido e a estrutura, e/ou pelos componentes mecânicos que estão presentes na rotação do sistema.
	6. Será assumido que os componentes do sistema estão em boas condições e operam de forma ideal sendo reguladas de acordo com a norma API.
EXCLUSÕES	1. Não inclui a intervenção de forças mecânicas e forças externas pelas correntes marítimas.
	2. Não inclui o deslocamento do domínio lagrangiano como reação de qualquer força externa.
	3. Não inclui corte da superfície do poço ou remoção dela, nem é considerado o efeito de elasticidade do poço.
	4. Exclui todo processo físico ou químico de desgaste ou corrosão do material dos componentes da coluna de perfuração.

2.2 COLUNA DE PERFURAÇÃO

A coluna de perfuração é o sistema que comunica a parte mecânica rotativa (na superfície) e a broca (no fundo de poço). Este sistema é composto por várias partes, tem como objetivos:

- Transmitir rotação para a broca;
- Transmitir e suportar cargas axiais;
- Transmitir e suportar cargas de torção;
- Guiar e ter controle da trajetória do poço;
- Permitir a circulação do fluido de perfuração para limpar o poço e esfriar a broca;
- Reduzir o dano por vibração do sistema de perfuração;
- Dar profundidade ao poço;

A forma de obter a profundidade desejada é dada pela união entre dutos por meio da rosca, e assim formar um duto contínuo, posteriormente é cimentada para a proteção do poço e depois permitir o escoamento do fluido (VARGAS e BENAVIDES, 2011).

Os componentes da coluna de perfuração são os seguintes:

1. Kelly
2. Duto de perfuração (DP)
3. Duto pesado (HWDP)
4. Comandos (DC)
5. Ferramentas especiais:
 - Estabilizadores (Stabilizers)
 - Cross-over
 - Martelos
 - Motores de fundo
 - Turbinas
 - Carcaça curvada (bent housing)
 - MWD/LWD
6. Broca

O desenho da coluna de perfuração é um sucesso quando oferece resistência mecânica e funcionalidade suficiente para realizar manobras de acoplamento, profundidade, produção e *workover* (qualquer operação feita, dentro ou através do poço após a conclusão inicial), durante a vida útil do poço com custo ótimo. Para a seleção dos dutos existem os seguintes critérios:

- ✓ Tipo de poço (vertical, direcionais e horizontal);
- ✓ Máxima quantidade de cimento até a metade do duto;
- ✓ Gradiente normal de temperatura;
- ✓ Gradiente de fratura (pressão necessária para induzir fraturas em uma rocha, para uma determinada profundidade).
- ✓ Massa específica e tipo do fluido de perfuração;
- ✓ Trajetória do poço;
- ✓ Pressão de fratura estimada;
- ✓ Localização de zonas permeáveis;
- ✓ Zonas de possíveis perdas de circulação (vazamento);
- ✓ Altura do cimento;
- ✓ Verificar presença de H_2S e/ou CO_2 ;
- ✓ Dados históricos do campo petrolífero.

2.2.1 Kelly

Barra de aço quadrada longa ou hexagonal com um furo perfurado no centro para o caminho do fluido. O *Kelly* é usada para transmitir movimento rotativo (que é acionada pela

mesa giratória acoplada com um *Kelly bushing*), para a coluna de perfuração, enquanto permite que a coluna de perfuração seja abaixada ou levantada durante a rotação. O *Kelly* possui um perfil externo, quadrado ou hexagonal como é mostrado na Figura 2.3, mas com dimensões ligeiramente maiores, de modo que o *Kelly* pode mover-se livremente para cima e para baixo (SCHLUMBERGER, 2019)



Figura 2.3 – Kelly hexagonal e quadrado (GRANT-PRIDECO, 2017).

2.2.2 Duto de perfuração (*Drill pipe*)

Duto cilíndrico sem costura com passagem central fabricado de aço fundido ou de alumínio extrudado, com uniões tipo rosca nos extremos do duto (Figura 2.4). Estas uniões são soldadas ao duto sem costura e são suficientemente fortes para conectar com outros dutos.

As funções deste componente são os seguintes:

- Servir como duto ao fluido de perfuração.
- Transmitir a rotação da superfície até a broca.

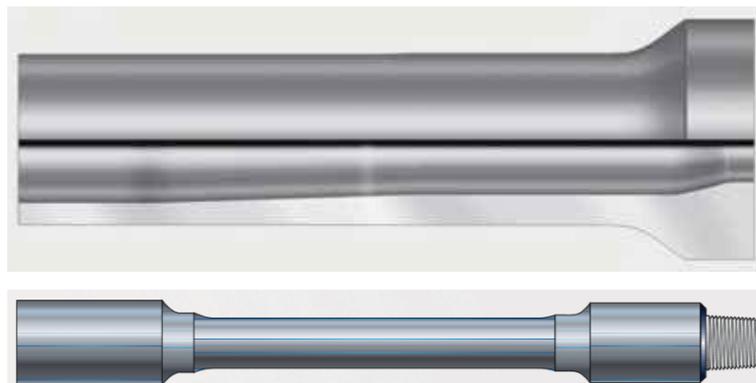


Figura 2.4 – Duto de perfuração sem e com uniões nos extremos, da acima para abaixo respectivamente (GRANT-PRIDECO, 2017).

2.2.3 Duto pesado (*Heavy Weight drill Pipe*)

Foi desenvolvido nos anos de 1960, tem uma maior espessura na parede, com uniões mais compridas que os dutos de perfuração, tem reforços no centro do duto, e encontra-se de forma espiral.

As funções são:

- Servir de transição entre os comandos e os dutos de perfuração.
- Evitar a flambagem do duto de perfuração.
- Ao trabalhar em compressão os acoplamentos não sofrem nenhum dano.
- Em alguns casos substitui os comandos.
- Mantém o duto de perfuração em tensão.

Segundo a referência NOV-Grant Prideco (2007) três tipos de dutos pesados existem: O Padrão HWDP, Espiral HWDP e o Espiral-Wate HWDP.



Figura 2.5 – Padrão, Tri-espiral e Espiral Wate, do duto pesado da acima para abaixo respectivamente (GRANT-PRIDECO, 2017).

2.2.4 Comandos (*Drill Collars*)

Dutos com grande espessura ou juntas integrais que são fabricadas a partir de uma barra de aço de liga modificada, as extremidades do duto têm roscas usinadas no torno (interna e externa).

As funções deste componente são:

- Fornecer peso para colocar na broca;
- Evitar o flambagem da coluna de perfuração;
- Fornecer o efeito pêndulo para a perfuração de poços retos;
- Fornecer de rigidez na coluna de perfuração, usado para trabalhar em altos esforços de compressão e torção.

De maneira geral, existem dois tipos de desenho de comandos: duto liso e duto em espiral.

Desenho de duto liso

São fornecidos com o acabamento de superfície laminado como é mostrado na Figura 2.6, na imagem direita.

Desenho de duto espiral

As ranhuras espirais (Figura 2.6, imagem esquerda), promovem o escoamento uniforme do fluido de perfuração ao redor do diâmetro do comando, equalizando a pressão e reduzindo a ocorrência de aderência diferencial (pressão do poço em parte da coluna de perfuração, com consequência o duto fica preso na parede).

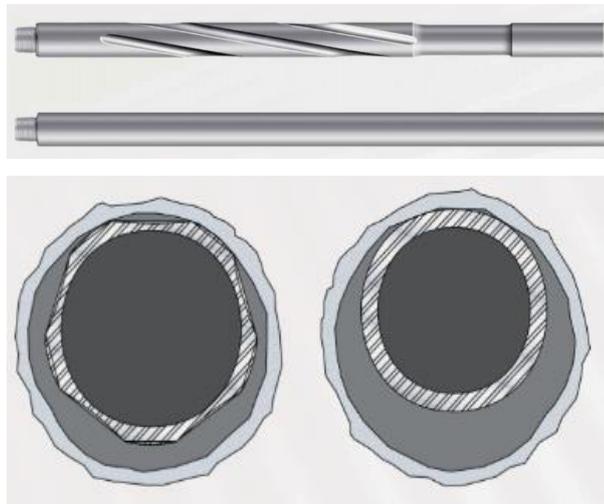


Figura 2.6 – Comandos de perfuração, imagem da acima, desenho de duto espiral e duto liso. Imagem em baixo, vista transversal dos dutos e poço, duto espiral e liso respectivamente (GRANT-PRIDECO, 2017).

2.2.5 Ferramentas especiais

I. Estabilizadores

As funções deste componente são:

- Controlar o comportamento direcional.
- Auxiliar no controle do peso da ferramenta de fundo sobre a broca.
- Minimizar a curvatura e as vibrações que causam desgaste dos acoplamentos que danificam os componentes da ferramenta inferior.
- Minimizar o torque de perfuração ao evitar o contato do comando de perfuração com as paredes do poço, mantendo-os concêntricos no poço.

Na indústria a classificação é arbitrária. Segundo a referência Jereh-Oil field, tem-se os seguintes tipos:

1. Estabilizador de manga linear;
2. Estabilizador espiral integral da lâmina;
3. Estabilizador de manga substituível;
4. Estabilizador não rotativo;
5. Estabilizador válvula flutuante;
6. Estabilizador esférico;
7. Estabilizador de redução;
8. Estabilizador espiral da lâmina em desequilíbrio.



Figura 2.7 – Alguns tipos de estabilizadores: manga linear, padrão, espiral integral e não rotativo, (Disponível em: <www.perfoblogger.wordpress.com> Acesso em: 13 jan.2019).

II. *Drilling Jars* e ferramentas de impacto

- Sistema de impacto AP (Access point);
- *Hydra-Jar* AP Ação dupla *Drilling Jar* Hidráulico;
- Ferramenta de impacto do acelerador AP (Access point);
- Amortecedor Hydra-Stroke Sub;
- Sub choque de impacto e redução de vibração;
- Escareadores e *Underreamers*.

2.2.6 Broca

As primeiras patentes das brocas de perfuração surgiram no início do século XX, paralelamente aos descobrimentos de jazidas de petróleo. Seu projeto e engenharia melhoraram notavelmente suas características físicas, mecânicas, e com isso sua duração e funcionamento também evoluíram (PLÁCIDO e PINHO, 2009).

Estas são ferramentas de corte localizada no extremo inferior da coluna de perfuração, sua função é cortar e esmagar a formação durante o processo da perfuração rotativa. Para realizar a perfuração, as brocas funcionam com base em dois princípios essenciais: a falha da rocha em superar seus esforços de corte, e a compressão. Ultimamente, também é considerada a erosão por ação de jatos de fluido como ajuda para a perfuração. O tema do desenho fluidodinâmico das brocas é pouco estudado, já que a maioria de estudos é enfocada no desenho mecânico, cujos objetivos principais é o corte e remoção do solo. No entanto o estudo fluidodinâmico da forma da broca permitirá diminuir o arrasto, diminuindo dessa maneira a queda de pressão. O estudo fluidodinâmico da forma da broca incluindo as aletas ou cones, permitirá diminuir o arrasto, obtendo menos recirculações, como consequência será diminuído a queda de pressão total.

Uma das formas de classificação de brocas é a seguinte (PLÁCIDO e PINHO, 2009):

1. Brocas com partes móveis

- a. **Brocas de cone de rolos:** Foi patentada por Howard Hughes em 10 de agosto de 1909 depois de 24 anos a mesma empresa apresentou a broca cones de rolos tricônica Baker-Hughes (2019). Atualmente a broca de cones é equipada com insertos resistentes à abrasão ou ao impacto (em seu diferentes graus), dependendo da aplicação. A broca de cones pode ter, dentes esculpidos ou pastilhas de carboneto de tungstênio. A broca possui três partes principais; cones, rolamentos e o corpo.



Figura 2.8 – Broca de cones de rolos 17 ½" WR (SMITH, 2018).

- b. **Brocas Híbridas:** É uma mistura das brocas de cones de rolos e as brocas de corte fixo do tipo PDC. Este tipo foi patenteado pela empresa Baker Hughes, e foi tema do trabalho de mestrado pelo Don Tuan Nguyen na universidade de Stavanger. Um exemplo desta broca é o modelo Kymera mostrado na Figura 2.9.



Figura 2.9 – Broca Híbrida Kymera 12 ¼" (NGUYEN, 2012)

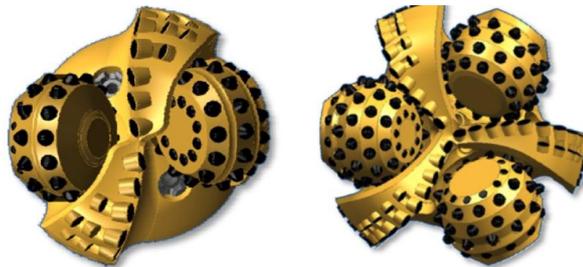


Figura 2.10 – Broca 2 cones e 2 aletas, Broca 3 cones e 3 aletas (NGUYEN, 2012).

2. Brocas sem partes móveis

a. Brocas de cortadores fixos

Brocas de arrasto: Foi o tipo mais antigo de brocas fixas em perfuração, corpo de aço afiado com estrutura de corte, e dentes de carboneto de tungstênio. A estrutura da broca simples do aço só podia ser usada em formações moles.

As brocas de arrasto foram usados basicamente em aplicações com poços de água, mineração, geotérmica, perfuração sísmica, perfuração ambiental ou de exploração. (NGUYEN, 2012). De acordo com a referência é considerado 3 tipos:



Figura 2.11 – Brocas tipo arrasto: Chevron, Gator Back e de Passo (WESTERNDRILLING).

Brocas PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*): As brocas tipo PDC possui boas taxas de penetração na perfuração. Os cortadores de diamante são 10 vezes mais fortes que o aço, mas são frágeis e podem ser danificados em formações contínuas.



Figura 2.12 – Broca PDC IADC: M433 8 ½". (MICON-DRILLING, 2016)

Brocas de diamante: O principal objetivo era perfurar formações extremamente duras ou difíceis de perfurar. Com o passar do tempo foi desenvolvido uma técnica nova para fabricação deste tipo de brocas, já que era muito caro os diamantes como insertos .

Os diamantes são mantidos ou inscrustados na matriz que é de carboneto de tungstênio. A haste de aço dá força estrutural na broca criando um meio adequado para fixar a broca à coluna de perfuração. (NGUYEN, 2012).

São classificadas em brocas de diamante natural e brocas de diamante termicamente estáveis (TSP).



Figura 2.13 – Brocas diamante (NGUYEN, 2012).

b. Broca de martelos de percussão:

Este tipo de broca trabalha com dois movimentos, rotação e o movimento de um pistão. Está desenhada para o trabalho com choques, vibrações, desgaste abrasivo, alta temperatura e erosão. Pode ter inserções de diamantes na matriz; um exemplo desde tipo, figura a seguir.



Figura 2.14 – Broca de martelos de percussão 8 ½" H1512D V6RPD R08 (SMITH, 2018).

3. Brocas especiais

Brocas desviadoras: São empregadas para perfuração direcional de formações moles. O duto de perfuração é inclinado dentro do poço e o jato maior perfura a lateral do poço em uma direção específica.

Brocas Coroas: Usadas nas operações de testemunhagem, as brocas possuem um furo no centro que permite que parte da formação não seja cortada pela broca, só a parte da “coroa”, e posteriormente o testemunho é levado a superfície para análise mais detalhada das formações.

2.2.6.1 Seleção de brocas

A importância de saber os parâmetros para a seleção de brocas, permitirá entender influências mecânicas ou fluidodinâmicas no processo de análise posteriormente.

I. Custo do preço por metro

É comum fazer uma comparação de várias brocas, para encontrar a mais econômica na perfuração. Dados de poços anteriores como litologia similar são usados nas estimativas. Para medir a vida econômica da broca, é calculado o custo total de dinheiro gasto para perfurar a distância com essa broca. Isso inclui o tempo de viagem e de perfuração considerando as horas de aluguel do equipamento. Para saber o tempo, começa quando a broca foi montada ao BHA, incluindo as horas de recorrido no poço, perfurar a profundidade desejada e retirar (NGUYEN, 2012).

Parâmetros essenciais para o cálculo:

P_b : custo líquido da broca;

P_r : preço de aluguel do equipamento por hora;

T_t : tempo de disparo;

T_r : tempo de perfuração;

m : Número de metros perfurados.

II. Peso na Broca (WOB) e Taxa de Penetração (ROP)

Tem estudos que mostram que o WOB é aumentado em velocidade rotacional constante melhorando o ROP. É determinado que tem uma relação aparente entre o peso da broca e taxa de penetração. Se o fluido de perfuração limpa os bocais da broca, aumenta o ROP que é também proporcional ao WOB. O ROP pode atingir ao máximo quando a broca atinge o limite de carga. Se o WOB passa o limite, pode acontecer o seguinte:

- Bloqueio dos bocais da Broca;
- Danifica a broca;
- Falha na ferramenta de registro.

Para rochas moles, as brocas possuem dentes longos e dispersos; para formações duras, as brocas são equipadas com dentes pequenos e rolamentos maiores, portanto, podem suportar cargas mais altas.

O WOB está relacionado com o ROP, e ambos não podem ser aumentados ao mesmo tempo, sem causar tensões na coluna de perfuração e na broca. A velocidade de rotação pode ser limitada pelas seguintes condições:

- Vibrações na coluna de perfuração, que podem causar fadiga e falha;
- Arrastro em poço desviados;
- Limpeza incorreta dos bocais.

O ROP além de estar relacionado com o WOB é influenciado por outros fatores próprios do processo de perfuração, como, a velocidade de rotação, desgaste da broca, litologia e pressão de circulação no fundo de poço. O ROP é expresso em unidades de comprimento por tempo.

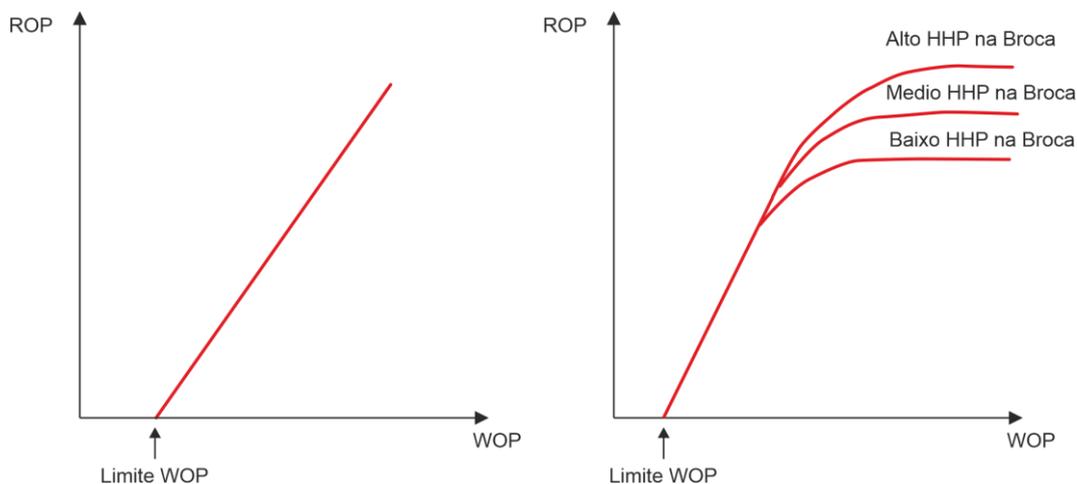


Figura 2.15 – Curva taxa de penetração v. peso da broca na esquerda, e na direita, taxa de penetração v. limpeza do bocal, onde HHP (*Hydraulic Horse Power*) (FORD, 2017).

Ao comparar as curvas ROP de diferentes poços, deve ser feita uma curva normalizada chamada NROP (*normalized rate of penetration*). Os valores registrados reais são corrigidos de volta (ou normalizados) para os valores base para cada broca, usando a Eq. (2.1).

$$NROP = ROP * \frac{(WOB_n - M)}{(WOB_o - M)} \left(\frac{RPM_n}{RPM_o} \right)^L \frac{(dPb_n * Q_n)}{(dPb_o * Q_o)} \quad (2.1)$$

Onde:

Parâmetros essenciais para o cálculo:

n, o : valor normal e valor observado;

WOB : peso da broca;

M : peso limiar, ou WOB necessário para causar falha da formação;

RPM : revoluções por minuto;

dPb : queda de pressão em PSI, pressão necessária para atravessar os bocais;

Q : vazão volumétrica;

L : expoente de rotação;

III. Perfurabilidade

No processo de perfuração, a coluna tende a ser direcionada produto da influência pelo desenho da broca, e outros fatores mecânicos. Quando a direção é desviada, o poço é deslocado. O ângulo entre a força lateral (FL) e o deslocamento lateral (DL) da broca é chamado de ângulo de deslocamento ω como mostrado na Figura 2.16. Se o ângulo de deslocamento é maior que zero, então a broca tem uma tendência na “direita” e se é “esquerda” acontece o contrário.

Se o ângulo é precisamente zero ou na mesma direção que a força lateral, então a broca tem uma tendência “neutra”.

A dirigibilidade da broca (BS) pode ser definida como a relação de capacidade de perfuração lateral (PL) em relação à capacidade de perfuração axial (PA), enquanto capacidade de perfuração é a relação de deslocamento por revolução em relação à força lateral ou WOB. (NGUYEN, 2012)

$$BS = \frac{PL}{PA} \quad (2.2)$$

$$\text{Pefurabilidade} = \frac{\text{Deslocamento}}{\text{Força}}$$

As características da broca e um corte agressivo são fatores que podem afetar a dirigibilidade. É importante saber que a inclinação da broca desempenha um papel importante como os pontos da broca na direção inclinada e tende a perfurar nessa direção.

Calibres mais longos proporcionam boa estabilidade direcional, mas são mais difíceis de orientar com RSS. Finalmente os projetos dependem da aplicação da perfuração.

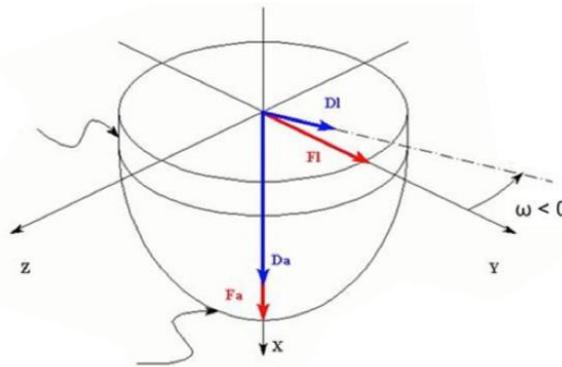


Figura 2.16 – Representação da dirigibilidade e o ângulo de deslocamento. (NGUYEN, 2012).

2.3 CONTRAÇÃO ABRUPTA

A coluna de perfuração é constituída por diversos componentes formando assim um sistema (ver na seção 2.2), porém neste trajeto tem-se mudanças de seção e direção dependente do tipo de poço a perfurar. Neste estudo consiste na direção vertical do trajeto, sendo do tipo, poço convencional (ver na seção 2.6.1).

Para representar esta variação de seção define-se um parâmetro que é a relação entre o diâmetro maior (D) e menor (d) definida como razão de contração:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (2.3)$$

A contração pode ser abrupta ou gradual. Em estudos realizados, na contração abrupta, surge uma queda de carga menor (pressão total) que na expansão abrupta (FELICES, 2007, p. 156). Assim mesmo o coeficiente de resistência k na queda de pressão é menor (CRANE).

Observando a Figura 2.17 na região perto da contração abrupta (ponto 0), o escoamento começa acelerar, até chegar a zona de contração, neste ponto a camada limite é descolado, posteriormente a linha de corrente muda de direção (ponto 1) afastando-se do centro do perfil de velocidades, logo se inicia a desaceleração do fluido produto de uma maior

seção transversal, até que o escoamento é estabilizado (ponto 2). Na zona onde as linhas de corrente convergem e depois divergem é chamado de vena contracta.

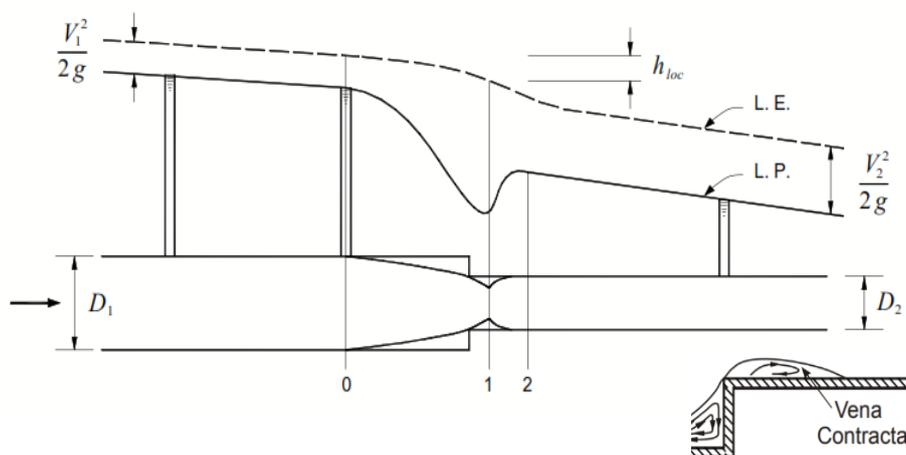


Figura 2.17 – Representação da linha de energia (L.E), linha piezométrica (L.P) e a vena contracta. (FELICES, 2007).

Como pode ser observado, a energia de pressão proporcionada pela bomba sempre é transformada ao longo do trajeto no duto, como é mostrado na L.E com uma queda carga cujo valor é h_{loc} para o trecho de 0 a 1.

Dentro da vena contracta tem uma estrutura turbilhonar que é originado pelo descolamento da camada limite, originando um gradiente adverso de pressão contrário à direção do escoamento.

Influência da contração abrupta na potência elétrica da bomba

A queda de carga na linha energia (L.E) corresponde à pressão total. A contração e expansão naquela área, é similar nas mudanças de seção ao longo do trajeto na coluna de perfuração, porém a queda de carga será reflexo na potência da bomba de lama de perfuração. A soma de todas as quedas de pressão total pelo trajeto e acessórios é chamado de altura dinâmica total (ADT), que é o valor que têm que ser atingido pela pressão exercida da bomba.

É importante saber que a maior ADT a potência hidráulica aumenta, portanto a potência mecânica, e conseqüentemente, a potência elétrica, gerando consumo maior da energia elétrica. Portanto para menor ADT, menor será a pressão que precisará a bomba para vencer todas estas resistências. As quedas de carga ao longo do tempo podem aumentar, se não tem a manutenção adequada nos dutos de perfuração. A acumulação de partículas e sedimentos nas paredes dos dutos, exigirá uma maior demanda da bomba, mudando o ponto de funcionamento, que geralmente este ponto é de máxima eficiência. É conhecido, que na

operação no ponto de baixa eficiência, influenciará no tempo de vida da turbomáquina, aumentando os custos de manutenção, custo de renovação de peças da bomba em período mais curto do que o planejado, além do aumento de custos do KW/hora pelo consumo maior do motor da bomba, se trabalhar fora do ponto de máxima eficiência (MATAIX, 1986).

2.4 FORÇA DE IMPACTO

Os jatos de fluido que saem pelos bocais da broca, contribuem com o processo de perfuração, já que tem como funções, lubrificar a broca, remover as partículas produto do corte e a erosão do solo.

Dependendo da posição do ejetor com relação a posição do fundo de poço, existem diferentes valores de força de impacto, que normalmente são avaliadas tomando como base o campo de pressão. Na presente proposta, a força de impacto será obtida pelo método de fronteira imersa, através da quantificação da força lagrangiana.

A quantidade de movimento linear que sai pelos jatos, está diretamente relacionada à velocidade e pressão estática do fluido sobre a superfície de incidência, como será mostrado na parte de resultados.

Correspondente a linha de energia, tem uma queda de pressão total pela expansão, ao sair o fluido pelos bocais (Figura 2.18), este jato impacta na superfície com uma determinada quantidade de movimento linear por tempo, portanto vai depender da dureza da rocha para saber a quantidade de material de remoção, produto da erosão do impacto.

As partículas que são removidas, aumentam sua energia cinética por ação do escoamento no regime turbulento, e terão trajetórias não uniformes, já que estarão na região de alta intensidade turbulenta que será verificado na seção de resultados (ver a seção 5), com presença de numerosas estruturas turbilhonares e recirculações.

É importante a presença de turbulência no fundo de poço para evitar a decantação das partículas, e assim ter uma maior quantidade de sólidos, para ser levados até a superfície pelo fluido de perfuração como parte do processo.

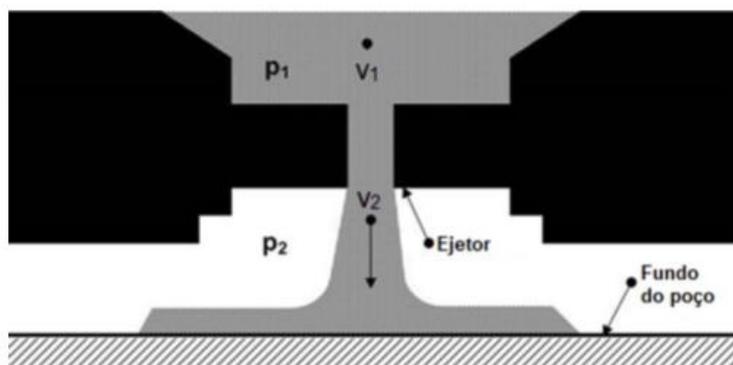


Figura 2.18 – Esquema geral do bocal na broca, tomando 2 pontos diferentes para monitorar a pressão e velocidade. (MANEIRA, 2013).

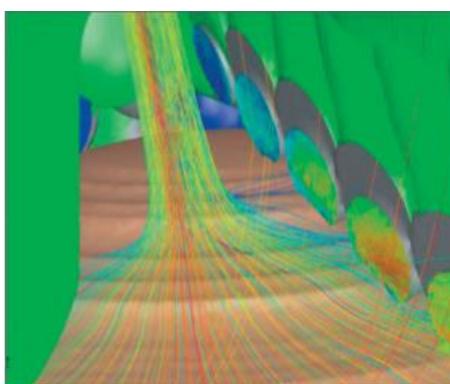


Figura 2.19 – Linhas do corrente do jato saindo pelos bocais de uma broca (SMITH, 2018).

2.5 EROSÃO

O estudo deste fenômeno é de interesse na área geológica e também na indústria; todo desgaste produzido na superfície de um corpo ou na superfície terrestre pelo atrito de outro corpo ou pela ação de um material com suficiente quantidade de movimento linear, é chamado de erosão. Este fenômeno é muito estudado na parte de turbomáquinas (bombas, turbinas, compressores, etc.), já que sofrem continuamente erosão em suas pás. O fluido em alguns casos apresenta partículas em suspensão, ou está contaminado com substâncias corrosivas que em contato (com uma determinada velocidade) com as pás da turbomáquina, corroem o material, afetando a eficiência de toda a máquina, originando diversos danos, uma delas o desequilíbrio por diferença de massa em algumas regiões do rotor, conseqüentemente a vibração.

No presente estudo a erosão é um problema para as pás da broca, e um benefício para a remoção do solo, ajudando no desgaste da superfície do fundo de poço na zona de impacto dos jatos, localizado geralmente na zona central, desestabilizando os esforços do solo e

facilitando o corte da broca na superfície. No caso real, fluido de perfuração, é composto por muitas substâncias, dentre elas, óleo, água, cerâmicos, aditivos orgânicos, inorgânicos e químicos. (ROMAI, 2008).

Porém o desgaste por erosão com partículas, envolve diversos mecanismos que são majoritariamente controlados pelo material e tamanho das partículas, o ângulo e a velocidade de impacto. Se as partículas têm maior dureza, é possível que o processo de corrosão aconteça. A taxa de remoção do material é aproximadamente proporcional à velocidade elevada à potência n , onde n varia entre 2 e 2,5 para metais e entre 2,5 e 3 para materiais cerâmicos. (LUDEMA, 1996).



Figura 2.20 – Disposição dos ejetores da broca tipo de cones de rolos (SMITH, 2018).

2.6 PERFURAÇÃO DE POÇOS

A China tinha poços antes de 1200 d.C., depois seguida na França, Itália e Virgínia Ocidental. O primeiro objetivo de perfuração foi extrair água, as posteriores necessidades de recursos levaram a perfuração para energia geotérmica, água salgada, gás para aquecimento e óleo. Um importante acontecimento, foi o poço Drake, perfurado na Pensilvânia em 1859, que foi o início do reconhecimento da indústria de perfuração nos Estados Unidos. O equipamento começou com ferramentas de escavação manual, depois na década de 1800, com equipes de plataforma de reboque, cabo de reboque e plataforma giratória. A perfuração inicial de “churn” usava um cabo ou linha de perfuração flexível, porém os poços eram principalmente verticais (SHORT, 1993).

Os procedimentos de perfuração foram melhorando com o tempo, perfurando a mais de 30000 pés verticalmente, no entanto a perfuração horizontal evoluiu para a melhoria da produtividade do poço. Os primeiros poços tinham um ou mais poços curtos perfurados horizontalmente na formação do poço vertical, onde perceberam que estes poços de

drenagem, expunham mais do reservatório ao poço e produziam maiores volumes de óleo e gás. Atualmente a perfuração direcional moderna é amplamente empregada, inicialmente, esta técnica foi utilizada para desviar (com brocas tipo peixe), corrigir problemas de furos tortos e, posteriormente, impediu o poço cruzar as linhas de locação.

Na perfuração terrestre e marítima é normal encontrar vários poços direcionais na localização de uma superfície, como é observado na Figura 2.21 mostra os seguintes tipos de poços: A-Poço de alívio, B-poço exploratório, C-poço de desvio, D-poço para endireitar.

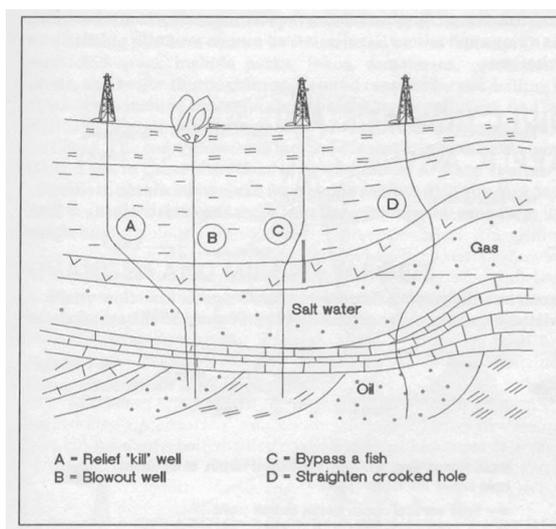


Figura 2.21 – Aplicações direcionais de vários poços na localização de uma superfície (SHORT, 1993).

A classificação do poço depende da sua forma, da finalidade da perfuração do poço e do procedimento de perfuração. Em alguns casos esta classificação segue os padrões propostos pela comunidade; neste trabalho é identificado 2 tipos arbitrários.

2.6.1 Tipos de poços pelo procedimento de perfuração

I. Perfuração de poços convencionais

O sistema de perfuração rotatório é utilizado neste tipo de poço, composto pela coluna de perfuração (ver a seção 2.2), com a finalidade de aplicar energia mecânica e de pressão para realizar o trabalho de perfuração. Em alguns casos é usado um motor de fundo composto por uma turbina com vários estágios acionado pelo fluido de perfuração localizada acima da broca. Esta técnica é baseado na perfuração com a coluna (*drill pipe*), paralelamente a instalação de um duto de revestimento (*casing*) e como parte final, a instalação do duto de produção (*tubing*). Geralmente os poços verticais e moderadamente desviados, são chamados de poços convencionais, porque são de configurações comuns para perfurar.

II. Perfuração de poços não convencionais

Este tipo de sistema é o resultado das técnicas de otimização na construção de poços de petróleo, baseado na informação que foi proporcionada pelas empresas de petróleo, e simulando casos com esta informação, conseguindo economizar tempo e custos em função das condições operacionais. Esta técnica envolve conexões com desenhos inovadores, que cumprem com os requerimentos operativos. As técnicas não convencionais mais utilizadas são, *casing*, *liner*, *tubing* e dutos enrolados (*coiled tubing*). (VARGAS e BENAVIDES, 2011)

Coiled tubing drilling

São dutos de aço contínuo, de pequeno diâmetro armazenados em um carretel na superfície em comprimentos de até 6000 m (19,685 pés). Esses podem ser usados no lugar do duto de perfuração para novos poços e desvios horizontais de comprimento curto e médio.



Figura 2.22 – Duto *coiled tubing* piloto, campo de Cusiana na Colômbia. (CHAREUF AFGHOUL, AMARAVI, *et al.*, 2004).

Precisam da combinação do motor de fundo e broca; a turbina é movimentada pelo escoamento do fluido de perfuração; a tubulação não gira. Esta técnica é mais rápida do que a perfuração normal, já que o tempo de conexão envolvido com o duto de perfuração é eliminado. A tubulação é simplesmente enrolada dentro e fora.

III. Perfuração de poços com *casing*

Esta técnica pode ser realizada sem a necessidade de descer a coluna de perfuração, para depois extrair este sistema e revestir com *casing*, já que a coluna contém o *casing*. Mitiga o problema de perdas de circulação, melhora o controle de poço e reduz o tempo de perfuração não produtivo, diminuindo o risco de desvios não programados e entupimento dos dutos.

2.6.2 Tipos de poços pela direção de perfuração do poço

I. Poços verticais

Esta técnica fica dentro dos poços convencionais, não apresenta desvio, nem mudanças angulares na direção durante a perfuração. O resultado da penetração vertical de um intervalo de reservatório, geralmente é muito mais previsível. No presente trabalho será utilizado este tipo de poço.

II. Poços direcionais

a) Poços de desvio (*Sidetrack well*)

Este tipo é utilizado quando é necessário desviar o poço com direção para um alvo diferente. Um desvio pode ser necessário se houver um objeto preso no poço original que não pode ser retirado, uma janela poder ser cortada na carcaça do poço original como é mostrado na Figura 2.23, e a perfuração portanto prosseguirá para fora da janela em direção a um novo alvo. (APPGWIKI, 2019)

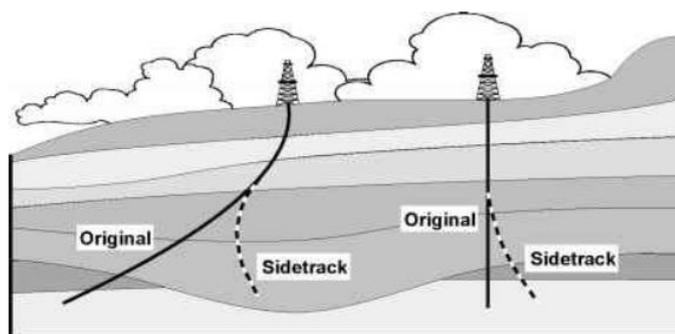


Figura 2.23 – Representação de poços de desvio. (Fonte: Disponível em: <<https://www.netwasgroup.us/engineering-4/sidetracking.html>> Acesso em: 11 mai.2019)

b) Poços de desenho

São tipos de poços de alto ângulo ou horizontais que tem mais de um alvo. Esta técnica é muito mais rentável no sentido produtivo, já que numa trajetória pode penetrar e drenar mais de um bloco de falha (Figura 2.24), em campos com muitos alvos podem aumentar as chances de encontrar um reservatório econômico de óleo.

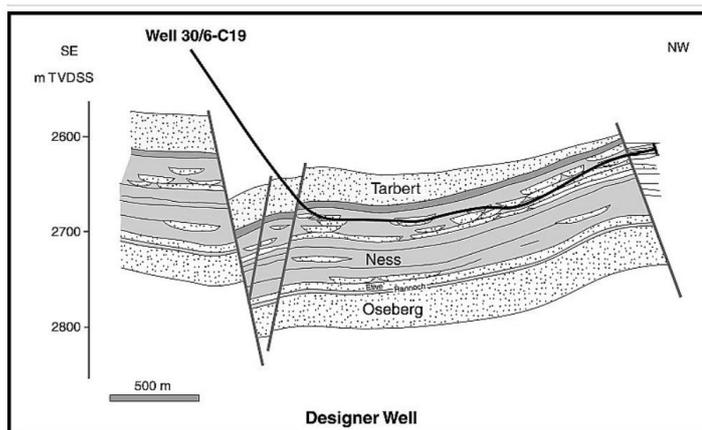


Figura 2.24 – Poço de desenho no campo de Oseberg, no mar do norte de Noruega. A seção do poço horizontal foi planejada para atingir vários corpos de canais fluviais sísmicamente definidos dentro da formação Ness. (Fonte: Disponível em: < <https://wiki.aapg.org>> Acesso em: 11 mai.2019)

Esses tipos de poços geralmente são subdivididos em alguns padrões, como; curva única, curva dupla, alcance estendido e poço inclinado observado na Figura 2.25. Também existem padrões complexos, compostos por múltiplas curvas, lembrando que cada padrão, é para uma finalidade específica.

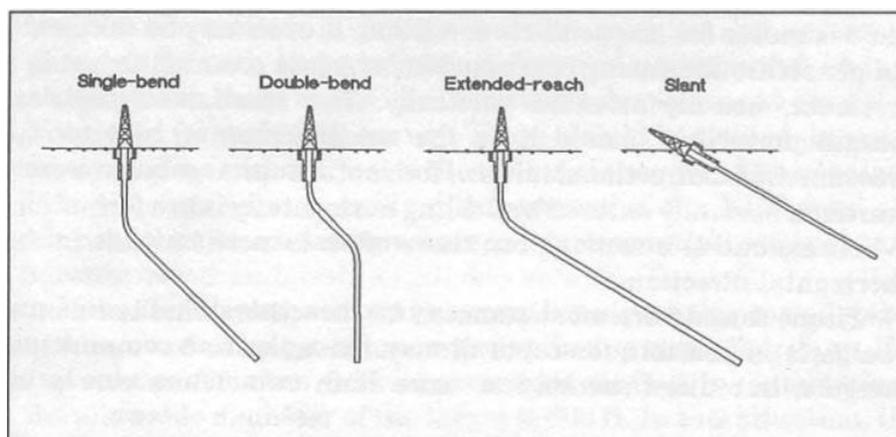


Figura 2.25 – Padrões de endereços. Curva única, curva dupla, alcance estendido e poço inclinado (SHORT, 1993).

c) Poços Multilaterais

Quando um poço tem irradiado mais de um ramo e cada ramo pode drenar uma parte separada do reservatório e produzir em um único poço comum (Figura 2.26).

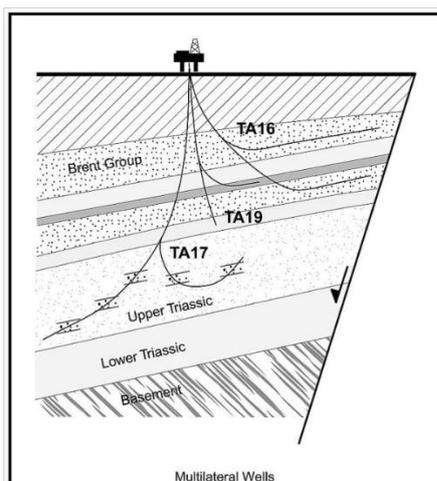


Figura 2.26 – Poço multilateral, mar do norte do Reino Unido. (Fonte: *Geological society* Disponível em: < https://wiki.aapg.org/Well_types > Acesso em: 12 mai.2019)

III. Poços horizontais

São poços onde a perfuração tem alto ângulo, cuja trajetória é mantida na zona do reservatório ou zona de hidrocarboneto. Esses poços não são perfeitamente horizontais, geralmente tem um ângulo maior que 80 na vertical. O ponto em que o poço entra (ou pausa) no reservatório é chamado de ponto de entrada (*entry point*). A partir daí o poço continua em uma orientação quase horizontal.

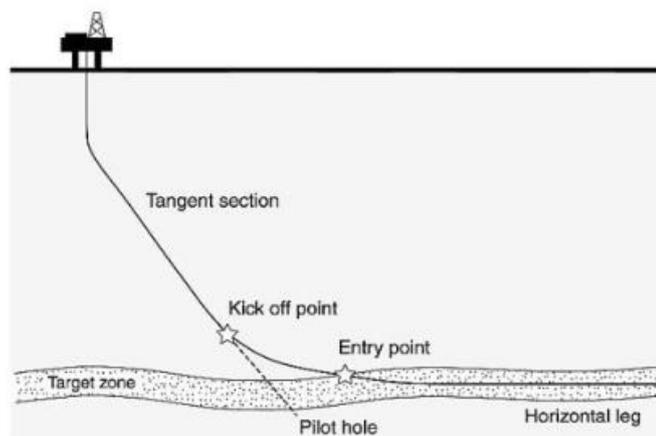


Figura 2.27 – Representação de um poço horizontal usando uma técnica de direcional, com os pontos importantes na trajetória. (Fonte: Disponível em: < https://wiki.aapg.org/Well_types > Acesso em: 12 mai.2019)

Um problema na perfuração horizontal é a localização do ponto de partida (*kickoff point KOP*), esse ponto deve ficar na distância correta acima do reservatório suficiente para virar a coluna de modo que vai entrar no alvo em ângulo quase horizontal. Dada a incerteza sobre a

profundidade da zona alvo, a partir dos dados sísmicos, é comum que um poço-piloto seja perfurado primeiro, para obter essa informação diretamente (APPGWIKI, 2019).

2.7 NORMAS API PARA O DESENHO DA BROCA

Desde 1924, o Instituto de Petróleo Americano (*siglas API em inglês*) tem sido a entidade fundamental para o estabelecimento de padrões na indústria mundial de petróleo e gás natural. Estas normas servem para evitar problemas de compatibilidades entre os componentes da coluna de perfuração, acessórios, ferramentas, etc. melhorando a segurança na indústria, qualidade, baixos custos e minimizar os resíduos, o API trabalha conjuntamente com os padrões ISO.

É por isso a importância dos padrões de fabricação e desenho que mostra estas normas, e assim ter um mercado mais aberto com os acessórios de dimensões padrões. É preciso lembrar, que neste trabalho é proposto duas brocas simplificadas para o estudo que estão baseadas nas relações das medidas entre diâmetros pela API.

Para o desenho da broca e a coluna de perfuração foi utilizado a especificação API 7-1, que é responsável de mostrar os padrões de medidas dos elementos rotativos da coluna de perfuração.

Dentro desta especificação, pode se encontrar a broca que forma parte da coluna de perfuração. Esta norma descreve o tipo de conexão e os detalhes das dimensões da fabricação da rosca. Outro padrão muito importante que especifica o material, forma e desenhos da broca é a IADC. Este último permite a codificação das brocas baseadas na informação do material, geometria, capacidade de corte, rolamentos, etc. IADC (2000). Para as empresas, esta informação é muito importante, por que permite identificar com maior facilidade as características da broca de acordo ao requerimento e necessidade da perfuração.

Embora, as simplificações do modelo físico desconsideram detalhes mínimos como passo da rosca ou forma da conexão, é importante que o leitor tenha conhecimento, que para as brocas originais, a conexão API apresenta diferentes tipos a seguir: *Regular*, *Internal Flush* (IF) e *Full Hole* (FH).

Tabela 2.2 – Descrição da nomenclatura do código dado pela IADC para broca tipo PDC.
(Fonte: Disponível em: <<http://www.holemonster.com.tr>> Acesso em: 25 mai.2019)

IADC classification : PDC bits							
A Bit body		B Formation type		C Cutting structure		D Bit profile	
"M"	Matrix	1	Very soft	2	PDC, 19mm	1	Short fishtail
"S"	Steel			3	PDC, 13mm	2	Short profile
"D"	Diamond			4	PDC, 8mm	3	Medium profile
Example							
M	Matrix	2	Soft	2	PDC, 19mm	4	Long profile
4	Medium			3	PDC, 13mm		
3	PDC 13mm			4	PDC, 8mm		
4	Long profile	3	Soft to medium	2	PDC, 19mm	4	Long profile
				3	PDC, 13mm		
				4	PDC, 8mm		
		4	Medium	2	PDC, 19mm	4	Long profile
				3	PDC, 13mm		
				4	PDC, 8mm		
		5	No code				
		6	Medium hard	2	Natural diamond	4	Long profile
				3	TSP		
				4	Combination		
		7	Hard	2	Natural diamond	4	Long profile
				3	TSP		
				4	Combination		
		8	Extremely hard	2	Natural diamond	4	Long profile
				3	Impregnated diamond		

Tabela 2.3 – Descrição da nomenclatura do código dado pela IADC para broca tipo Cones de Rolos (Fonte: Disponível em: <<http://burintekh.comf>> Acesso em: 07 mai.2019)

1		2		3							4 (unrequired)	
Series	Formation type	Bearing / Gauge							Additional features			
		1	2	3	4	5	6	7	A	B		
Steel Tooth	1 Soft	1	Standard open roller bearing	Standard open roller bearing, air-cooled	Standard open roller bearing with gauge protection	Sealed roller bearing	Sealed roller bearing with gauge protection	Sealed friction bearing	Sealed friction bearing with gauge protection	A	Air application (journal bearing with air nozzles)	
		2								B	Special bearing seal	
		3								C	Center jet	
2 Medium	1	D								Deviation control		
	2	E								Extended jets (full length)		
	3	G								Extra gauge/body protection		
3 Hard	1	H								Horizontal/steering application		
	2	J	Jet deflection									
	3	L	Lug pads									
Tungsten Carbide Tooth	4 Soft	1	M	Motor application								
		2	S	Standard steel tooth model								
		3	T	Two cone								
		4	W	Enhanced cutting structure								
5 Soft to medium	1	X	Predominantly chisel tooth inserts									
	2	Y	Predominantly conical inserts									
	3	Z	Other shape inserts									
6 Medium	1											
	2											
	3											
7 Hard	1											
	2											
	3											
8 Very hard	1											
	2											
	3											
	4											

A relação entre o diâmetro da broca e o duto de perfuração foi respeitada. As dimensões das aletas ou cones, passagem, e bocais da broca é proporcional aos tipos de broca existentes. Porém é preciso saber as características dos tipos de brocas que serão utilizado no presente estudo, PDC e Cones de Rolos. Para isso, a nomenclatura do código dada pela IADC é apresenta nas seguintes Tabela 2.2 e Tabela 2.3.

A Tabela 2.2, mostra a codificação em quatro colunas representado cada coluna por uma letra. O primeiro dígito “A” é referido ao material da broca, os segundo dígito “B” é referido ao tipo de formação do solo, o terceiro dígito “C” ao a estrutura cortante em mm, e o ultimo dígito “D” os tipos de perfil da broca. Neste trabalho foi considerado o tipo M433, que corresponde uma broca com material matrix, para uma formação media e molha, uma estrutura de corte de 13 mm e perfil médio.

Da mesma forma a Tabela 2.3, descreve a codificação para a broca cones de rolos. A coluna “1” é referido ao tipo de material de inserto, a coluna “2” o tipo de formação do solo, a coluna “3” corresponde ao tipo de rolamento, e a coluna “4” parâmetros adicionais.

Foi considerado o código 617X, correspondente à o inserto de carboneto de tungstênio, formação do solo médio, rolamento de fricção vedado com proteção de bitola.

2.8 MODELO FÍSICO SIMPLIFICADO DA BROCA

2.8.1 Broca tipo PDC-IADC M433

Foi escolhido um diâmetro para o tipo de broca PDC, 8 ½” (215,9 mm), que corresponde à conexão API Regular de 4 ½”, além disso pode ter um DC de 5 ½”, 5 ¾”, 6” ou 6 ¼” que é o duto de conexão direta com a broca, sendo escolhida o diâmetro 5 ¾” (BAKER).

Portanto a relação inicial que existe entre o diâmetro da broca e o DC é de 1,478.

8 ½” (215.9 mm) IADC: M433 MD613DBX

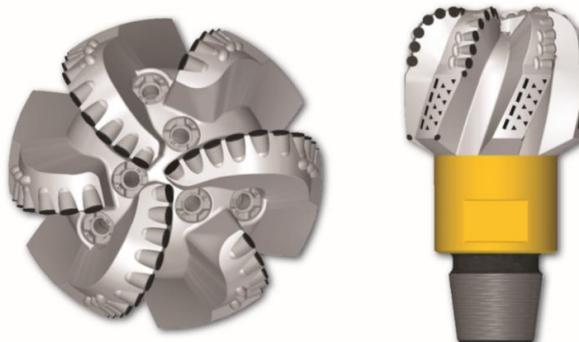


Figura 2.28 – Representação da Broca tipo PDC código IADC-M433 (MICON-DRILLING, 2016)

Como pode ser observado, a broca apresenta muitas partes complexas, detalhadas na geometria (Figura 2.28), por ter um desenho estrutural e fluidodinâmico com o fim de melhorar eficiência em ambos sentidos. O objetivo do trabalho é ver a parte fluidodinâmica, e ter

conhecimento dos fenômenos físicos que são influenciados pela forma da broca em termos médios, porém simplificações foram feitas para aliviar o custo computacional da simulação.

No modelo simplificado foi considerado 3 aletas e 3 bocais, os quais representam a soma de volume e área de 6 aletas e 6 bocais respectivamente, que em teoria representaria a mesma geometria em termos de volume e área efetiva.

Ao finalizar o modelo com as dimensões dadas pela broca do catálogo (Figura 2.28), utiliza-se um fator de escala (3,42) de tal forma que o diâmetro de entrada do fluido é 0,5m (500 mm) aproximadamente. Da mesma forma o fator de escala é aplicado para o diâmetro da broca sendo 738,378mm e será considerado 740mm com o objetivo de evitar as casas decimais. Portanto a nova relação entre o diâmetro da broca e o DC é de 1,48.

Depois de ter o desenho da broca e as dimensões, foram propostas três brocas com variações baseado neste tipo, que serão apresentados na Figura 2.29.

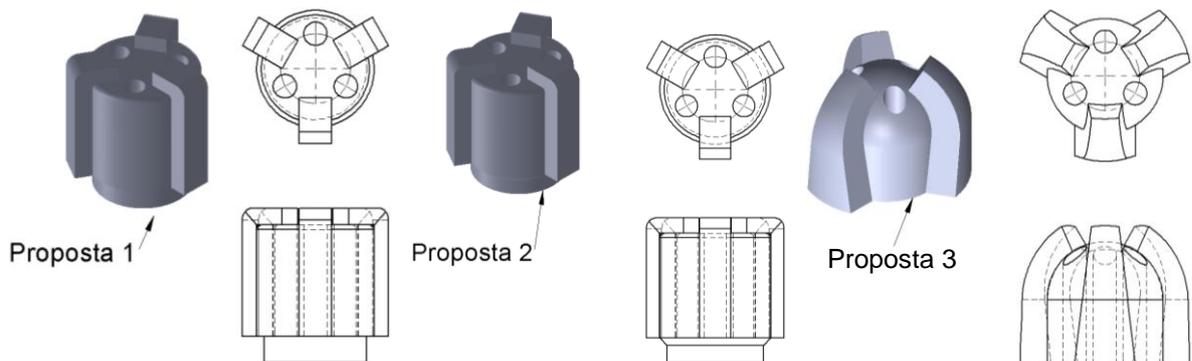


Figura 2.29 – Representação das propostas feitas baseados na broca tipo PDC-IADC M433.

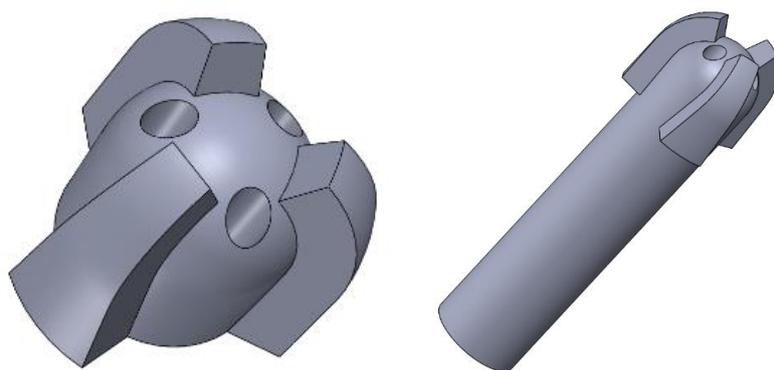


Figura 2.30 – Representação da broca tipo PDC e a coluna de perfuração.

Como é mostrado na Figura 2.29, tem uma variação na matriz da broca, portanto o critério foi que o bordo de ataque, tem que ser o mais fluidodinâmico possível (no sentido da analogia com a palavra aerodinâmico) e além disso fácil de reproduzir no programa CAD, por

isso foi escolhida a matriz de forma semiesférica. Detalhes de medidas da broca é mostrado no apêndice A e B, códigos dos planos BPDC-H1 e BPDC-H2.

A proposta final é apresentado na Figura 2.30, a coluna de perfuração composta pelo duto e broca de perfuração (detalhes das medidas são apresentados no apêndice A, código de plano DBDPC-H1).

Para dar continuidade ao modelo físico, foi preciso pensar na representação do fundo de poço. Numa perfuração real, a broca tem contato com a superfície lateral e normal do fundo de poço, para qualquer tipo descrito anteriormente. Neste caso, o fundo de poço tem uma pequena folga entre os mancais e a parte lateral, evitando problemas de geração de malha e dificuldade na simulação, esta folga tem uma distância de 20 mm entre o limite das aletas e o fundo de poço (detalhes são apresentado no apêndice A, código de plano DBFPDC-H1.), a mesma distância foi considerada entre diâmetro máximo da broca com as paredes laterais do poço como é mostra na Figura 2.31.

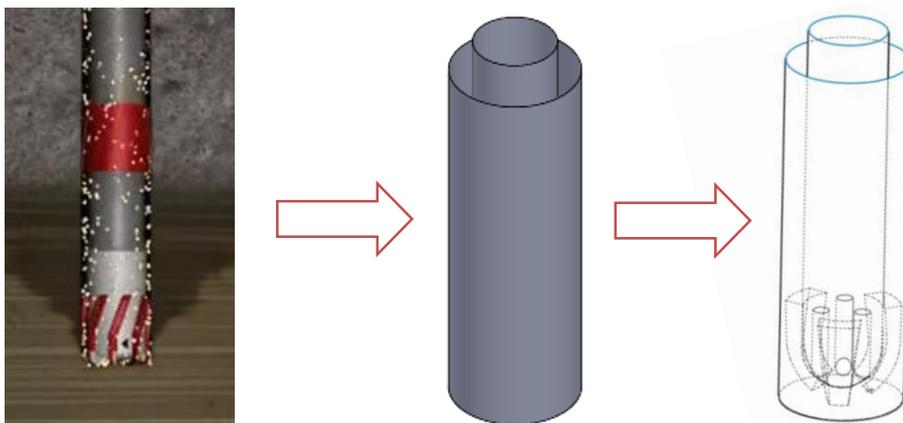


Figura 2.31 – Representação da coluna de perfuração e poço, para a broca tipo PDC.

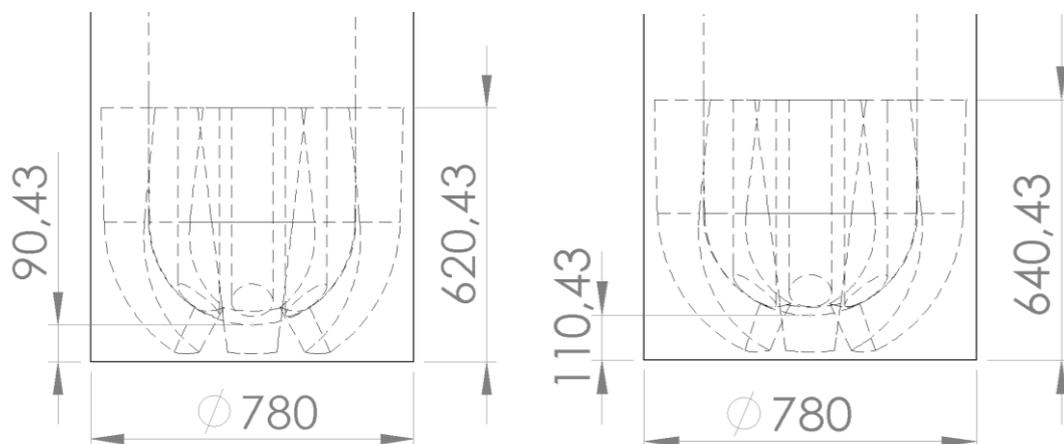


Figura 2.32 – Posição dos bocais referente ao fundo de poço para a Broca tipo PDC. Medidas estão em milímetros.

Um dos objetivos planejados neste trabalho é verificar a força de impacto no fundo de poço, influenciado pela altura de afastamento do bocal com relação a superfície do fundo de poço. Foi necessário redesenhar as aletas da broca para ter uma equivalência em afastar a posição dos bocais, portanto pode-se dizer que é outra broca com ângulos e espessura diferentes. O deslocamento das posições dos bocais com respeito ao fundo de poço é de 90,43 e 110,43 mm como é mostrado na Figura 2.32.

2.8.2 Broca tipo Cone de rolos-IADC 617X

Foi escolhida um diâmetro da Broca de 8 1/2" (215,9 mm), isto corresponde uma conexão API Regular de 4 1/2", da mesma forma que o caso anterior será escolhido um DC de 5 3/4" (146,05 mm).

8-1/2" FH40ODV
(215.9 MM)
Product ID: 005218041 IADC 617X



Figura 2.33 – Representação da broca tipo Cones de Rolos código IADC-617X. (SMITH, 2018).

Esta broca apresenta detalhes estruturais difíceis para o desenho, como por exemplo os insertos de carboneto de tungstênio nos cones (Figura 2.33). O objetivo da simplificação é aliviar o custo computacional, porém a simplificação também vai consistir em evitar acumulação de malha forçada pelas áreas pequenas produto de estruturas pequenas próprias do desenho original da broca. Portanto terá uma malha mais macia.

Foi considerado três cones (por isso que será chamado de broca tricônica), e três bocais. De forma similar com a primeira broca, o fator de escala 3,42 será utilizado de tal forma que o diâmetro de entrada do fluido seja de 0,5m (500 mm). Depois de aplicar o fator de escala e ter medidas sem considerar casas decimais, a relação entre o diâmetro da broca e o duto que conecta a broca (DC) é de 1,48.

Posteriormente de ter o desenho da broca e as dimensões dadas, foram propostas três brocas com variações baseado neste tipo, que serão apresentados na seguinte figura.

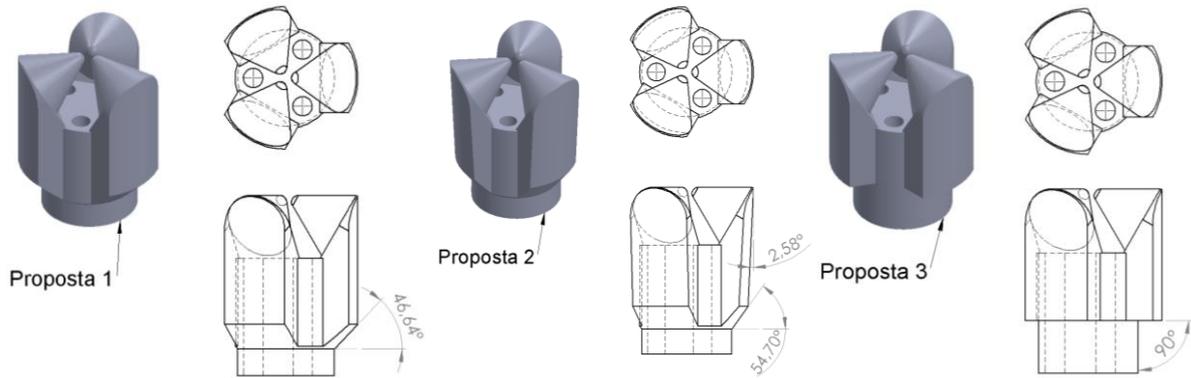


Figura 2.34 – Representação das propostas feitas baseados nas broca tipo Tricônica-IADC 617X.

Como é mostrado na Figura 2.34 tem-se uma variação no ângulo dos perfis das alças da broca (suportes dos cones). Portanto neste caso foi escolhido a proposta 1, já que o fluido escoará de uma maneira mais suave quando for ejetado pelos bocais comparado com a proposta 3. Também foi considerado o espaçamento constante entre a broca e o poço, como uma estratégia para o método de fronteira imersa utilizado e saber o número exato de elementos dado pelo espaçamento e o comprimento do elemento.

A proposta final é apresentada na seguinte figura como um sólido e também colocado no duto de perfuração. Para ver detalhes das medidas ir ao apêndice C códigos de planos BTR-H1 e DBTR-H1 correspondente à Figura 2.35.

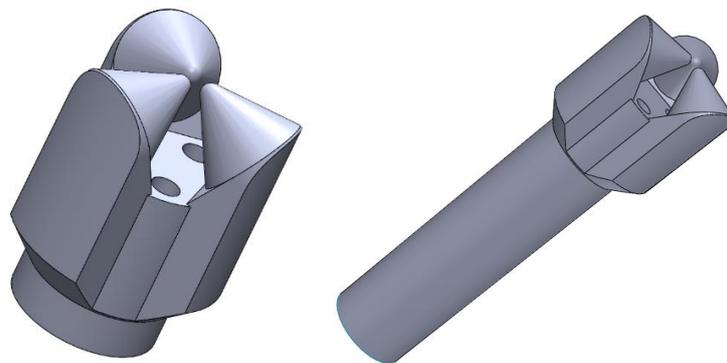


Figura 2.35 – Representação da broca tipo Tricônica e a coluna de perfuração.

Para esta seção, o modelo físico que representa o poço é uma geometria cilíndrica, como foi proposto no caso anterior. A região onde está a broca, tem uma pequena folga entre os cones e o fundo de poço, de uma distância de 20mm. O mesmo comprimento foi considerado entre o diâmetro das alças e as paredes laterais do poço, para evitar problemas de geração de malha e dificuldade na simulação (detalhes de medidas são apresentados no apêndice C, código de plano DBTR_H1).

A continuação é representada a coluna de perfuração e o poço.

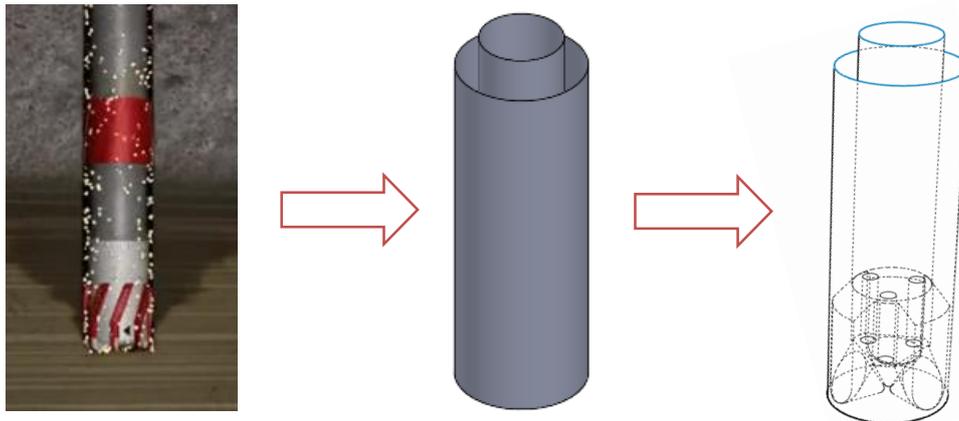


Figura 2.36 – Representação da coluna de perfuração e poço para a broca tipo Tricônica.

Neste caso, será considerado uma distância do bocal com relação ao fundo de poço de 345,91 mm como é mostrado na Figura 2.37.

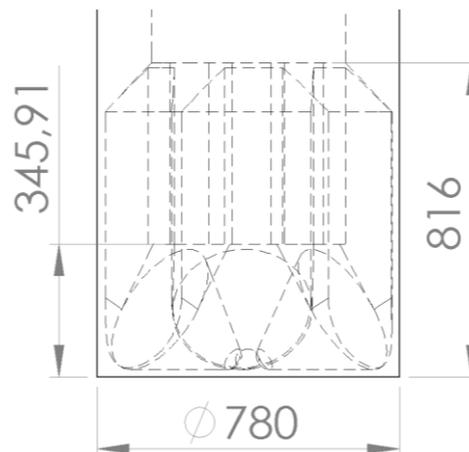


Figura 2.37 – Plano vista frontal da broca tricônica. Todas as medidas estão em milímetros

Esta broca tem por desvantagem ter cones com maior volume (comparado qualitativamente com as aletas da broca tipo PDC) que atrapalham o passo do fluido, no entanto o preço desta broca é mais razoável.

2.9 TURBULÊNCIA

Um fenômeno que acontece na maioria de escoamentos na natureza, com características próprias, considerado também como um sistema dinâmico com suficientes graus de liberdade para ter este regime, desde um ponto de vista mecânico.

Para ter certeza do regime turbulento, tem que apresentar todas as características a seguir:

Apresenta estruturas turbilhonares, que são manifestas como topologias, comprimentos de onda e período muitos diversificados, coexistindo no espaço e tempo, como visto na Figura 2.38.

Pode ser modelada como um fenômeno contínuo, para escoamentos onde o número de Mach não seja superior a 15.

Pode ser considerado como um caos determinístico. É chamado de caos porque em uma pequena variação nas condições iniciais ou de contorno, tem um resultado completamente diferente ao resultado anterior, como acontece quando o modelo é alimentado por informação de sensores que vão ter um grau de inexatidão, porém as equações com as quais se modelam a turbulência são determinísticas, mas suas soluções não são (vão depender das condições iniciais e de fronteira do problema que pelo geral são tomadas de sensores).

Acelera a difusão molecular das informações, já que no aumento do regime turbulento (quantitativamente) será apresentado flutuações cuja magnitude e amplitude, vão depender da intensidade da turbulência, porém tem-se aumentos nos mecanismos de difusão e de transformação viscosa.

Ocorre a altos valores do número de Reynolds, sabendo que este número adimensional no escoamento consiste na relação dos efeitos não lineares advectivos e os efeitos difusivos, e como propriedade do fluido, é a relação entre os efeitos de inércia e os efeitos viscosos. A transição para turbulência só vai acontecer se os efeitos de inércia são mais predominantes que os efeitos viscosos. (SILVEIRA NETO, 2019)

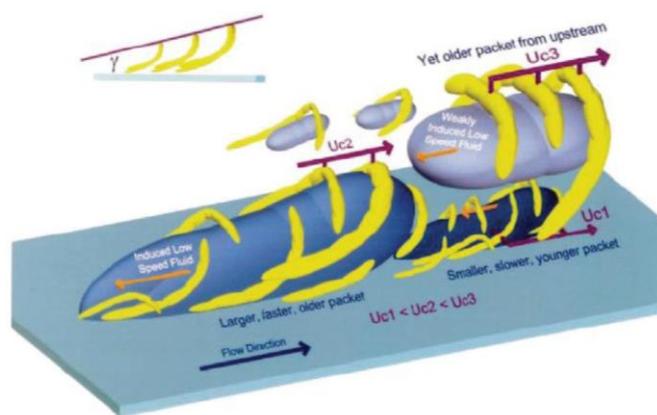


Figura 2.38 – Estruturas coerentes alinhados na direção do escoamento (ADRIAN, MEINHART e TOMKINGS, 2000).

O fenómeno é tridimensional, pela presença de flutuações de vorticidade, que faz possível o estiramento de estruturas turbilhonares.

Finalmente é rotacional e transformativa, já que acelera a transformação viscosa molecular, para um regime turbulento completamente desenvolvido, toda energia injetada no escoamento para alimentar as grandes estruturas turbilhonares é transferida a todas escalas da turbulência. (SILVEIRA NETO, 2019)

Critério Q (*Q-criterion*)

Hunt et al. (1988) identificou estruturas em um escoamento incompressível como regiões de fluido conectada. Abaixo a Eq. (2.4) tem notação tensorial onde a vírgula denota diferenciação.

$$Q = \frac{1}{2}(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = -\frac{1}{2}u_{i,j}u_{j,i} = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) > 0. \quad (2.4)$$

Uma região onde a magnitude da vorticidade (Ω) prevalece sobre a magnitude da taxa de deformação (S) (KOLÁř, 2007).

Intensidade turbulenta

É definido como a razão entre o desvio padrão da velocidade flutuante do escoamento e a velocidade média do escoamento Sciencedirect (2019), mas também pode ser considerando só as flutuações.

2.9.1 Cinemática da turbulência

A turbulência, ao apresentar estruturas turbilhonares compostas por instabilidades, vão afetar diretamente na aquisição de dados, seja espacial ou temporal. Este regime apresenta flutuações para uma média temporal se fixar o espaço, não há dúvida da riqueza de informação, mas esta informação é preciso compará-la com outros dados, e interpretá-la. O primeiro grande passo foi dado por Taylor durante a década de 1930, ao induzir métodos estatísticos formais envolvendo correlações, transformada de Fourier e o espectro de energia.

Osborne Reynolds (1895) propõe o conceito de média temporal das equações de Navier-Stokes para representar o escoamento médio e suas flutuações, onde a velocidade instantânea é a soma da velocidade média e a flutuação da velocidade.

$$u_i = \langle u_i \rangle + u'_i \quad (2.5)$$

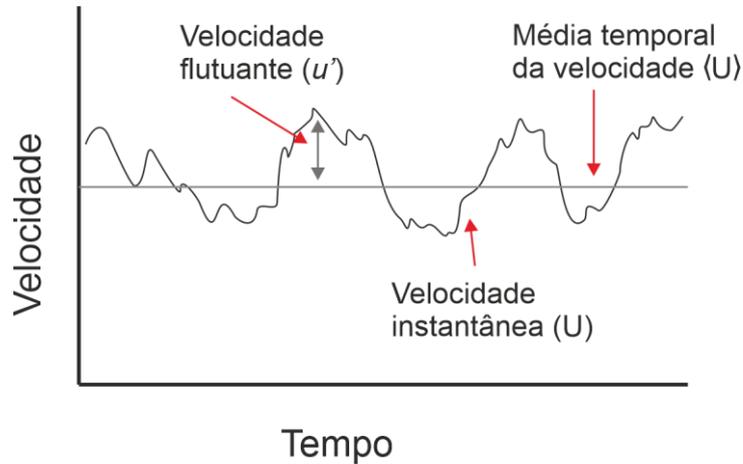


Figura 2.39 – Representação da velocidade instantânea, velocidade média e velocidade flutuante.

2.9.1.1 Hipótese de Kolmogorov

Kolmogorov (1941) postulou hipóteses que são importantes para o tratamento estatístico da turbulência.

Hipótese de equilíbrio

A isotropia do movimento das pequenas escalas, supõe-se a existência de uma potência específica de transformação viscosa $\varepsilon [W/kg]$. Para ter regime permanente estatístico é necessário que toda a energia injetada sobre a banda resolvida, seja transformada pelos efeitos viscosos em energia térmica, na banda sub-malha pelas escalas transformativas.

Hipótese da similaridade.

A estatística do movimento das pequenas escalas, tem uma forma universal, são similares, em todo escoamento turbulento com número alto de Reynolds, estas pequenas escalas são unicamente determinadas pela viscosidade cinemática ν e a potência de transformação viscosa ε , conhecida como escala de transformação viscosa de Kolmogorov.

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}. \quad (2.6)$$

De modo que comprimentos de onda menores que η não podem ser amplificados.

Esta última hipótese também pode-se entender, como o tratamento de turbulência homogênea em todas as direções, para estruturas pequenas, porém, aproxima-se a natureza isotrópica (SILVEIRA NETO, 2019).

2.9.1.2 Espectro de energia cinética turbulenta

A distribuição espectral da energia cinética turbulenta é importante para avaliar os processos de turbulência do escoamento em função dos tamanhos das diferentes estruturas. Na Figura 2.40 aparece o número de onda de corte k_c (também pode ser uma função da frequência de corte f_c), que divide a banda de frequências presentes no sinal filtrado ou banda resolvida, e a banda de frequências sub-malha. A banda de frequências sub-malha deve interagir não linearmente com as grandes estruturas, as quais são determinadas pela solução numérica das equações de Navier-Stokes filtradas.

O espectro de energia mostrado na Figura 2.40 está em função da densidade espectral de energia específica turbulenta $E(k, t)$ e a frequência f que é equivalente ao número de onda k .

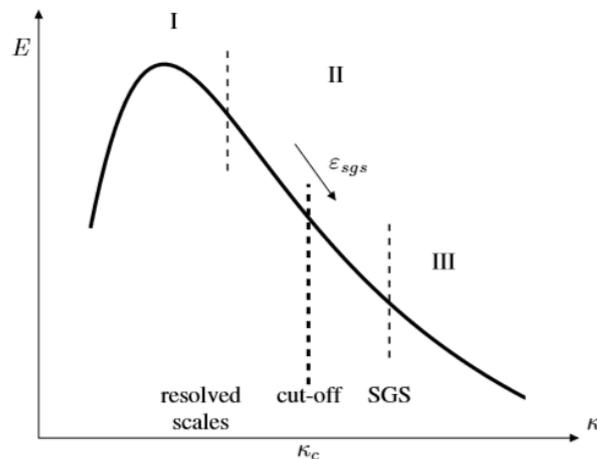


Figura 2.40 – Espectro de energia cinética turbulenta. I Intervalo para grandes escalas, II subintervalo inercial, III Intervalo de pequenas escalas isotrópicas (DAVIDSON, 2017).

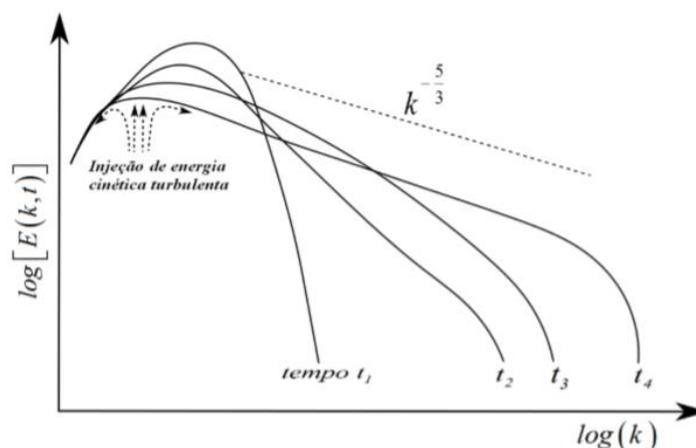


Figura 2.41 – Distribuição de densidade espectral de energia cinética turbulenta (SILVEIRA NETO, 2019)

Para conferir se a turbulência é plenamente desenvolvida segue a lei de Kolmogorov, traduzida por uma inclinação de $-5/3$.

2.10 METODOLOGIAS DE TRATAMENTO DE TURBULÊNCIA

As metodologias fundamentais são RANS/URANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes/ *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*), simulação de grandes escalas (*Large Eddy Simulation*) e simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation*), no entanto para simulação numérica direta, apenas as equações de Navier-Stokes são suficientes para a resolução do escoamento para regimes turbulentos, no entanto, o custo computacional é muito elevado por causa do refinamento de malha.

São utilizados modelos para as metodologias RANS/URANS e LES. Esses modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos, onde foram apresentados segundo as características do problema, tipo de escoamento ou a geometria usada para cada caso.

Da Figura 2.39, pode ser melhorado a forma da apresentação para entender a velocidade instantânea para cada metodologia como mostrado na Figura 2.42.

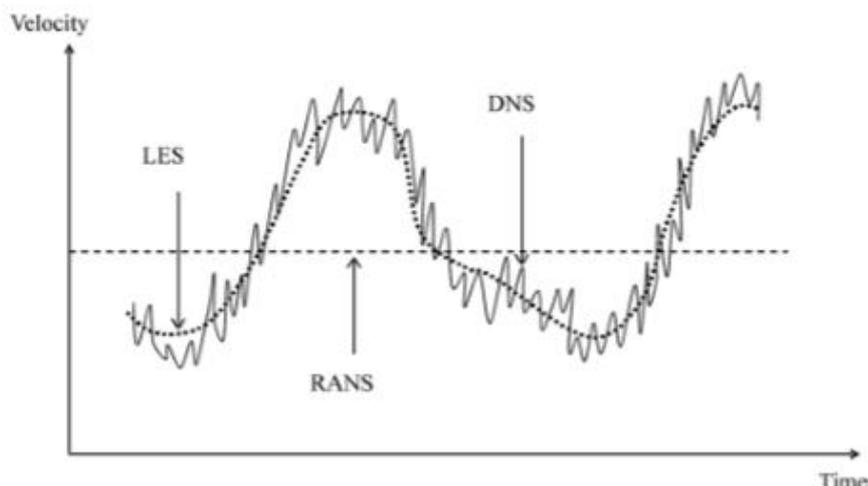


Figura 2.42 – Representação de um ponto para resolver as escalas em um escoamento turbulento estatisticamente permanente (ANDERSSON, ANDERSSON, *et al.*, 2012).

Segundo a Figura 2.42, DNS calcula todas as escalas, LES calcula só as grandes escalas e RANS todas as escalas são modeladas, porém o único comportamento dinâmico que será resolvido é o escoamento médio (ANDERSSON, ANDERSSON, *et al.*, 2012).

I. Metodologia RANS

Tem-se 2 tipos de modelos de fechamento para esta metodologia, modelos que dependem da viscosidade turbulenta (*eddy viscosity model*) e que não dependem da viscosidade turbulenta, modelo do tensor de Reynolds (*Reynolds Stress Model-RSM*).

Como exemplo para o modelo que dependem da viscosidade turbulenta, vários tipos foram desenvolvidos, e depende do comportamento do escoamento e a forma da geometria.

- Modelo da equação Zero, modelo de comprimento de mistura de Prandtl (PRANDTL, 1925), onde a viscosidade turbulenta é calculada através de uma velocidade característica e de um comprimento característico.
- Modelo padrão $k - \varepsilon$;
- Modelo $k - \varepsilon$ - RNG;
- Modelo padrão $k - \omega$;
- Modelo baseado na linha base (BSL) zonal $k - \omega$;
- Modelo baseado no SST zonal $k - \omega$;
- Modelo $(k - \varepsilon)_{1E}$.

Para o modelo do tensor de Reynolds, também chamados modelos algébricos, tem-se o seguinte:

- Tensor de Reynolds LRR;
- Tensor de Reynolds QI;

- Tensor de Reynolds Speziale, Sarkar e Gatski (1985, 1987 e 1991);
- Modelo SMC- ω ;
- Modelo de tensor de Reynolds linha base (BSL).

II. Metodologia URANS

Esta metodologia pode usar todos os modelos da metodologia RANS, com a diferença que considera o termo da taxa de variação contida numa partícula de fluido por ser transiente.

III. Metodologia LES (*Large Eddy Simulation*)

A metodologia LES amplia a utilidade do DNS para aplicações práticas de engenharia, deixando as escalas menores das turbulências não resolvidas. Portanto LES precisa ser em 3D e transitório.

As vantagens da metodologia LES surgem do fato que a banda de escalas de maior comprimento determinado pela frequência de corte ou número de onda de corte que vai depender do passo de tempo ou do tamanho da malha respectivamente, são difíceis de modelar porque são de natureza anisotrópico, portanto são resolvidas diretamente. Em contraste, com as pequenas escalas, uma vez que estão mais próximos da hipótese da similaridade de Kolmogorov, tendem à isotropia e se adaptam rapidamente para manter um equilíbrio energético com a taxa de transferência de energia cinética da banda resolvida para a banda não resolvida e a transformação da energia cinética turbulenta para a energia térmica.

IV. Metodologia DES (*Detached Eddy Simulation*)

A metodologia DES foi proposta pela primeira vez em 1997 e utilizada em 1999. Assim a metodologia DES baseado no modelo Spalart-Allmaras atua como LES com uma função de parede (lei de parede); DES baseado em outros modelos (como o modelo de 2 equações) atua como uma metodologia RANS-LES, onde é baseado na ideia de abranger a camada limite com a metodologia RANS e mudar LES em regiões separadas onde RANS não apresenta nenhuma informação sobre as estruturas do escoamento turbulento e a distribuição espectral.

Na Figura 2.43, mostra um resumo das metodologias mencionadas anteriormente com seus modelo de fechamento. O maior incremento do custo computacional e o nível de resolução é encontrado para a metodologia DNS, pelo contrário menor custo computacional porém menor qualidade de resultados são obtidos pela metodologia RANS.

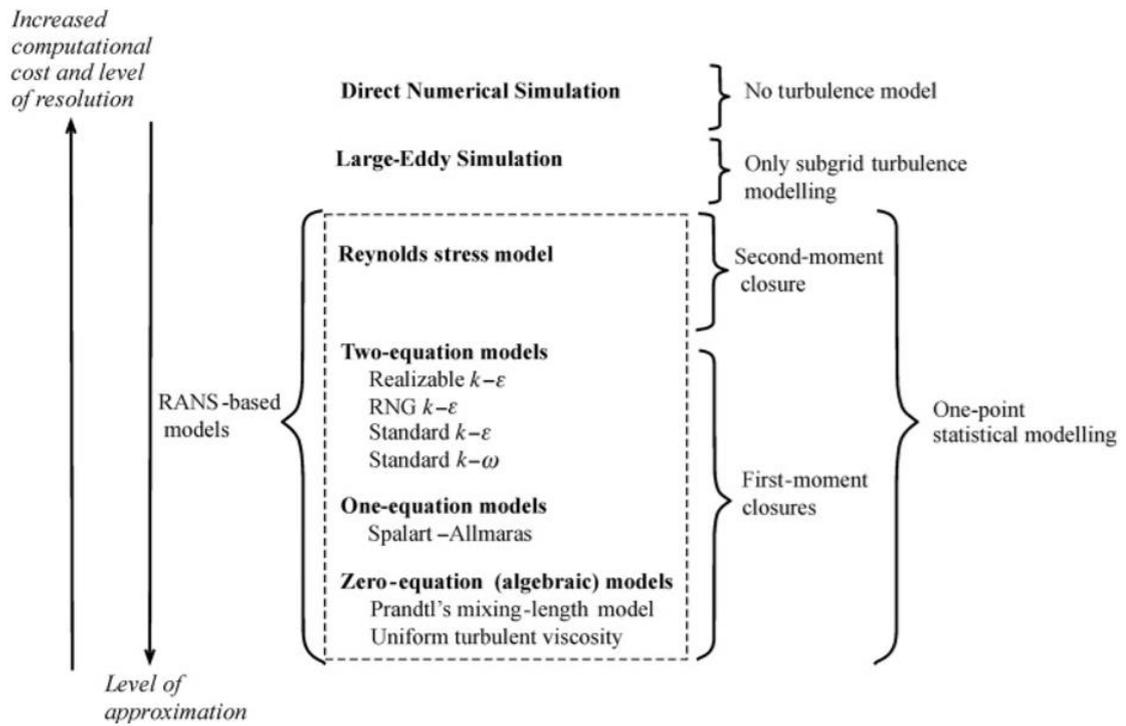


Figura 2.43 – Diagrama que representa alguns modelos de fechamento mencionados anteriormente (ANDERSSON, ANDERSSON, *et al.*, 2012).

CAPÍTULO III

MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 EQUAÇÕES REPRESENTATIVAS

Como modelo matemático para descrever a física do escoamento foram utilizadas as equações de Navier-Stokes e a equação de conservação da massa, considerando características do fluido.

Para o balanço de quantidade de movimento linear, e a equação de conservação da massa, será considerado o escoamento incompressível de massa específica ρ , fluido newtoniano de viscosidade cinemática ν com variação espacial, representado pelas equações:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{f_i}{\rho}, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0. \quad (3.2)$$

As equações (3.1) e (3.2) representam o modelo matemático fundamental para descrever o comportamento do fluido para qualquer número de Reynolds, mas pelo elevado custo computacional que levaria resolver todas as escalas do espectro de energia cinética para o regime turbulento (já que seria necessária uma malha muito refinada) será utilizado a metodologia LES para reduzir este custo.

3.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DAS GRANDES ESCALAS

As equações de Navier-Stokes são suficientes para modelar escoamentos de fluidos newtonianos para os regimes laminar, turbulento e para qualquer número de Reynolds. No entanto o problema reside que Re elevados, mais amplo se torna o espectro de energia associado ao escoamento e altos números de ondas relativos as estruturas de Kolmogorov é evidenciado. Para resolver todas estas escalas é necessário de malha muito mais fina, associado a Simulação Numérica Direta (DNS), porém, a metodologia LES utiliza modelos que representam a influência destas pequenas escalas para as grandes e vice-versa, na forma de transferência de energia cinética, até ser transformada em energia térmica chegando assim na hipótese de equilíbrio (SILVEIRA NETO, 2019).

LES utiliza um operador filtro para separar as grandes e pequenas escalas, o método começa com a seleção de uma função de filtragem e uma frequência ou comprimento de corte, com o objetivo de resolver no cálculo de escoamento instável todas as estruturas com uma frequência ou comprimento maior o de corte. (VESTEEG e MALALASEKERA, 2007, p. 102)

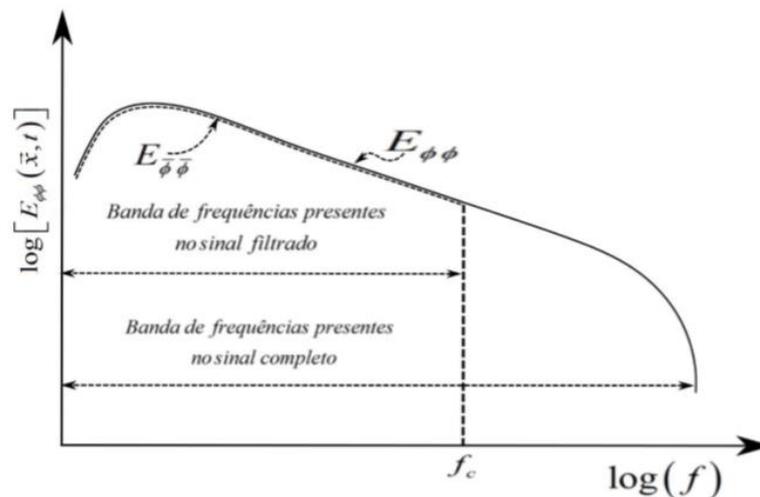


Figura 3.1 – Distribuição da densidade espectral de energia associada à distribuição temporal da informação $\phi(\bar{x}, t)$ (SILVEIRA NETO, 2019).

Como foi mencionado, a banda de frequências sub-malha devem interagir não linearmente com as grandes estruturas, porém estas interações não lineares entre a banda resolvida e a banda não resolvida do espectro, são modeladas utilizando-se um modelo sub-malha de fechamento da turbulência.

3.2.1 Processo de Filtragem

O escoamento turbulento é caracterizado por um amplo espectro de comprimentos e de frequências. Portanto pode se apresentar um filtro temporal e espacial. Para um processo de filtragem temporal, define-se um filtro de uma dada frequência de corte (f_c), em que as frequências menores, utilizará a hipótese de equilíbrio de Kolmogorov, (Figura 3.1). A filtragem espacial é definida de um comprimento de onda, portanto no trabalho é considerado um comprimento característico ds , que é o tamanho de um elemento da malha euleriana, sendo que as escalas menores a estes comprimentos não serão consideradas.

Na simulação de grandes escalas, o campo vectorial ou escalar g é descomposta em uma parte representativa ao campo de grandes escalas \bar{g} , e outra representativa ao campo de sub-malha g' .

$$g = \bar{g} + g' . \quad (3.3)$$

De maneira geral, em um processo de filtragem espacial de um campo randômico $f(\vec{x}, t)$, segundo Leonard (1979) e Germano, Piomelli (*et al.*, 1991) é feita por meio de uma integral de convolução em um volume \forall , com a equação seguinte:

$$\bar{f}(\vec{x}, t) = \int_{\forall} G(\vec{x} - \vec{x}') f(\vec{x}', t) d\vec{x}' , \quad (3.4)$$

onde $G(\vec{r})$ é uma função filtro, sendo $\vec{r} = \vec{x} - \vec{x}'$

Considerando algumas propriedades da decomposição de escalas pelo processo de filtragem tem-se o seguinte:

Uma flutuação filtrada não é nula.

$$g(\vec{x}, t) = \bar{g}(\vec{x}, t) + g'(\vec{x}, t) \rightarrow g'(\vec{x}, t) = g(\vec{x}, t) - \bar{g}(\vec{x}, t) \rightarrow \bar{g}'(\vec{x}, t) = \bar{g}(\vec{x}, t) - \bar{g}(\vec{x}, t) = 0 . \quad (3.5)$$

O produto filtrado de uma variável filtrada por sua flutuação é diferente de zero.

$$\overline{g'g'} \neq \bar{g}\bar{g}' \neq 0. \quad (3.6)$$

O produto de duas variáveis filtradas, filtrado novamente, é diferente do produto das duas variáveis filtradas separadamente.

$$\overline{\bar{g}\bar{g}} \neq \bar{g}\bar{g}. \quad (3.7)$$

Com base no fato de que a turbulência pode ser considerada um fenômeno contínuo, pode ser modelada adequadamente por intermédio das equações de balanço de massa e de quantidade de movimento linear, aplicando-se o processo de filtragem sobre a Eq. (3.1):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\bar{f}_i}{\rho}. \quad (3.8)$$

Utilizando o processo de decomposição das escalas da turbulência dado pela equação ($g + g'$), pode-se representar da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} + \overline{u_i' u_j'} + \overline{u_i' \bar{u}_j} + \overline{\bar{u}_i u_j'})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\bar{f}_i}{\rho}. \quad (3.9)$$

As pequenas escalas, responsáveis pela transformação de energia, são representadas pelo tensor de Reynolds generalizado, dado pela seguinte equação:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j. \quad (3.10)$$

Portanto, o resultado da decomposição o tensor global de Reynolds ou generalizado por ser definida como:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij},$$

$$L_{ij} = \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \rightarrow \text{Tensor de Leonard}$$

$$C_{ij} = \overline{u_i' \bar{u}_j} + \overline{\bar{u}_i u_j'} \rightarrow \text{Tensor Cruzado}$$

$$R_{ij} = \overline{u_i' u_j'} \rightarrow \text{Tensor de Reynolds}$$

Os tensores L_{ij} e C_{ij} podem ser modelados seguindo a ideia de Clark, Ferziger e Reynolds, (1979), eles sugerem expressar a soma destes tensores como uma expressão de Taylor do campo de velocidade filtrado. Shaanam, Ferziger e Reynolds, (1975), estimaram que quando um esquema advectivo de até segunda ordem é utilizado, os tensores cruzado e de Leonard podem ser desprezíveis.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = 0 + 0 + R_{ij} \text{ ou } \tau_{ij} = R_{ij}. \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j + \tau_{ij})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\bar{f}_i}{\rho}. \quad (3.12)$$

Como pode-se observar aparece um tensor adicional $R_{ij} = \overline{u_i' u_j'}$ conhecido como o tensor de Reynolds sub-malha (termo não linear). Boussinesq propôs modelar o tensor de Reynolds (naquela época não existia o tensor de Reynolds sub-malha) com o conceito de viscosidade turbulenta $\nu_t(\vec{x}, t)$, ou seja foi modelado como um termo de natureza difusiva.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (3.13)$$

sendo $k = \frac{1}{2} (\overline{u_i'^2} + \overline{v_i'^2} + \overline{w_i'^2})$, primeiro conceito de energia cinética turbulenta, definido como a metade da soma das média das componentes da velocidade flutuante ao quadrado, portanto a Eq. (3.12) fica da seguinte forma.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\bar{f}_i}{\rho}, \quad (3.14)$$

onde $\bar{p}^* = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$, chamado de pressão modificada.

3.2.2 Modelo Sub-malha Dinâmico

A viscosidade turbulenta tem como base a hipóteses de equilíbrio de Kolmogorov, toda energia (k) injetada sobre a banda de ondas resolvidas, que é transferida para a banda sub-malha; tem que ser transformada pelos efeitos viscosos (de energia cinética turbulenta para energia térmica), portanto a energia injetada é modelada como:

$$\wp^k = \overline{u_i' u_j'} \bar{S}_{ij} = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}. \quad (3.15)$$

A estrutura da turbulência deveria ser isotrópica, se este não for o caso, os gradientes das tensões normais anisotrópicas não deveriam ser dinamicamente ativos (VESTTEG e MALALASEKERA, 2007, p. 102)

Na metodologia LES, as estruturas pequenas são consideradas isotrópicas pela hipótese de similaridade, só as estruturas grandes são anisotrópicas por que dependem da geometria do domínio, portanto tem que ser calculadas.

Smagorinsky (1963) sugeriu que, como as escalas mais pequenas são quase isotrópicas, espera-se que a hipótese de Boussinesq possa ter uma boa descrição dos efeitos das escalas não resolvidas no escoamento.

Para conseguir o coeficiente de proporcionalidade, aplica-se um novo filtro (filtro teste) \hat{g} na Eq. (3.8), de largura $\hat{\Delta} > \bar{\Delta}$, onde $\hat{\Delta} = 2\bar{\Delta}$, tem sido usado pela comunidade como resultado de empirismo numérico.

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{u}_i \hat{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\hat{f}_i}{\rho}. \quad (3.16)$$

Define-se o tensor teste:

$$T_{ij} = \overline{\hat{u}_i \hat{u}_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j. \quad (3.17)$$

Portanto a Eq. (3.16) pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{u}_i \hat{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) - T_{ij} \right] + \frac{\hat{f}_i}{\rho}. \quad (3.18)$$

Aplicando a filtragem teste na Eq. (3.12) tem-se o seguinte:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{u}_i \hat{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) - \hat{\tau}_{ij} \right] + \frac{\hat{f}_i}{\rho}. \quad (3.19)$$

Subtraindo-se da Eq. (3.19) a Eq. (3.18)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij} - \hat{\tau}_{ij}). \quad (3.20)$$

Portanto define-se o tensor de Leonard global a partir da Eq. (3.20):

$$L_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \hat{u}_i \hat{u}_j = T_{ij} - \hat{\tau}_{ij}. \quad (3.21)$$

Relacionando as partes anisotrópicas dos tensores envolvidos:

$$L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{ij} = \left(T_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} T_{ij} \right) - \left(\hat{\tau}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \hat{\tau}_{ij} \right). \quad (3.22)$$

A equação (3.22) é conhecida como a identidade de Germano, e é usada para determinação da função coeficiente $C(\vec{x}, t)$. A parte anisotrópica do tensor de Reynolds global sub-malha com o segundo filtro pode ser modelada com a hipótese de Boussinesq.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{ij} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = -2\nu_t \bar{S}_{ij} = -2C(\vec{x}, t) (\bar{\Delta})^2 \|\bar{S}_{ij}\| \bar{S}_{ij}. \quad (3.23)$$

Aplicando o filtro teste na Eq. (3.23) para ter os mesmos termos da equação (3.22).

$$\hat{\tau}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \hat{\tau}_{ij} = -2\nu_t \hat{S}_{ij} = -2C(\vec{x}, t) (\bar{\Delta})^2 \|\widehat{\bar{S}_{ij}}\| \widehat{\bar{S}_{ij}}. \quad (3.24)$$

De forma análoga para o tensor teste.

$$T_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} T_{ij} = -2C(\vec{x}, t) (\Delta)^2 \|\hat{S}_{ij}\| \hat{S}_{ij}. \quad (3.25)$$

Subtraindo-se as Eqs. (3.24) e (3.25) e substituindo na Eq. (3.22) tem-se o seguinte:

$$L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{ij} = -2C(\vec{x}, t) \left[(\Delta)^2 \|\hat{S}_{ij}\| \hat{S}_{ij} - (\bar{\Delta})^2 \|\widehat{\bar{S}_{ij}}\| \widehat{\bar{S}_{ij}} \right]. \quad (3.26)$$

A Eq. (3.26) é uma equação tensorial, composta por tensores simétricos e com traços nulos. Lilly (1992) propôs determinar a função $C(\vec{x}, t)$ utilizando o método dos mínimos quadrados que possibilita determinar o erro decorrente do ajuste.

$$C(\vec{x}, t) = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}}, \quad (3.27)$$

O coeficiente de proporcionalidade passa a ser calculado em função do tempo e do espaço, onde:

$$L_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \widehat{u}_i \widehat{u}_j. \quad (3.28)$$

$$M_{ij} = (\Delta)^2 \left| \widehat{S} \right| \widehat{S}_{ij} - (\bar{\Delta})^2 \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij}. \quad (3.29)$$

Portanto a viscosidade turbulenta é avaliada como:

$$\nu_t = C(\vec{x}, t) \bar{\Delta}^2 \left| \bar{S} \right|. \quad (3.30)$$

3.3 MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA

O método de fronteira imersa (MFI) permite a representação de geometrias simples ou complexas com ajuda de um domínio lagrangiano, representado por uma malha que delimita a geometria ou corpo imerso em um escoamento resolvido, usando malha estruturada e denominado de domínio euleriano (VANELLA e BALARAS, 2009).

Com este método são impostas condições virtuais representadas por um campo de força. Como pode ser observado na Figura 3.2 os pontos lagrangianos são representados pelos pontos pretos e o centro dos volumes eulerianos pelos pontos de cor azul. Um ponto lagrangiano é acompanhado pelos nós da malha euleriana formando uma vizinhança.

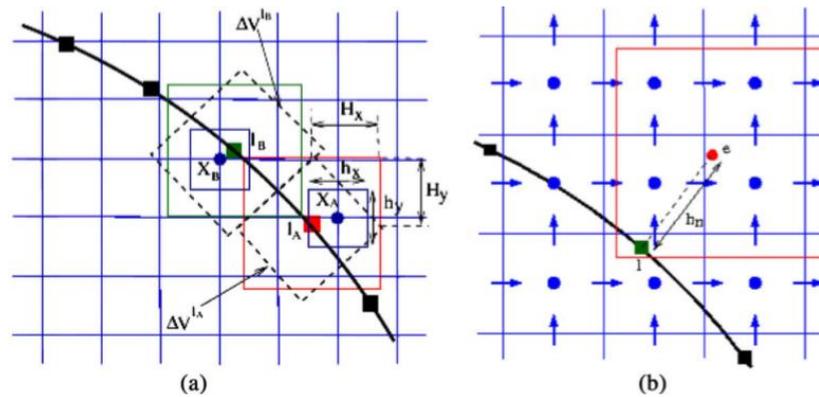


Figura 3.2 – Representação da malha lagrangiana e a malha euleriana (VANELLA e BALARAS, 2009).

Baseado na representação de interfaces fluido-estrutura, este método pode ser classificado segundo os métodos de interface difusa e métodos de interface nítidos.

Dentro do método de interface difusa (*Diffused interface Method*), tem-se o tipo Método de força direta FI (Fronteira Imersa) ou na siglas em inglês (*Direct forcing IB method*) segundo a Figura 3.3 (SOTIROPOULOS e YANG, 2014)

Métodos de fronteira imersa	Método de Interface difusa	Metodo clássico Fronteira Imersa Método de Forzagem direta Fronteira Imersa Método de Penalização
	Método de interface nítida	Método de células cortadas Método de Interface Imersa Método de Fronteira Imersa cartersiana híbrida Método fronteira imersa curvilíneo

Figura 3.3 – Diagrama adaptado para explicar os tipos de Métodos de fronteira Imersa (SOTIROPOULOS e YANG, 2014).

Na seguinte figura é apresentada uma representação do problema a resolver, o domínio lagrangiano, composto pela coluna de perfuração (duto, broca) e o poço, que é definido com a malha de cor vermelha, o domínio euleriano, representado pela malha de cor preta.

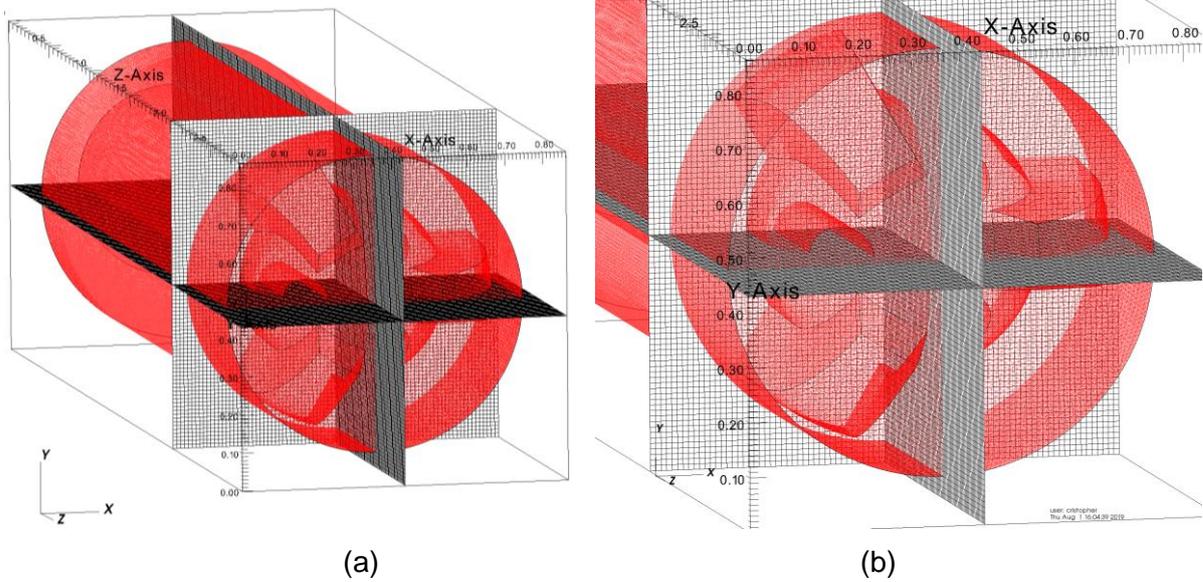


Figura 3.4 – Representação da malha lagrangiana e a malha euleriana nas cores vermelho e preto, respectivamente. (a) vista isométrica (b) vista de aproximação.

A base do método são as equações de Navier-Stokes filtradas, onde é inserido um termo de força f_i , que apresentado na Eq. (3.14).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\bar{f}_i}{\rho} \quad (3.31)$$

Sendo o termo f_i responsável por representar a interface no domínio euleriano e lagrangiano.

CAPÍTULO IV

MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica compreende o uso de métodos numéricos para resolver as equações propostas no modelo matemático diferencial, obviamente equações que não tem solução exata. A escolha do método numérico adequado deve ser realizado, cujo método apresente um menor custo computacional, consistente, simplificado dentro do possível e robusto. As técnicas de discretização existentes são apresentadas na Fig. 4.1.

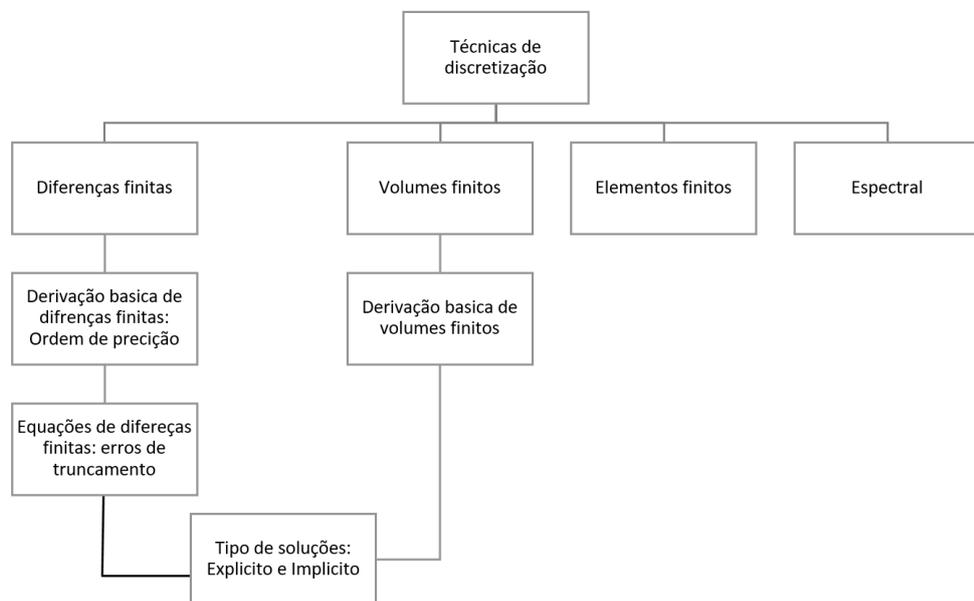


Figura 4.1 – Técnicas de discretização. Modificação baseado na referência (ANDERSON, 1995).

Foi utilizada uma plataforma numérica em desenvolvimento para a resolução das equações descritas na modelagem numérica, estas equações foram discretizadas utilizando o método de volumes finitos (MVF), considerando o conceito de malha deslocada, onde as

variáveis de velocidades estão nas faces e a variável de pressão no centro do volume de controle (PATANKAR, 1980).

O princípio do método de volumes finitos é o balanço local. O domínio é dividido em pequenos volumes chamados células onde é integrado espacial e temporalmente as equações diferenciais.

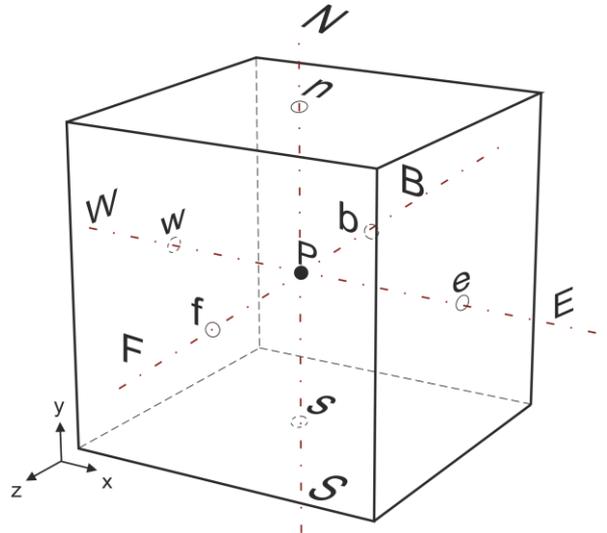


Figura 4.2 – Características geométricas no volume ou célula.

Para utilizar o método de volumes finitos, as equações devem estar escritas na forma diferencial, depois de integrar as equações de movimento ao redor do volume de controle (domínio de análise) tem se o seguinte.

$$\int_{\forall} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} d\forall + \int_{\forall} \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} d\forall = - \int_{\forall} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} d\forall + \int_{\forall} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] d\forall + \int_{\forall} \frac{\bar{f}_i}{\rho} d\forall, \quad (4.1)$$

1

2

3

4

5

sendo:

1. Taxa de variação de quantidade de movimento linear em uma partícula de fluido;
2. Fluxo líquido de quantidade de movimento linear por advecção (A_i);
3. Gradiente de Pressão modificada (P_i);
4. Fluxo líquido da quantidade de movimento linear por difusão (D_i);
5. Termo fonte representada pela força (f_i).

4.1 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

Um esquema de diferenças centradas para os termos 2, 3 e 4 na Eq. (4.1) representando de forma numérica a integração no volume diferencial daqueles termos é empregado.

Para simplificar o seguimento da discretização, será utilizado as letras em maiúscula que representam cada termo na Eq. (4.1).

Ao discretizar os termos das equações de Navier-Stokes não será utilizado o símbolo de filtragem, e o tamanho de um elemento de malha será utilizado como filtrado espacial e o passo de tempo como filtrado temporal.

$$\int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial u_i}{\partial t} dx dy dz = \int_b^f \int_s^n \int_w^e (-A_i + D_i - P_i + f_i) dx dy dz, \quad (4.2)$$

onde:

O termo advectivo

$$A_i = \int_b^f \int_s^n \int_w^e \left[\frac{\partial uu_i}{\partial x} + \frac{\partial vu_i}{\partial y} + \frac{\partial wu_i}{\partial z} \right] dx dy dz. \quad (4.3)$$

$$A_i = [(uu_i)_e - (uu_i)_w] \cdot \Delta y \Delta z + [(vu_i)_n - (vu_i)_s] \cdot \Delta z \cdot \Delta x + [(wu_i)_f - (wu_i)_b] \cdot \Delta x \cdot \Delta y. \quad (4.4)$$

O termo difusivo

$$D_i = \int_b^f \int_s^n \int_w^e \left[\frac{\partial}{\partial x} \left((v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \right] dx dy dz. \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
D_i = (v + v_t) \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)_w \right] \cdot \Delta y \Delta z \right. \\
+ \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\partial u_i}{\partial y} \right)_s + \left(\frac{\partial v_i}{\partial x} \right)_n - \left(\frac{\partial v_i}{\partial x} \right)_s \right] \cdot \Delta x \cdot \Delta z \\
\left. + \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_f - \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_b + \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} \right)_f - \left(\frac{\partial w_i}{\partial x} \right)_b \right] \cdot \Delta x \cdot \Delta y \right\}.
\end{aligned} \quad (4.6)$$

As derivadas na interface do volume de controle são aproximadas por diferenças centradas, como exemplo, a derivada da componente u_i para a face w pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)_w = \frac{u_{iP} - u_{iW}}{\Delta x_{iw}}. \quad (4.7)$$

O termo da pressão também é integrado

$$P_i = \frac{1}{\rho} \int_{\forall} \frac{\partial p}{\partial x_i} d\forall. \quad (4.8)$$

Finalmente o termo da força é dado pela seguinte integral $f_i = \int_{\forall} f_{iex} d\forall$, onde f_{iex} representa todas as forças externas, nas direção i , por unidade de volume.

4.2 DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL

Do mesmo jeito que a discretização espacial, para a discretização temporal é feita no domínio do volume diferencial através do tempo.

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial u_i}{\partial t} dt = \int_t^{t+\Delta t} (-A_i + D_i - P_i + f_i) dt, \quad (4.9)$$

É aplicado o método de segunda ordem explícito de Adams-Bashforth Lilly (1992) para a discretização temporal. Os termos do tempo anterior são avaliados, assim dessa maneira

tem uma forma explícita de resolvê-lo, evitando a solução de um sistema de equações o que ocorreria se fosse trabalhado de forma implícita.

$$\frac{u_i^{t+1} - u_i^t}{\Delta t} = \frac{3}{2}(-A_i + D_i)^t - \frac{1}{2}(-A_i + D_i)^{t-1} - P_i^{t+1} + f_i^{t+1}. \quad (4.10)$$

4.2.1 Acoplamento de pressão-velocidade

Segundo Ferziger e Perić (2002), a pressão foi usada para o cálculo do campo de velocidade na primeira etapa do método, na segunda etapa a pressão é tratada de maneira explícita.

Como pode-se observar as 3 componentes da velocidades (para um sistema de coordenadas cartesiano) aparecem nas 3 equações do momentum, o problema mais complexo é resolver a pressão já que não tem uma equação. Portanto se aplicasse o campo de pressão correto nas equações do momentum, o campo de velocidades resultante deve satisfazer a equação de continuidade. (VESTTEG e MALALASEKERA, 2007, p. 180).

Na atualidade há diversos métodos ou algoritmos de solução para o acoplamento da pressão-velocidade, como por exemplo: método SIMPLE, método SIMPLER, método SIMPLEC, método de Passos Fracionados, sendo neste trabalho empregado o último método mencionado.

Método de Passos Fracionados

Desenvolvido por Kim e Moin (1985), este algoritmo é composto por dois passos: o passo preditor, onde a velocidade é estimada; e o passo corretor, onde a velocidade é corrigida a partir da flutuação da pressão.

$$\frac{u_i^{t+1} + u_i^* - u_i^* - u_i^t}{\Delta t} = \frac{3}{2}(-A_i + D_i)^t - \frac{1}{2}(-A_i + D_i)^{t-1} - P_i^{t+1} + f_i, \quad (4.11)$$

onde a pressão de flutuação é considerado como $P_i' = P_i^{t+1} - P_i^t$

Decompondo a resolução da equação parcial em duas etapas através da inclusão da variável u_i^* , tem-se o passo preditor e corretor respectivamente:

$$\frac{u_i^* - u_i^t}{\Delta t} = \frac{3}{2}(-A_i + D_i)^t - \frac{1}{2}(-A_i + D_i)^{t-1} - P_i^t + f_i. \quad (4.12)$$

$$\frac{u_i^{t+1} - u_i^*}{\Delta t} = -P_i'. \quad (4.13)$$

Também P_i' representa o gradiente do campo de correção da pressão p' . No passo preditor se estima o valor do campo de velocidade u_i^* na Eq. (4.12); no passo corretor, u_i^{t+1} e P_i' são corrigidos pela aplicação de uma projeção aproximada de \tilde{u}_i .

Derivando o passo corretor.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{u_i^{t+1} - u_i^*}{\Delta t} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_i'}{\partial x_i} \right). \quad (4.14)$$

Colocando em função da correção da pressão, pode ser escrita como:

$$\frac{1}{\Delta t} \left[\frac{\partial u_i^{t+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p'}{\partial x_i} \right). \quad (4.15)$$

Por conservação de massa $\frac{\partial u_i^{t+1}}{\partial x_i} = 0$

$$\frac{1}{\Delta t} \left[\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} \right] = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p'}{\partial x_i} \right). \quad (4.16)$$

O p' é calculado através da equação de Poisson e o sistema de equações derivado da Eq. (4.16) é resolvido utilizando uma biblioteca externa denominada Trilinos (TRILINOS, 2019), parte do processo de desenvolvimento da plataforma numérica (LOURENÇO, 2012)

4.3 MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA

É analisado o problema considerando um corpo imerso no fluido. As forças presentes como gravidade, eletromagnéticas, ou qualquer força externa, nos volumes eulerianos onde tem-se pontos lagrangianos representando o corpo imerso, apresentando força diferente de zero neste e em volumes adjacentes (ENRIQUEZ-REMIGIO, 2007)

Na plataforma numérica usa o método de mínimos quadrados móveis (MLS) para o cálculo da força nos pontos lagrangianos e depois é distribuído para os pontos eulerianos.

Iniciando com as equações de Navier-Stokes filtradas.

$$\frac{\partial \bar{u}_l}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\bar{f}_l}{\rho}. \quad (4.17)$$

Coloca-se em evidência o termo da força, no campo euleriano.

$$\frac{\bar{f}_l}{\rho} = \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]. \quad (4.18)$$

Agora, pode-se definir a força lagrangiana

$$\frac{F_i(\vec{x}_k, t)}{\rho} = \frac{\partial \bar{u}_{ki}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_{ki} \bar{u}_{kj})}{\partial x_{kj}} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}^*_k}{\partial x_{ki}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_{kj}} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_{ki}}{\partial x_{kj}} + \frac{\partial \bar{u}_{kj}}{\partial x_{ki}} \right) \right], \quad (4.19)$$

cujas variáveis com índice k, representam o domínio lagrangiano. Discretizando a derivada temporal através do Euler explícito:

$$\frac{F_i(\vec{x}_k, t)}{\rho} = \frac{u_{ki}^{t+\Delta t} - u_{ki}^t}{\Delta t} + RHS_i^t, \quad (4.20)$$

onde RHS_i^t representa os termos advectivo e difusivo no domínio lagrangiano. Como parte do método de cálculo do passo fracionado deve-se somar e subtrair um parâmetro temporário u_{ki}^* , obtendo seguinte forma:

$$\frac{u_{ki}^* - u_{ki}^t}{\Delta t} + RHS_i^t = 0. \quad (4.21)$$

$$\frac{F_i(\vec{x}_{ki}, t)}{\rho} = \frac{u_{ki}^{t+\Delta t} - u_{ki}^*}{\Delta t}. \quad (4.22)$$

Analogamente para o cálculo da força no domínio euleriano, também será usado o rhs_i^t em minúsculo, tem-se o seguinte:

$$\frac{u_i^* - u_i^t}{\Delta t} + rhs_i^t = 0. \quad (4.23)$$

$$\frac{f_i(\vec{x}_i, t)}{\rho} = \frac{u_i^{t+\Delta t} - u_i^*}{\Delta t}. \quad (4.24)$$

A Eq. (4.22) está definida no domínio lagrangiano, porém ela é resolvida no domínio euleriano. Colocando em evidência o termo u_i^* na Eq. (4.23) e utilizando a sigla rhs_i^t

$$u_i^* = u_i^t + \Delta t(rhs_i^t). \quad (4.25)$$

Para o cálculo da força lagrangiana é preciso ter o cálculo de u_{ki}^* , que vem da transferência de informação de u_i^* , do domínio euleriano para o lagrangiano. Porém é utilizada a seguinte equação para o cálculo da velocidade no ponto lagrangiano, através de pontos eulerianos.

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ik}(\mathbf{x}_k) = \sum p_j(\mathbf{x}_k) a_j(\mathbf{x}_k) = \mathbf{P}^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{a}(\mathbf{x}_k). \quad (4.26)$$

É usado “~” porque o valor de cálculo será feito através de velocidades aproximadas do domínio euleriano, portanto é um campo de velocidade aproximado no ponto lagrangiano.

Tem-se as coordenadas do ponto lagrangiano, \mathbf{x}_k , o vetor de coeficientes $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k)$, o vetor de funções de base $\mathbf{p}(\mathbf{x}_k)$ (VANELLA e BALARAS, 2009).

Para o cálculo do vetor de coeficientes, precisamos que exista um a função peso $W(\mathbf{x}_k - \mathbf{x})$, e essa última função existe se o funcional de resíduos ponderados J é construído com:

$$J = \sum_{k=1}^{np} W(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}) [\mathbf{P}^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{a}(\mathbf{x}_k) - \tilde{\mathbf{u}}_i]^2. \quad (4.27)$$

Para que o resíduo ponderado J seja minimizado por $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k)$ para qualquer ponto arbitrário \mathbf{x} , tem que cumprir que $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{a}}$. Porém depois de uma serie de cálculos tem-se o seguinte:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_k)\mathbf{a}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{B}(\mathbf{x}_k)\tilde{\mathbf{u}}_i. \quad (4.28)$$

Onde $\mathbf{A}(\mathbf{x}_k)$ é a matriz de momentos. Esta matriz vai passar para o membro do lado direito como matriz transposta, colocando em evidência o termo $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k)$. Depois substituindo a equação resultante na Eq. (4.26), obtém-se o seguinte:

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ik}(\mathbf{x}_k) = \sum_I^n \sum_{j=1}^m p_j(\mathbf{x}_k) [\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_k)\mathbf{B}(\mathbf{x}_k)]_{jI} \tilde{\mathbf{u}}_i, \quad (4.29)$$

onde

$$\phi_I(\mathbf{x}_k) = \sum_{j=1}^m p_j(\mathbf{x}_k) [\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}_k)\mathbf{B}(\mathbf{x}_k)]_{jI} = \mathbf{P}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}_I. \quad (4.30)$$

É visto que aparecem a função $\phi(\mathbf{x}_k)$ que depende da matriz de momento transposto $\mathbf{A}(\mathbf{x}_k)$, e a matriz $\mathbf{B}(\mathbf{x}_k)$. Essas últimas matrizes dependem da função peso $W(\mathbf{x}_k - \mathbf{x})$ e o vetor de funções peso \mathbf{P} .

A função peso atua similar a uma função distribuição, que em este caso será usado a função *splines* cúbica.

$$w_g(r) = \begin{cases} 2/3 - 4\bar{r}_k^2 + 4\bar{r}_k^3, & \text{se } \bar{r}_k < 0,5 \\ 4/3 - 4\bar{r}_k + 4\bar{r}_k^2 - 4/3\bar{r}_k^3, & \text{se } 0,5 \leq \bar{r}_k \leq 1, \\ 0, & \text{se } \bar{r}_k > 1 \end{cases} \quad (4.31)$$

onde $r = \frac{\tilde{x}_k - \tilde{x}_i}{h}$, sendo h o espaçamento do domínio euleriano (LOURENÇO, 2012).

Finalmente é calculada uma relação entre a força sentida pelos pontos lagrangianos substituindo a Eq. (4.29) na Eq. (4.22) com alterações feitas. Para impor a contribuição das forças lagrangiana nodais na malha euleriana, são utilizadas as mesmas funções, mas tem que ser ponderados por um fator e_f que é a relação entre o volume lagrangiano e o volume euleriano. Finalmente é atualizada a componente da velocidade estimada, influenciado pelo corpo imerso com o valor do campo calculado baseado no campo aproximado da velocidade nos pontos lagrangianos.

$$u_i^* = \tilde{u}_i + f_i \frac{\Delta t}{\rho}. \quad (4.32)$$

O campo corrigido:

$$u_i^{t+1} = u_i^* - \Delta t \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x_i} \right). \quad (4.33)$$

4.4 PASSO DE TEMPO AUTOMÁTICO

Foi adotado o critério CFL definido por Courant, Friedrichs e Lewy (1967), que relaciona o passo de tempo em função da velocidade e do comprimento característico de uma célula da malha, ou seja calcula o intervalo temporal necessário para que uma onda com determinada velocidade cruze as células da malha (LOURENÇO, 2012).

Assim, controlar adequadamente o passo de tempo garantirá a melhor relação entre custo computacional e convergência dos resultados. No critério de estabilidade CFL o passo de tempo automático resulta na Eq. (4.34):

$$\Delta t_{\text{automático}} = \frac{1}{\frac{1}{\Delta t_{\text{advectivo}}} + \frac{1}{\Delta t_{\text{difusivo}}}}, \quad (4.34)$$

$$\Delta t_{\text{advectivo}} = \frac{1}{\frac{\bar{u}}{\Delta x} + \frac{\bar{v}}{\Delta y} + \frac{\bar{w}}{\Delta z}}, \quad (4.35)$$

$$\Delta t_{\text{difusivo}} = \frac{1}{2(\nu_t + \nu) \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right]}. \quad (4.36)$$

Na Eq. (4.36) considera-se a viscosidade turbulenta e a viscosidade cinemática molecular.

A priori, calcula-se para cada volume de controle o $\Delta t_{\text{automático}}$, os valores obtidos são comparados e o menor valor é retirado. Este valor é novamente comparado, mas agora com

um passo de tempo inicialmente estabelecido ($\Delta t_{inicial}$), resguardando o menor valor obtido entre eles. Desta forma, prevê-se o melhor passo de tempo durante a simulação numérica. Porém, a prática mostra que o uso exclusivo do critério CFL, nem sempre garante a estabilidade da simulação. Assim, utilizou-se no presente trabalho um fator de segurança (FS) multiplicado pelo novo passo de tempo encontrado, como segue:

$$\Delta t_{final} = \Delta t_{automático} \cdot FS. \quad (4.37)$$

Para o caso de validação com o domino de contração abrupta foi utilizado um fator de segurança de 0,4 e para os casos com a broca de perfuração foi utilizado um fator de segurança de 0,85.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Verificação

O processo de verificação consiste em realizar testes com a finalidade de detectar a presença de erros associados aos métodos numéricos usados, assim como os erros de implementação, a partir de equações manufaturadas. Dois problemas foram usados: uma para a solução da equação de Poisson e outra para a solução das equações de Navier-Stokes.

Para a equação de Poisson foi utilizada a Eq. (5.1) com condição de contorno de derivada imposta (Neumann), nas seis faces do domínio cúbico.

$$\phi(x, y, z) = \cos(2\pi x) \cdot \cos(2\pi y) \cdot \cos(2\pi z). \quad (5.1)$$

Os erros obtidos com base na norma L2, para modos sequencial e paralelo, foram da ordem de e-02 com malha 8x8x8 e e-03 com malha 64x64x64.

Para as equações de Navier-Stokes foram utilizadas as seguintes expressões (5.2), (5.3), (5.4), (5.5) para a variação transiente das componentes da velocidade e de pressão. Nas condições de contorno foram impostas condições de Dirichlet para as velocidades e também para a correção de pressão.

$$p(x, y, z, t) = \cos(t + 2\pi(x + y + z)), \quad (5.2)$$

$$u(x, y, z, t) = \sin(t + 2\pi(x + y + z))^2, \quad (5.3)$$

$$v(x, y, z, t) = \cos(t + 2\pi(x + y + z))^2, \quad (5.4)$$

$$w(x, y, z, t) = 1.0. \quad (5.5)$$

Os erros obtidos segundo a norma L2 foram da ordem de e-06 e e-08 para os campos de velocidade (LOURENÇO, 2012).

Validação

O processo de validação foi realizado usando o problema de contração abrupta, onde a configuração geométrica é composta de dois dutos cilíndricos de diâmetros diferentes. A Figura 5.1 mostra o esquema geométrico que representa o domínio de interesse. Como é observado, os diâmetros maior e menor são representados pelas letras D e d, respectivamente, a divisão destas dimensões é a razão da contração mencionado na seção (2.3), resultando $\beta = 1,97$. O primeiro trecho tem comprimento de 400 mm e o segundo 300 mm (PUELLES, BORGES, *et al.*, 2018).

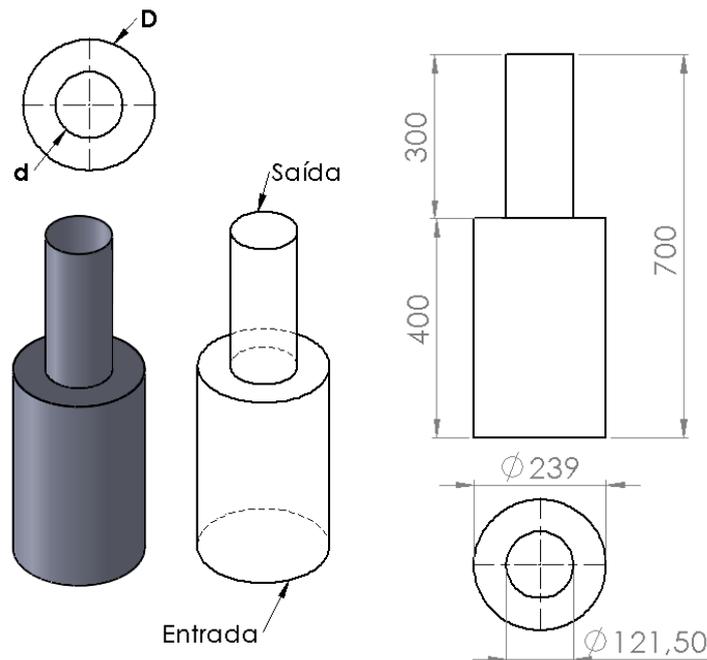


Figura 5.1 – Plano do domínio lagrangiano, medidas em milímetros.

A malha foi elaborada no Blender (versão 2.69), baseado na geometria da Figura 5.1. Os elementos são triangulares, Figura 5.2, com lados de $0,0025m = 2,5mm$.

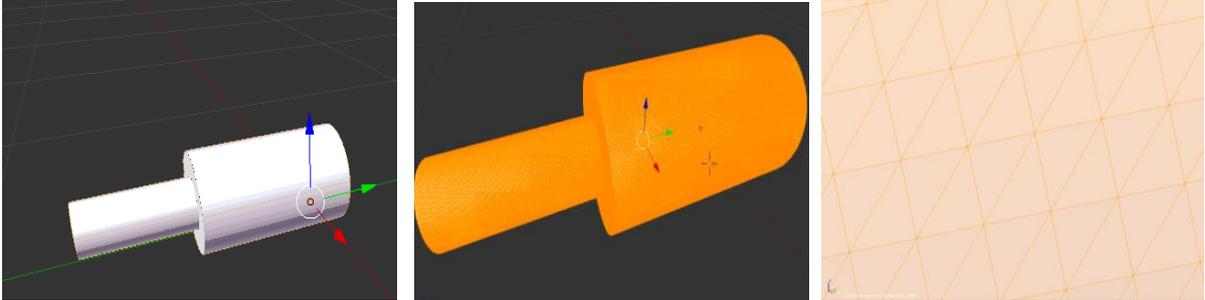


Figura 5.2 – Malha lagrangiana feita no Blender 2.69 com razão de contração de 1,967.

As condições de contorno são:

- Na entrada: perfil de velocidades do escoamento no regime laminar desenvolvido, em função do raio, definido pela seguinte equação:

$$w(r) = W_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^2 \right]. \quad (5.6)$$

- Na saída: está dado pela condição de derivada nula.

$$\frac{\partial w(r)}{\partial z} = 0. \quad (5.7)$$

- Resto do domínio: é dado pela condição de parede para o caso sem rotação.

$$u=v=w=0. \quad (5.8)$$

O número de Reynolds tem o valor de 365, baseado no diâmetro de entrada do domínio. A massa específica do fluido é de $1kg/m^3$.

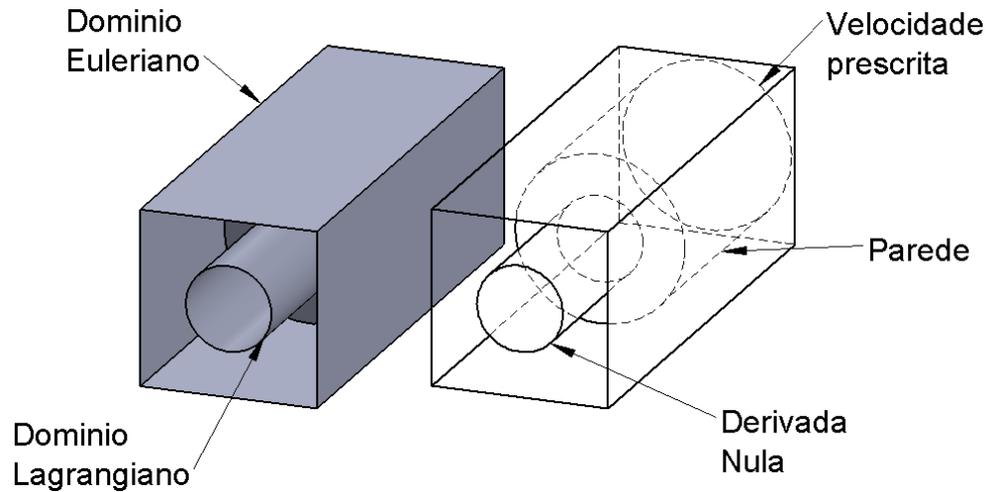


Figura 5.3 – Representação dos domínios euleriano e lagrangiano, e condições de contorno.

O domínio euleriano tem por medidas, na direção X, Y e Z: 0,25m; 0,25m; 0,7m, respectivamente. Quatro densidades de malha euleriana são usadas para determinar a independência de malha, com dimensões do volume elementar dx, dy e dz mostradas na Tabela 5.2. A malha lagrangiana usa elementos triangulares de lado $ds= 0,0025m$.

Tabela 5.1 – Divisão de malha euleriana.

	X	Y	Z			
Comprimento (m)	0,25	0,25	0,7	dx (m)	dy (m)	dz (m)
N° volumes M1	60	60	168	0,00417	0,00417	0,00417
N° volumes M2	70	70	196	0,00357	0,00357	0,00357
N° volumes M3	80	80	224	0,00313	0,00313	0,00313
N° volumes M4	90	90	252	0,00278	0,00278	0,00278

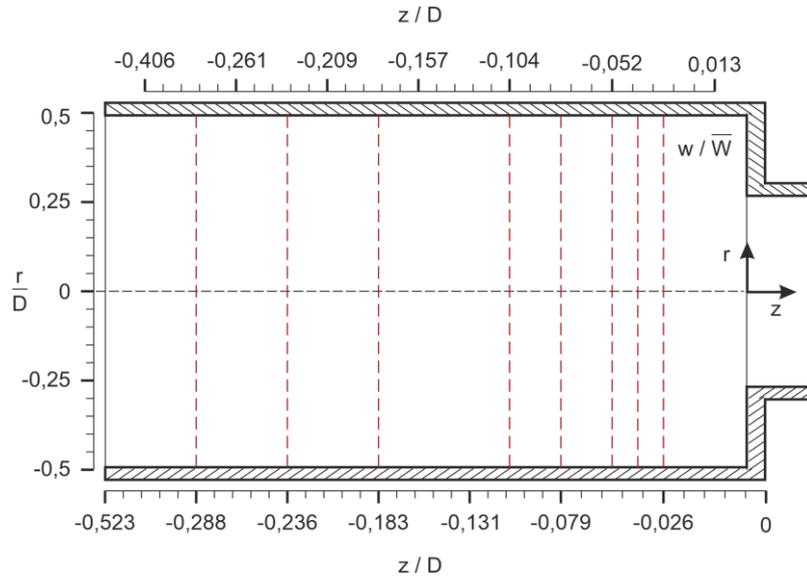


Figura 5.4 – Figura adaptada para explicar as posições dos perfis que serão analisados. Posições -0,026; -0,039; -0,052; -0,079; -0,104; -0,183; -0,236; -0,288 (SÁNCHEZ, 2011).

Os resultados são apresentados adimensionalizados, tendo como referência o plano da contração. Como mostrado na Figura 5.4 tem-se posições adimensionais negativas a esquerda do plano e posições adimensionais positivas a direita referenciado plano para o eixo x . Para o eixo y , a posição zero será sobre a linha central da geometria. As posições foram adimensionalizadas pelo diâmetro a montante da contração. Como o domínio é tridimensional, um plano foi extraído em $x=0,125\text{m}$.

Como referência são usados os dados experimentais de Sánchez (2011), que usou a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV-2D), e de Durst e Loy (1983), que trabalham com $\beta = 1,87$.

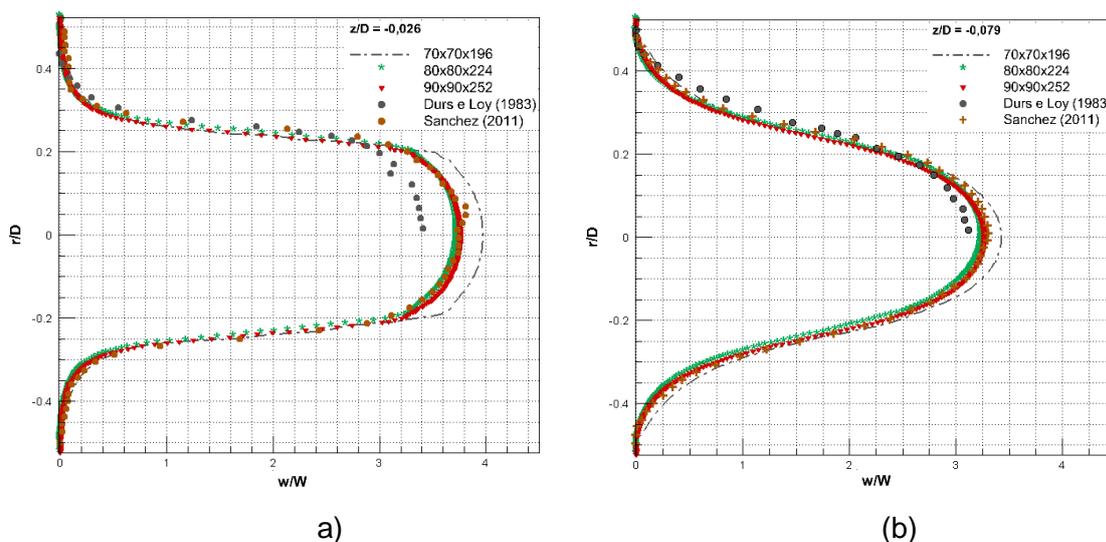


Figura 5.5 – Perfis de velocidades da componente w/W para malhas eulerianas de 70x70x196, 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições (a) -0,026 e (b) -0,079.

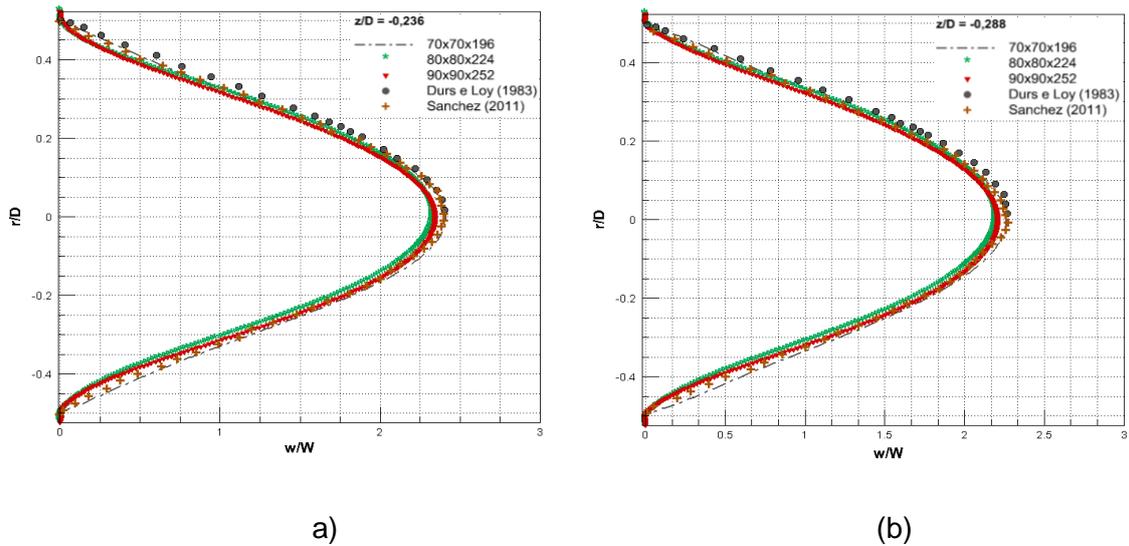


Figura 5.6 – Perfis de velocidades da componente w/W para malhas eulerianas de 70x70x196, 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições (a) -0,236 e (b) -0,288.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam perfis da componente w/W da velocidade em 4 posições antes da contração, duas próximas e as outras afastadas. Próximo da contração, Figura 5.5, os perfis de velocidade com malhas finas mostram boa concordância com os resultados experimentais de Sanches (2011), mostrando relevância ao refino da malha. A diferença com os resultados de Durst e Loy (1983) são motivados pelo uso de menor valor da razão de contração, sendo mais acentuado na posição 0,026. Na parte central do duto, a malha grossa M2 (70x70x196) não consegue reproduzir os dados de referência. Por outro lado, afastado da contração, na Figura 5.6, o refino de malha não é muito relevante devido que são regiões onde a influência do perfil imposto na entrada é grande. Os resultados experimentais nestas regiões são bastante próximos.

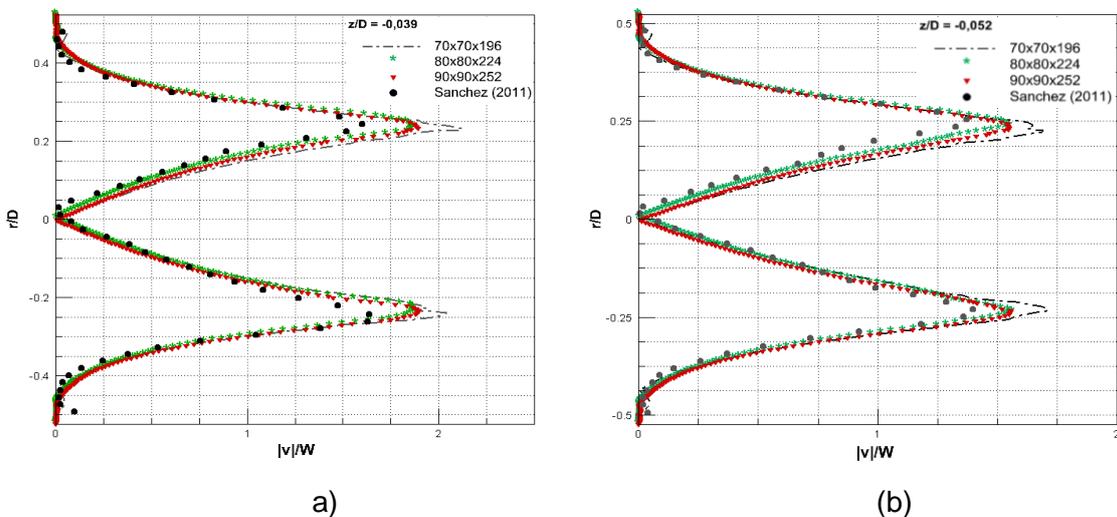


Figura 5.7 – Perfis de velocidades da componente $|v|/W$ para malhas eulerianas de 70x70x196, 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições -0,039 e -0,052.

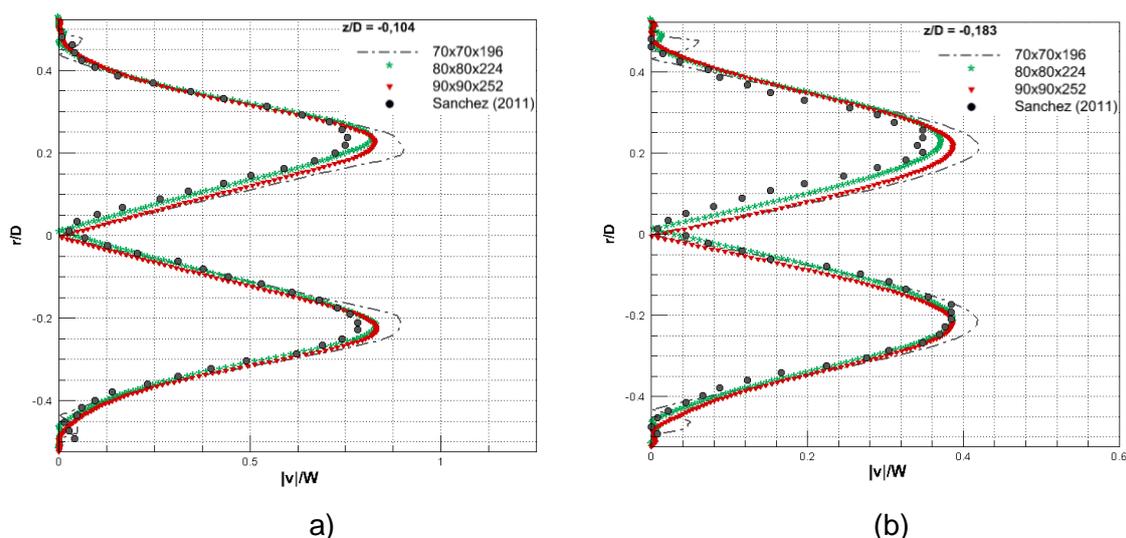


Figura 5.8 – Perfis de velocidades da componente $|v|/W$ para malhas eulerianas de 70x70x196; 80x80x224 e 90x90x252. Nas posições -0,104 e -0,183.

Perfis de velocidades da componente v/W , em outras 4 posições antes da contração são apresentadas nas Figura 5.7 e Figura 5.8. Pode-se observar que a magnitude da velocidade próxima da contração, Figura 5.7, é maior que nas regiões afastadas por causa das mudanças ocasionadas pela contração. São menores quando comparadas com componente w/W da velocidade. Em todas as posições, com malha grossa a solução é deficiente.

Os resultados mostram que as simulações realizadas reproduzem o problema de escoamento em contração abrupta com muito boa concordância quando comparados com dados experimentais. Foram feitas avaliações para o regime turbulento no trabalho de Borges (2019, no prelo) comparando seus resultados numéricos com dados experimentais na mesma plataforma numérica em desenvolvimento utilizada neste trabalho.

5.2 TESTES PRELIMINARES: EFEITO DA ROTAÇÃO NA CONTRAÇÃO

Com o objetivo de verificar a influência da velocidade de rotação da contração abrupta, foram realizadas simulações com malha euleriana de 60x60x168 volumes, $Re=365$ e velocidades de rotação imposta na geometria no intervalo de 0 a 200 rpm.

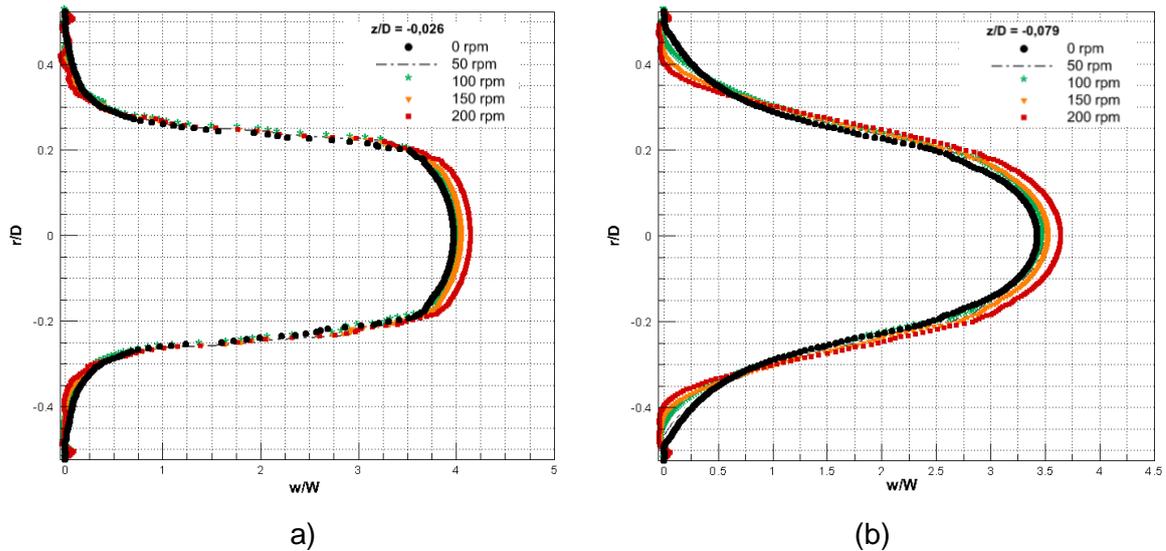


Figura 5.9 – Perfis de velocidades da componente w/W para malha $60 \times 60 \times 168$ nas posições (a) $-0,026$, (b) $-0,079$ e velocidades de rotação de 0; 50; 100; 150 e 200 rpm.

São apresentados perfis em regiões próximas à contração, onde as mudanças são maiores, das componentes w/W (Figura 5.9) e componente $|u|/W$ (Figura 5.10). Pode-se observar que com o aumento da velocidade de rotação as magnitudes da componente w da velocidade aumentam ligeiramente na parte central do duto, pelo contrário, manifesta queda nas proximidades das paredes do duto. Grande é a influência da velocidade de rotação sobre a componente transversal da velocidade é evidenciada na Figura 5.10 (exceto na parte central do duto) em resposta ao incremento de força centrífuga ocasionada pelo aumento da velocidade de rotação.

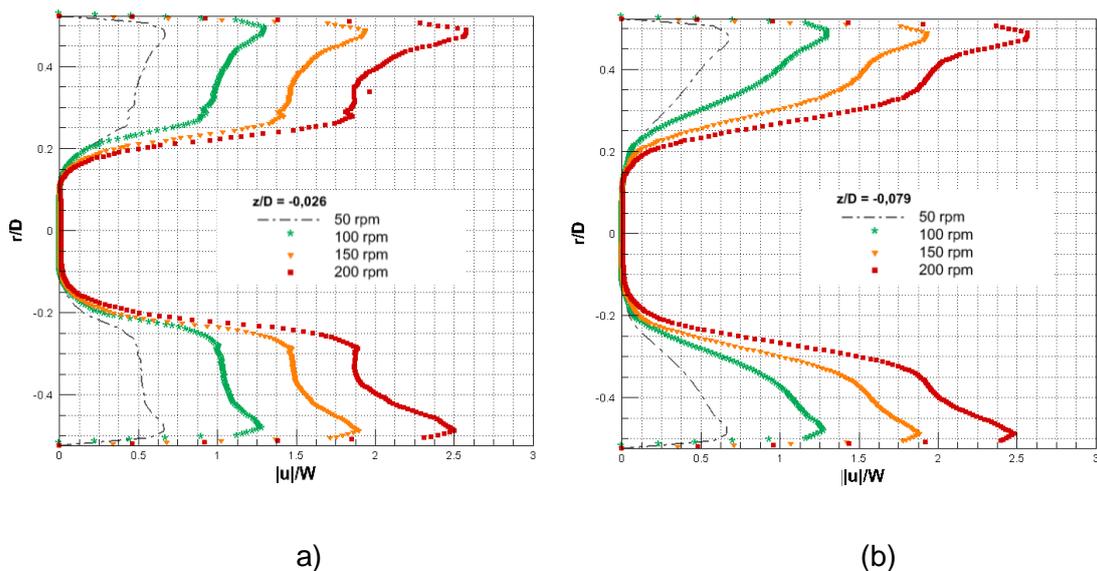


Figura 5.10 – Perfis de velocidades na componente $|u|/W$ para malha euleriana de $60 \times 60 \times 168$. Nas posições (a) $-0,026$, (b) $-0,079$.

Tabela 5.2 –Valores da velocidade máxima e média (m/s) nas diferentes posições da região a montante da contração, considerando rotações de 50,100,150 e 200 RPM.

	Posição	50 RPM		100 RPM		150 RPM		200 RPM	
componente w	-0,0026	Max	3,998	Max	4,015	Max	4,048	Max	4,147
		Media	1,861	Media	1,852	Media	1,863	Media	1,898
	-0,0079	Max	3,448	Max	3,475	Max	3,524	Max	3,643
		Media	1,664	Media	1,657	Media	1,681	Media	1,731
componente v	-0,0039	Max	2,129	Max	2,120	Max	1,980	Max	1,828
		Media	0,626	Media	0,609	Media	0,552	Media	0,499
	-0,0052	Max	1,736	Max	1,728	Max	1,639	Max	1,527
		Media	0,574	Media	0,562	Media	0,513	Media	0,464
componente u	-0,0026	Max	0,662	Max	1,302	Max	1,938	Max	2,580
		Media	0,302	Media	0,603	Media	0,887	Media	1,167
	-0,0079	Max	0,669	Max	1,301	Max	1,930	Max	2,569
		Media	0,235	Media	0,475	Media	0,735	Media	1,007

Velocidades médias e máximas em diferentes perfis da região a montante da contração são mostrados na Tabela 5.2. Os perfis sofrem um pequeno aumento da magnitude da velocidade para a componente axial w , redução da componente radial v e aumento significativo para u , devido ao incremento de velocidade de rotação. O ganho porcentual da velocidade na direção principal do escoamento (componente w), em relação ao caso de rotação 0 RPM, são quantificados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 –Porcentagem da velocidade axial nas diferentes posições dentro do duto, para variações de velocidade de rotação de 50,100,150 e 200 RPM.

	Posição	50 RPM		100 RPM		150 RPM		200 RPM	
componente w	-0,0026	Max	0,60 %	Max	1,05 %	Max	1,86 %	Max	4,35 %
		Media	2,50 %	Media	2,03 %	Media	2,65 %	Media	4,56 %
	-0,0079	Max	0,56 %	Max	1,33 %	Max	2,77 %	Max	6,25 %
		Media	2,34 %	Media	1,92 %	Media	3,43 %	Media	6,46 %

5.3 FUNDO DE POÇO

O domínio de interesse (lagrangiano), sistema poço-coluna de perfuração, possui dimensões de 2500 mm de comprimento e 780 mm de diâmetro, como representado na Figura 5.11. Como foi mencionado, o sistema poço-coluna foi escalado, e como resultado do

diâmetro da broca foi 740mm, considerando 20mm de folga no diâmetro da broca, o diâmetro do poço resultou 780mm. A altura da coluna foi considerada aproximadamente em 3,8 vezes o diâmetro de da coluna para o caso com a broca tipo PDC, e 3 vezes o diâmetro da coluna para o caso da broca Tricônica. Como a condição de entrada, é um perfil de velocidades desenvolvido para o regime turbulento foram propostos domínios com igual comprimento e diâmetro, para facilitar a uniformidade da posição da sondas, extração de dados de perfis, trabalhar com o mesmo domínio euleriano, e as demais características numéricas. Duas configurações são definidas em função do tipo de broca usada. Ainda uma terceira configuração é considerada incrementando a distância H dos bocais da broca PDC até a superfície do fundo de poço. Detalhes de cada configuração podem ser encontrados nos apêndices A e C.

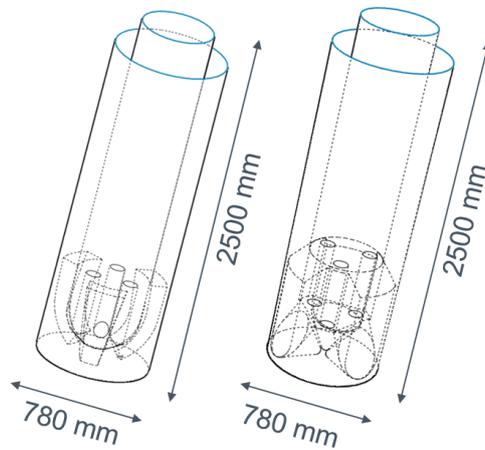


Figura 5.11 – Esquema geométrico do problema para os dois tipos de broca, PDC e Tricônica.

As condições de contorno são:

- Na entrada (coluna de perfuração): perfil de velocidade correspondente ao regime turbulento, definido pela seguinte equação:

$$w(r) = W_{max} \left(1 - \frac{r}{R_{max}}\right)^{1/6}. \quad (5.9)$$

- Na saída (duto anular): condição advectiva.

$$\frac{\partial \phi_{ls}}{\partial t} + U \left(\frac{\partial \phi_l}{\partial n}\right)_s = 0, \quad (5.10)$$

onde ϕ_l representa as variáveis dependentes do escoamento, que neste caso será considerado a variável w . A condição de saída é indicado pelo índice s , e a unidade normal denotada por n (SHIH e LIU, 2009).

- Domínio poço: é dado pela condição de parede. A condição de parede é dada pelos valores zero para cada componente da velocidade.

$$u = v = w = 0. \quad (5.11)$$

- Domínio coluna de perfuração: os valores nas componentes da velocidade u e v são dados pela velocidade de rotação da coluna.

$$u = V_{ta} \cos(\theta), \quad (5.12)$$

$$v = V_{ta} \sin(\theta), \quad (5.13)$$

onde V_{ta} é a velocidade tangencial, produto da velocidade angular e o raio, e θ é o ângulo formado pelo deslocamento de um ponto no nó lagrangiano depois de um intervalo de tempo. As condições iniciais das componentes da velocidade são zero.

O domínio euleriano, mostrado na Figura 5.12, tem dimensões de 860x860x2860 mm .

O fluido de perfuração, newtoniano, tem viscosidade cinemática $\nu = 5E - 05 \frac{m^2}{s}$ e massa específica constante $\rho = 1200 \text{ kg}/m^3$ (FIGUEIREDO, 2014).

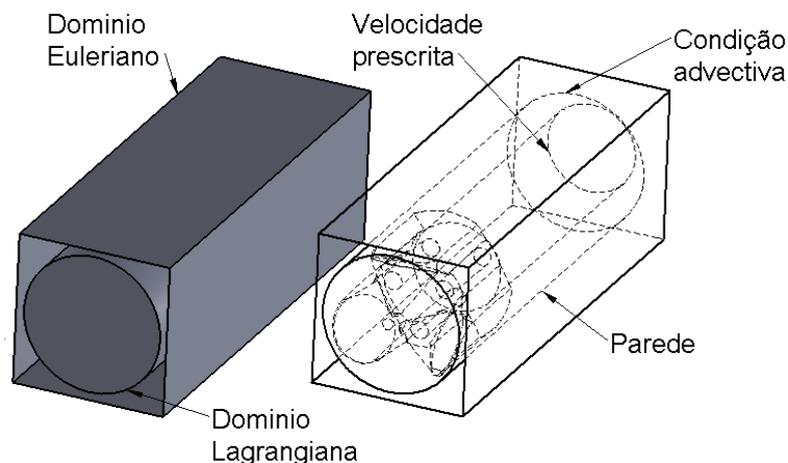


Figura 5.12– Representação das condições de contorno no domínio de interesse.

As simulações foram realizadas considerando condições operacionais de $Re= 3500$ e velocidades de rotação anti-horária da coluna de perfuração entre 0 e 100 RPM (baseado nos dados da Tabela 5.4), com malha euleriana de $86 \times 86 \times 286$ volumes nas direções x , y , z , respectivamente com uma tamanho de lado da cada volume de $dx = dy = dz = 10$ mm. A malha lagrangiana empregada tem relação de $ds/dx= 0.88$. O tempo físico para aquisição de dados depende da velocidade de rotação, sendo estabelecido o tempo correspondente a 3 voltas como adequado (segundo a Tabela 5.5)

Tabela 5.4 – Velocidades de rotação para brocas PDC, dependendo da formação do solo. Adaptado da fonte (keysbit.com).

Formação	WOB		RPM
Cal	7257.5	8164.7	65-70
Xisto	3628.7	5443.1	75-85
Areia	5443.1	6350.3	65-75

Tabela 5.5 – Tempo necessário para a coluna de perfuração dar uma volta.

RPM	t(s)
25	2,4
50	1,2
75	0,8
100	0,6

5.3.1 Broca tipo PDC

Nesta seção apresentam-se resultados da configuração com broca do tipo PDC (detalhado na seção 2.8.1) com $H1= 90,43$ mm. Inicialmente, o escoamento encontra-se em repouso, sendo que o desenvolvimento precisa de tempos menores à medida que a velocidade de rotação aumenta.

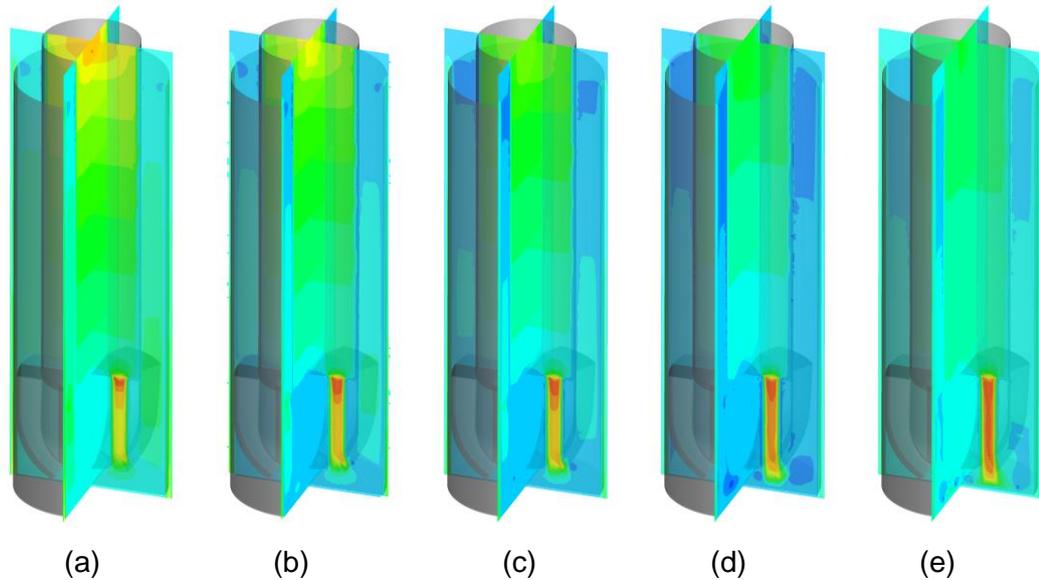
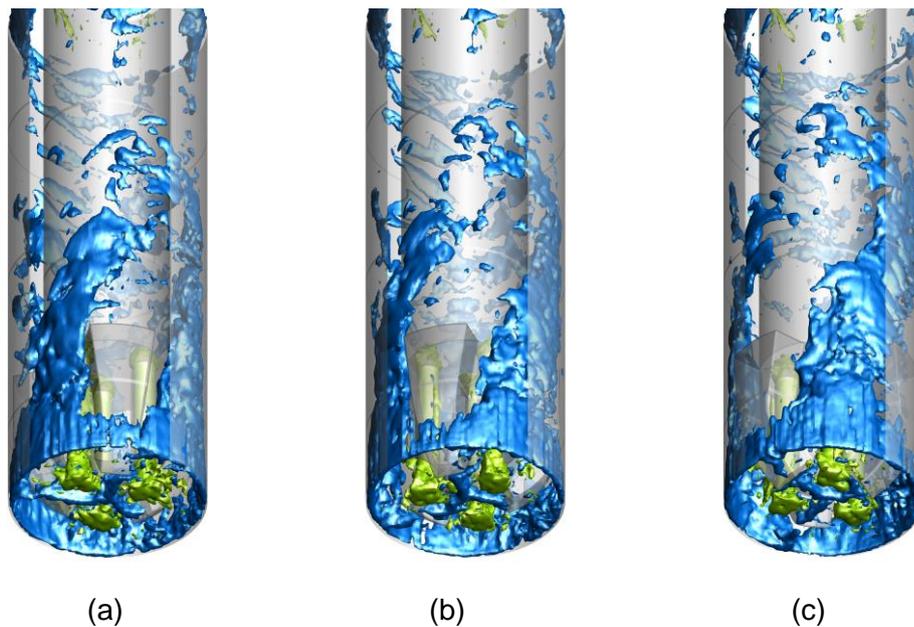


Figura 5.13 – Desenvolvimento temporal para 0rpm e tempos: (a) 0,175s, (b) 0,325s, (c) 0,45s, (d) 0,7s, (e)1s.

Através dos campos de velocidade w , visualizados nos planos centrais XZ e YZ da Figura 5.13, é possível ver que o escoamento nos bocais da broca acelera consideravelmente (campo vermelho) por causa da redução de área, atingindo velocidades máximas entre 0,54 e 1,76 m/s nos diversos instantes considerados. No último instante, 1s, o escoamento de retorno (no duto anular) está também em desenvolvimento. Foram escolhidos tempos com intervalos curtos como é mostrado na Figura 5.13 já que são instantes onde é possível perceber o desenvolvimento do escoamento dentro do bocal até a saída.



(a)

(b)

(c)

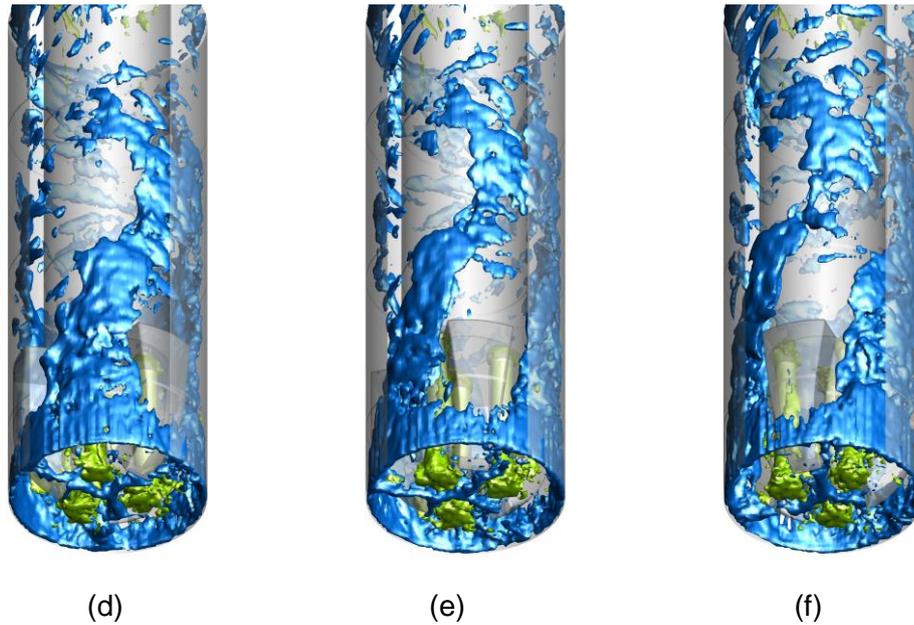
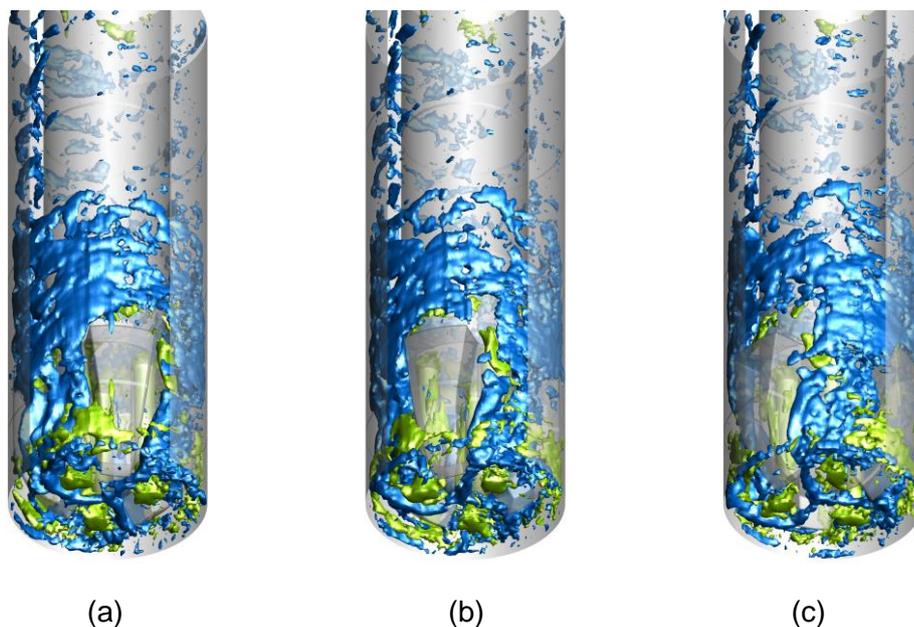


Figura 5.14 – Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=0,45\text{m/s}$ e $w=-0,34\text{m/s}$ (azul); para 25 rpm e tempos: (a) 3,8s (b) 4,0s (c) 4,2s (d) 4,4s (e) 4,6s (f) 4,8s.

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 mostra-se a evolução temporal do escoamento turbulento com velocidade de rotação da coluna de perfuração de 25 e 100rpm, respectivamente, para instantes em que a segunda volta acontece (ver Tabela 5.5). Para 25 rpm, a iso-superfície de velocidade axial azul permite visualizar o efeito de rotação sobre o escoamento passando entre as aletas da broca e, logo, pelo duto anular, descrevendo uma trajetória helicoidal com presença de muitas oscilações tridimensionais. O fluido escoando pelos bocais das brocas e logo ejetado é evidenciado por meio da iso-superfície da velocidade axial $w=0,45\text{m/s}$ (verde).



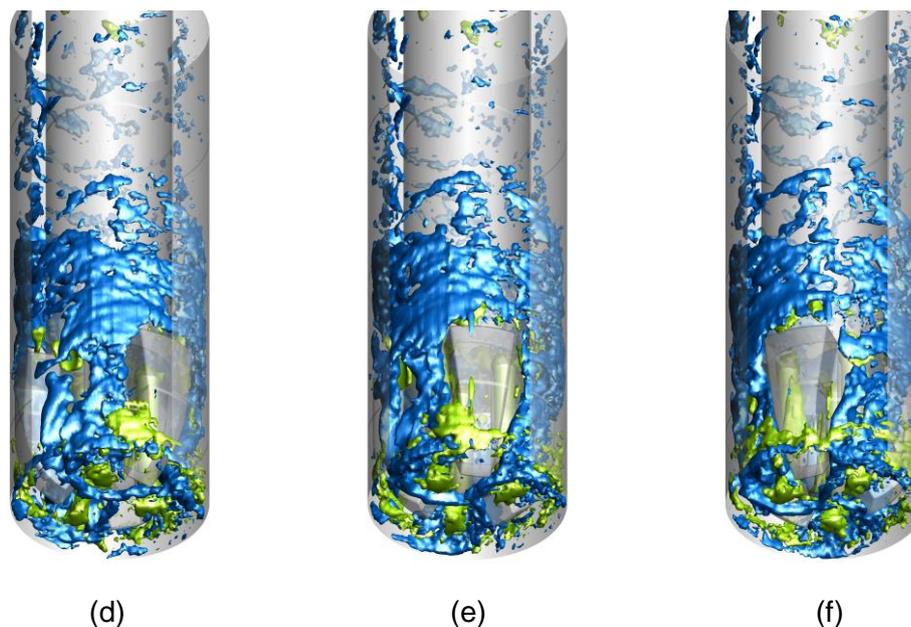


Figura 5.15 – Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=1\text{m/s}$ e $w=-0,55\text{m/s}$; para 100 rpm e tempos: (a) $t=1,55\text{s}$ (b) $1,6\text{s}$ (c) $1,65\text{s}$ (d) $1,7\text{s}$ (e) $1,75\text{s}$ (f) $1,8\text{s}$.

Para 100 rpm (Figura 5.15), a maior velocidade de rotação da coluna de perfuração torna o escoamento, nas proximidades da superfície do fundo do poço, muito mais desorganizado que o caso anterior, evidenciado principalmente pela iso-superfície $w=-0,55\text{m/s}$. Certamente, a ação das aletas da broca é um fator adicional para o aumento da intensidade de turbulência. Em relação ao escoamento helicoidal no duto anular, é possível observar que o comprimento de onda é aproximadamente metade que para o caso com velocidade de rotação de 25 rpm. A semelhança do escoamento para todos instantes, com padrão irregular, só confirma que o problema está em regime turbulento, não sendo possível estabelecer alguma característica de coerência topológica.

Instantes em que a coluna de perfuração completa duas voltas são usados para visualizar os casos com velocidade de rotação de 25, 50, 75 e 100 rpm, para dois valores de iso-superfície w (Figura 5.16). Também se considera o caso sem rotação. A partir do caso com 0 rpm, em que a componente axial da velocidade se manifesta alinhada com a direção principal do escoamento, é evidente que as iso-superfícies ocupam regiões maiores ao longo do duto de retorno do fluido, toda vez que o aumento da velocidade de rotação leva ao incremento da velocidade w no anular. Para altas velocidade de rotação (75 e 100 rpm), a coexistência das iso-superfícies de sentido contrário, no fundo de poço, sugerem flutuações de velocidade mais intensas, por se tratar de uma região crítica em que o escoamento principal muda de direção, dando lugar à formação de estruturas turbilhonares de baixa frequência (comprovadas através do tratamento estatístico nas figuras Figura 5.28 e Figura

5.29). Como comentado anteriormente, é notório que o comprimento de onda do escoamento helicoidal diminui à medida que a velocidade de rotação aumenta.

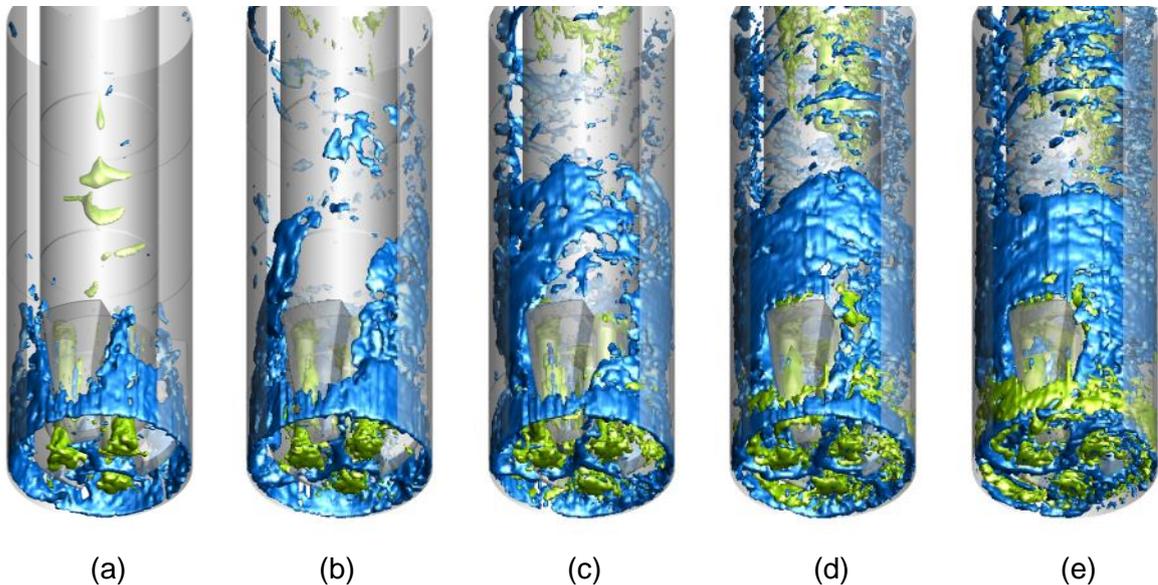


Figura 5.16 – Iso-superfícies de velocidade instantânea $w=0,45\text{m/s}$ e $w=-0,4\text{m/s}$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) $t=14\text{s}$ e 0rpm , (b) $t=4,8\text{s}$ e 25rpm , (c) $2,4\text{s}$ e 50rpm (d) $1,6\text{s}$ e 75rpm , (e) $1,2\text{s}$ e 100rpm .

As iso-superfícies de viscosidade turbulenta da Figura 5.17, no valor de 10 vezes a viscosidade molecular, dão suporte as afirmações associadas à figura anterior, por que estas se expandem ao longo do duto anular com o incremento da velocidade de rotação indicando que as instabilidades dinâmicas são mais intensas. Como os escoamentos turbulentos acontecem para um valor fixo de Re , a intensificação das instabilidades fica por conta do incremento do número de Taylor (Ta), baseado na velocidade de rotação, que resultam em valores maiores que o Re ($Ta= 6545$ para 25rpm).

Sendo o valor do número adimensional do Taylor definido como:

$$Ta = V_{ta}D_e/\nu, \quad (5.14)$$

onde V_{ta} a velocidade tangencial, D_e o diâmetro de entrada do fluido e ν a viscosidade cinemática do fluido.

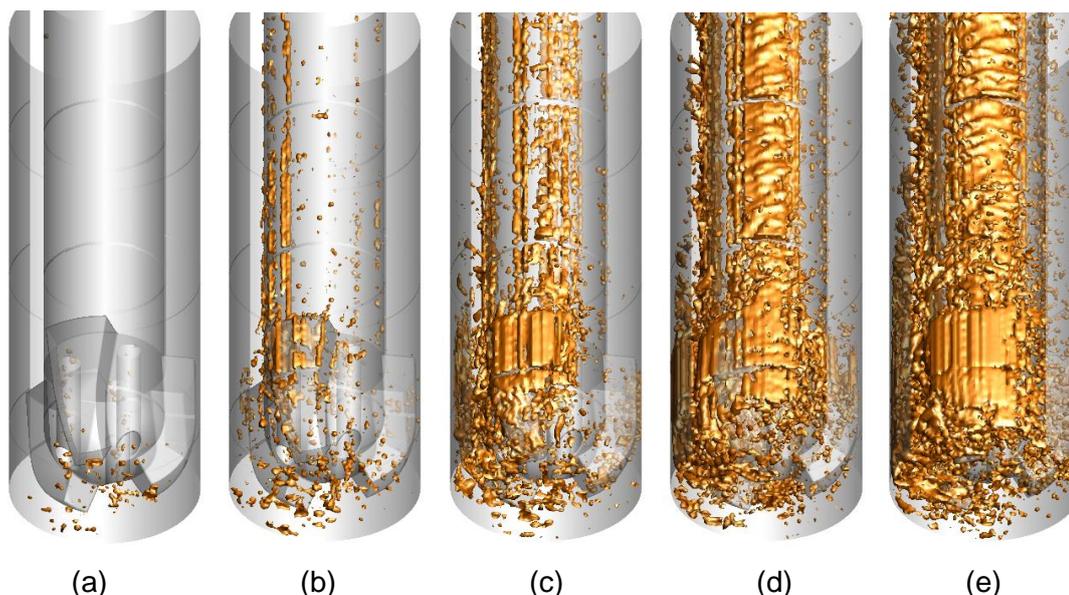


Figura 5.17 – Iso-superfícies de viscosidade turbulenta $v_t/v = 10$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) 0 rpm (b) 25 rpm, (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100 rpm.

Outra informação importante, em função do aumento dos valores máximos de viscosidade turbulenta, está relacionada com o papel que desempenha o modelo de turbulência sub-malha, sendo este maior à medida que a velocidade de rotação aumenta. Isto acontece porque, para malha inalterada, a parte modelada efetivamente aumenta com a redução das escalas transformativas (devido ao incremento no valor do Ta).

A consistência física dos resultados apresentados são comprovados pelo tratamento estatístico. Assim, campos médios, em um plano XZ, para broca PDC e rotação 0rpm são apresentados na Figura 5.18. Observa-se que as mudanças significativas das componentes de velocidade v e w acontecem devido à restrição de área (próximo do bocal, bocal e espaço entre a broca e a superfície do fundo do poço), onde o escoamento é obrigado a acelerar. A estatística das flutuações, campos de v_{rms} e w_{rms} , confirma que a região com oscilações mais intensas é aquela entre a broca e a superfície do fundo de poço, onde a intensidade de turbulência se manifesta com valores maiores.

Na Figura 5.19, A distribuição espacial de velocidade axial média e de w_{rms} na coluna de perfuração, nas posições 0m; 0,45m; 1m; 1,4m; e 1,7m na direção z do plano da figura anterior, mostram que essa componente da velocidade modifica o perfil de velocidade conforme se aproxima da contração abrupta (entrada nos bocais da broca, $z=1,879m$), assim como com incremento da intensidade de turbulência, em concordância com as Figura 5.13 e Figura 5.18.

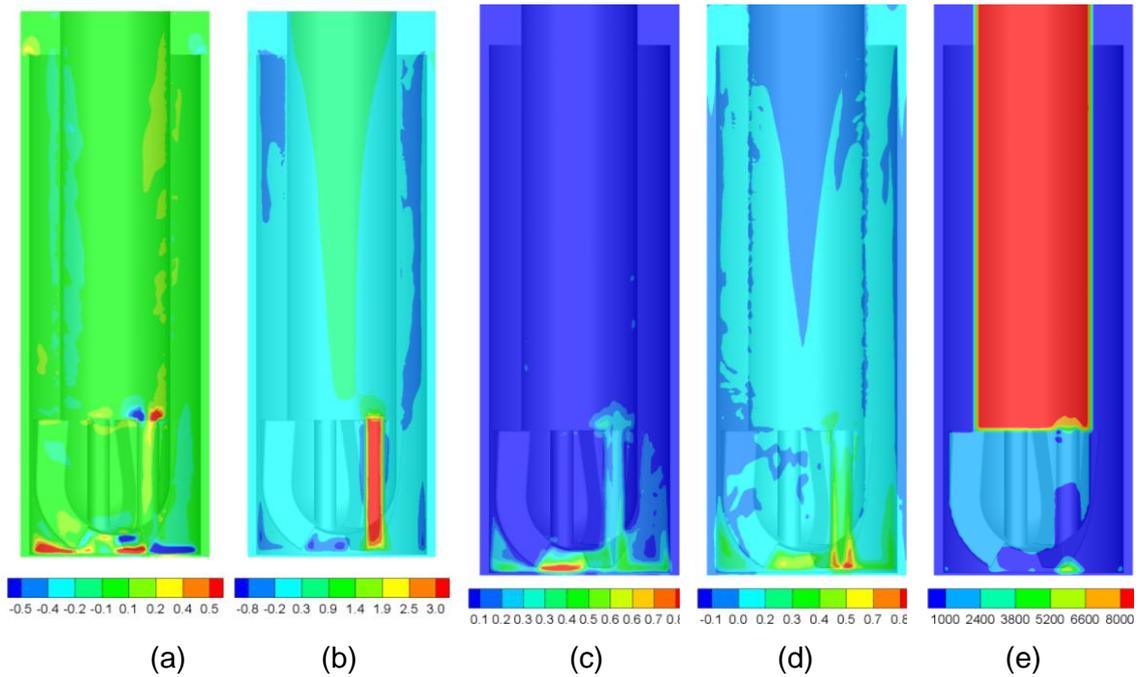


Figura 5.18 – Campos médios para $Re= 3500$ e $0rpm$; (a) v , (b) w , (c) v_{rms} , (d) w_{rms} (e) P^*

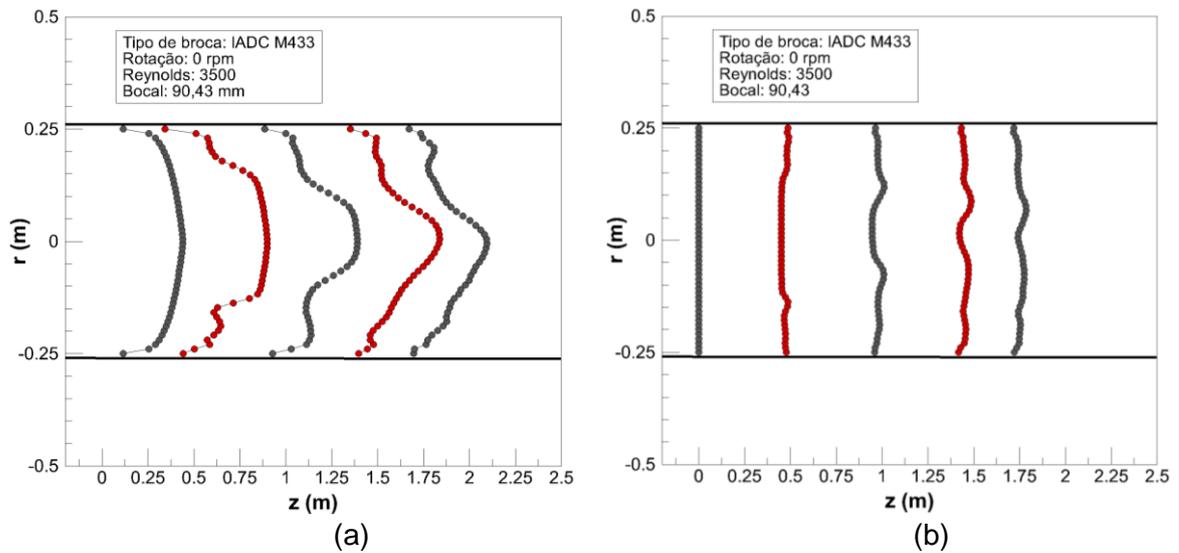


Figura 5.19 – Desenvolvimento espacial da velocidade axial na coluna de perfuração com velocidade de rotação 0 rpm , broca tipo PDC; (a) w , (b) w_{rms} .

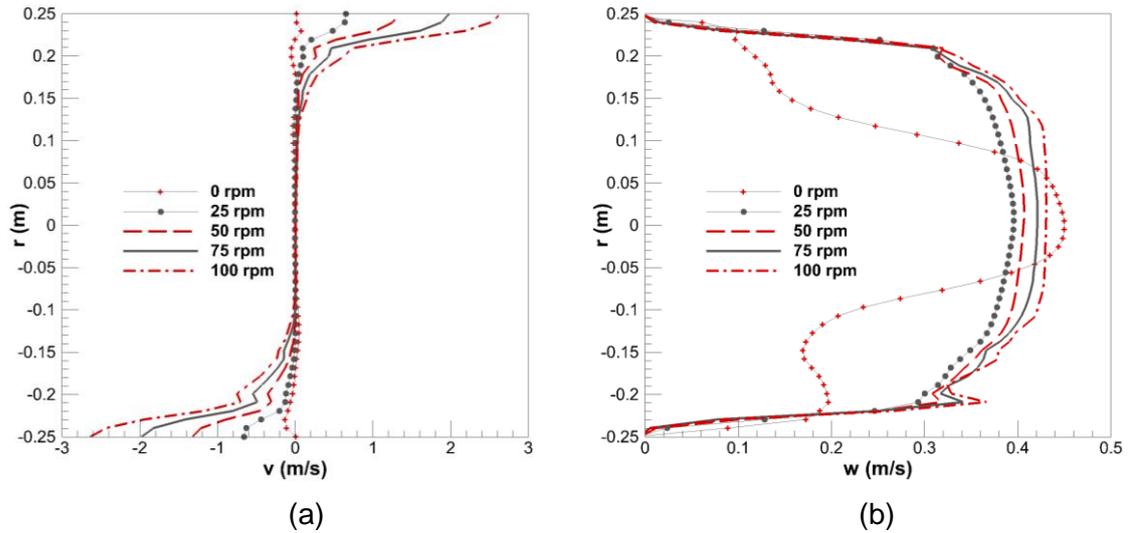


Figura 5.20 – Perfis de velocidade no campo médio, na posição $z=1\text{m}$: (a) v , (b) w

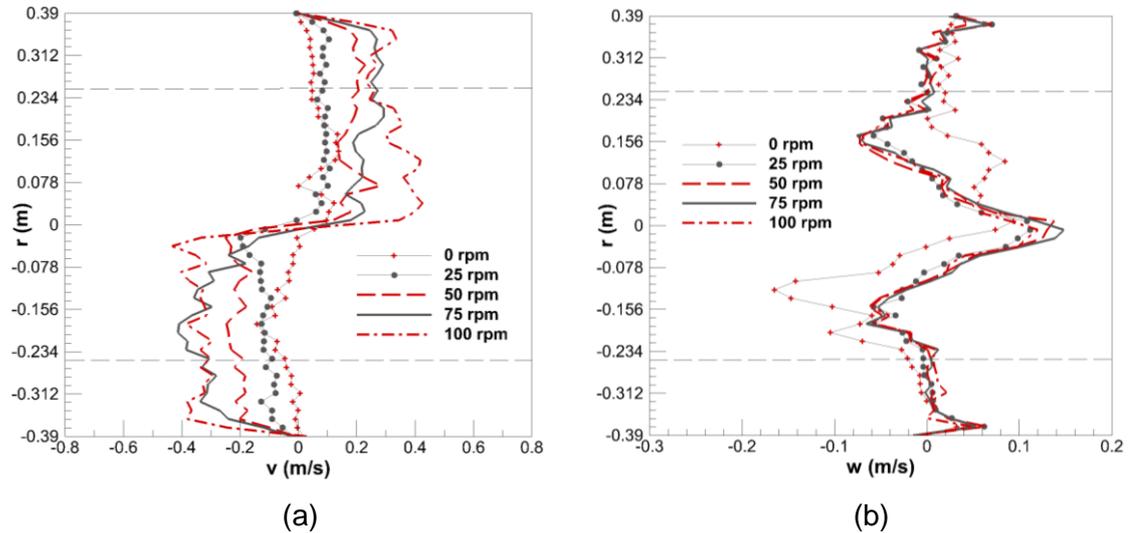


Figura 5.21 – Perfis de velocidade no campo médio, na posição $z=2,49\text{m}$: (a) v , (b) w .

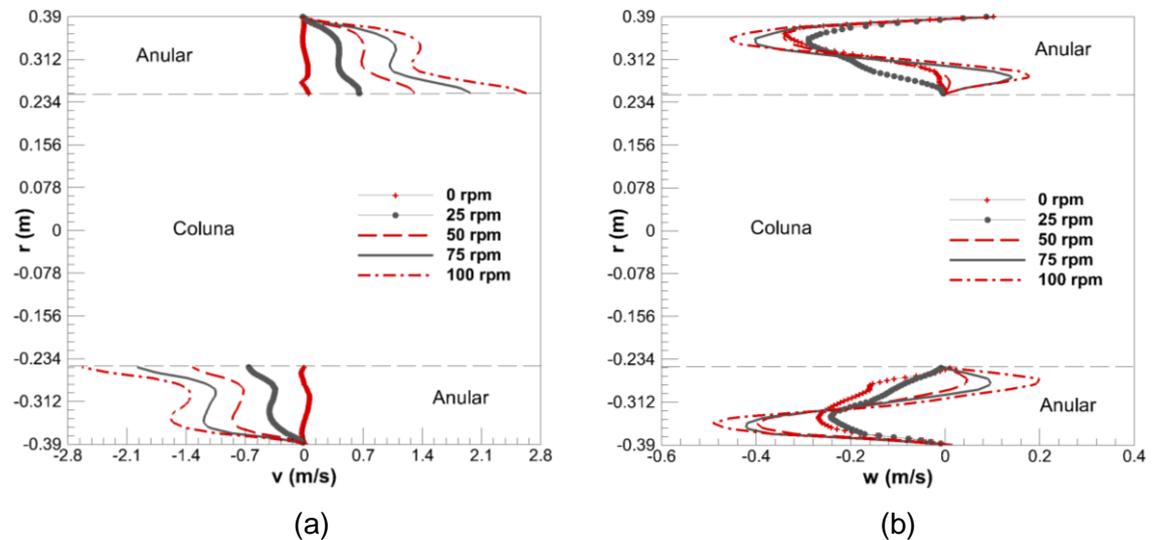


Figura 5.22 – Perfis de velocidade no campo médio, na posição $z=1,5\text{m}$: (a) v (b) w .

Detalhes quantitativos do campo de velocidade média em posições específicas da coluna de perfuração, fundo de poço e duto anular são apresentados nas Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22, respectivamente. Tais figuras contém a distribuição de duas componentes da velocidade média ao longo da direção radial (originalmente direção x , extraídas do plano médio XZ) para todas as velocidades de rotação da coluna. Na coluna de perfuração, Figura 5.20, a componente v (na posição corresponde à velocidade tangencial) evidência uma queda acentuada a partir do valor correspondente à imposição de velocidade de rotação, que acontece nas regiões próximas à parede do duto. Já na componente w da velocidade, Figura 5.20(b), o efeito da velocidade de rotação torna os perfis achatados e com mínimas diferenças nos extremos, com um ligeiro aumento na magnitude de esta componente proporcional à taxa de rotação.

A distribuição de velocidade próximo da superfície do fundo de poço, Figura 5.21, mostra-se bem distribuídas ao longo da seção transversal do poço, com valores um pouco maiores na parte central. A componente v é a única que se apresenta maior à medida que a velocidade de rotação aumenta. Em média, os três jatos formados na saída da broca aceleram a componente w na parte central da superfície do fundo de poço, retornando logo do impacto (regiões com velocidade negativa).

Os perfis de velocidade no duto anular (retorno) têm relação proporcional crescente com a magnitude da velocidade de rotação imposta na coluna de perfuração. A componente v , Figura 5.22(a) apresenta valores máximos em consonância com os perfis na coluna de perfuração, enquanto a componente w tem seus máximos mais deslocados, em direção aos limites do poço, conforme a rotação aumenta.

A intensidade turbulenta completa a análise estatística na coluna de perfuração e duto anular (Figura 5.23), na posição $z=1,5$ m, e próximo da superfície do fundo de poço (Figura 5.24), na posição $z=2,49$ m. Confirmando a lógica e em concordância com os resultados apresentados antes, a região próxima do fundo de poço registra maior intensidade de turbulência, seguida pelo duto anular e, finalmente, menores valores na coluna de perfuração ($r \leq 0,25$). O incremento da amplitude das flutuações aumenta à medida que a rotação da coluna é incrementada, como consequência do aumento no nível de desorganização e caos. Deferente dos outros locais, na coluna de perfuração registram-se maior intensidade de turbulência próximo das regiões parietais (Figura 5.23). Por outro lado, a característica altamente instável e oscilatória dos jatos turbulentos é registrada na Figura 5.24 através dos picos em torno da parte central do poço, que no plano do fundo descreve uma região anular à rotação dos bocais. Ressalta-se que o plano de onde foram extraídos os perfis coincidem com o espaço entre aletas na parte superior (direção r dos gráficos) e com a superfície do

fundo de poço na parte inferior, motivo para os perfis, principalmente em w , pare ter distribuição fora do padrão dos casos com rotação.

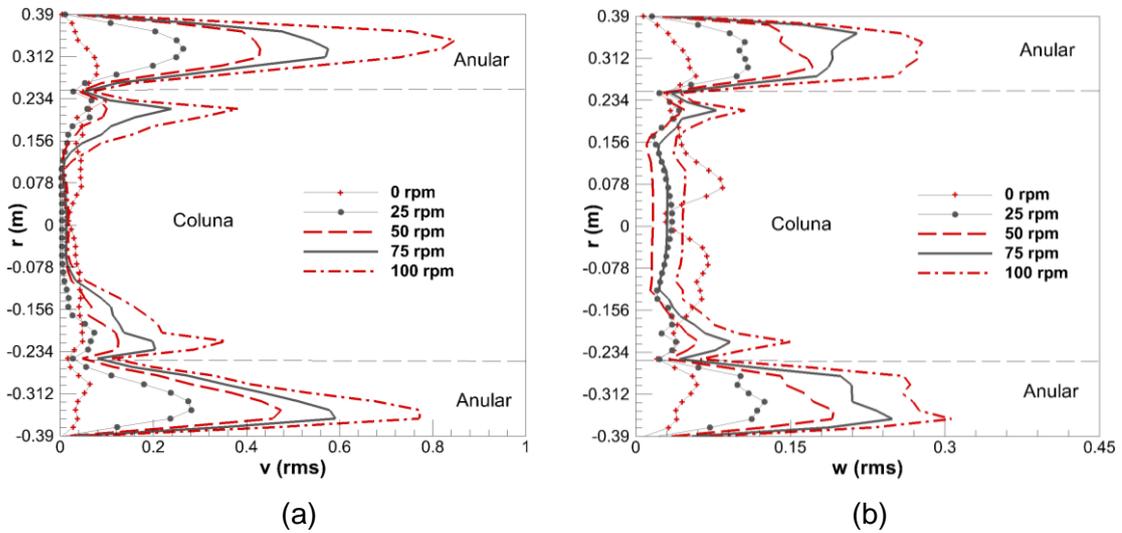


Figura 5.23 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=1.5\text{m}$. (a) v_{rms} (b) w_{rms} .

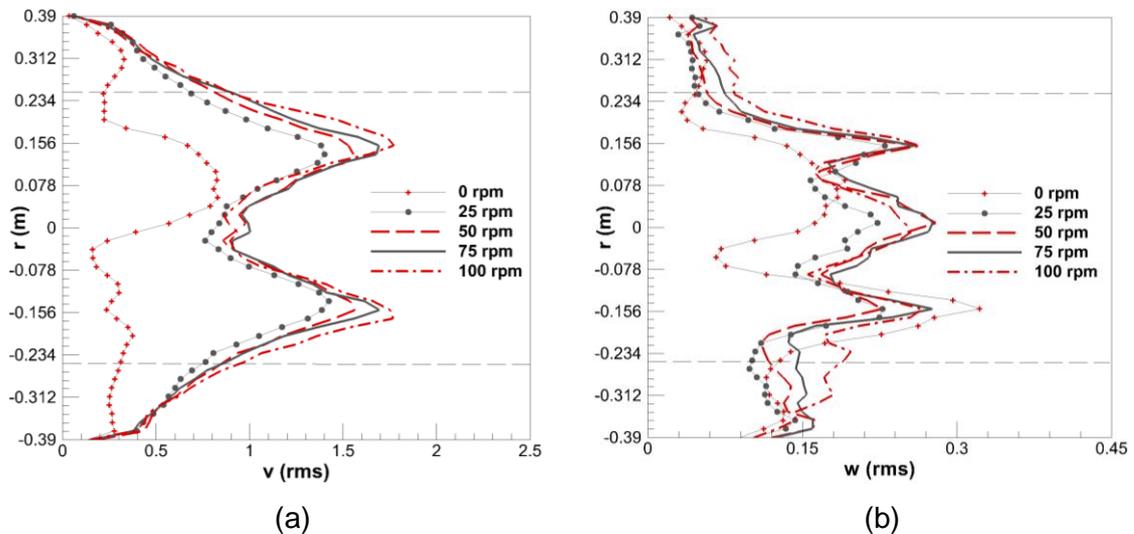


Figura 5.24 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=2.49\text{m}$. (a) v_{rms} (b) w_{rms} .

A seguir análises pontuais na sonda A, localizada no fundo de poço na posição (0,43;0,43;2,46), e B, no duto anular na posição (0,43;0,11;1,5), por meio de sinais temporais de duas componentes da velocidade (Figura 5.25 e Figura 5.27), potência espectral associada aos sinais da sonda A (Figura 5.26) e espectro de energia para ambas as sondas (Figura 5.28 e Figura 5.29). A potência espectral e o espectro de energia são resultados do tratamento dos comportamentos temporais dos sinais de velocidades com o uso das transformada rápida de Fourier (FFT).

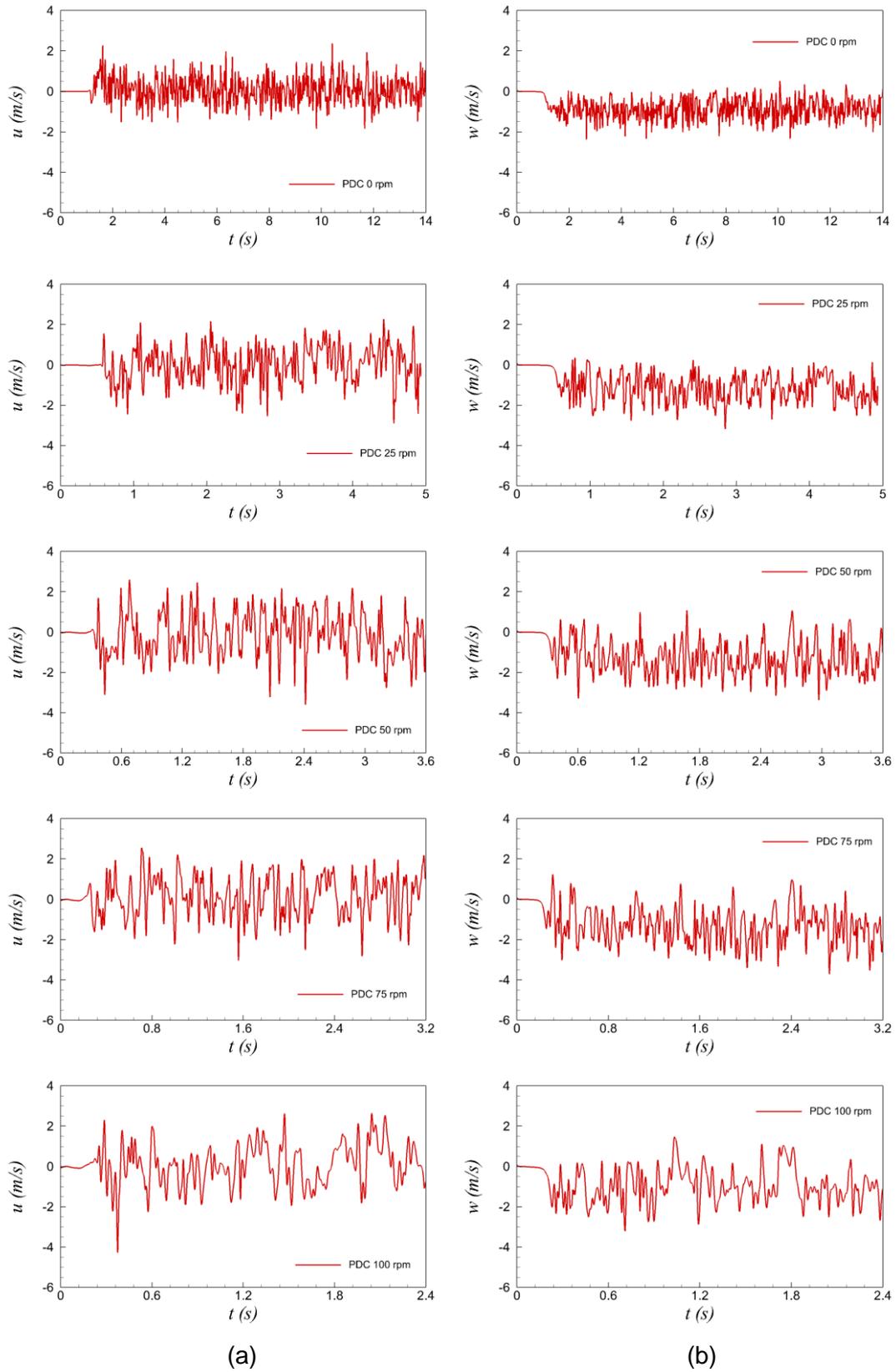


Figura 5.25 – Flutuações de velocidade na sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo PDC; (a) u e (b) w .

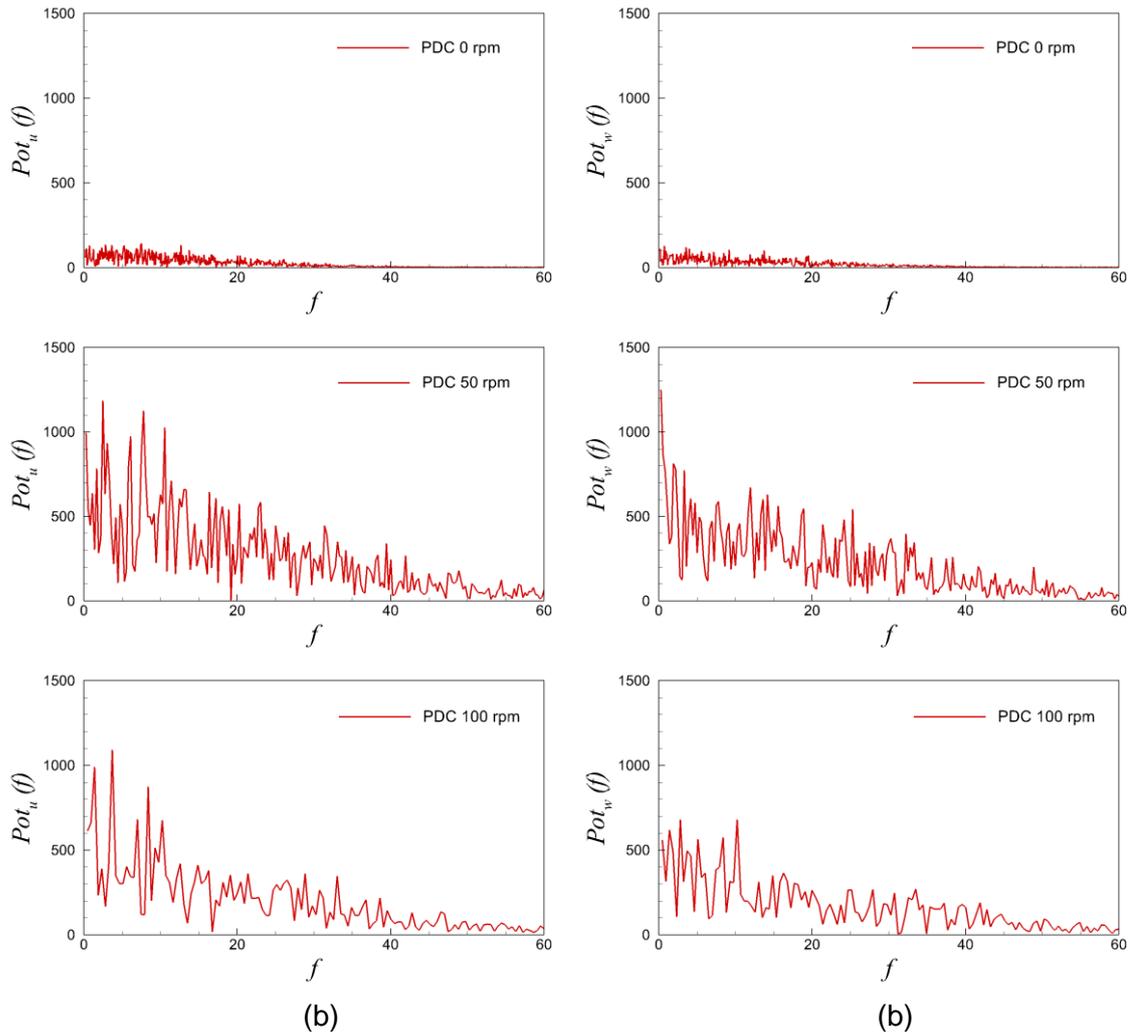


Figura 5.26 – Potência espectral das flutuações da velocidade em $A(0,43;0,43;2,46)$ para a broca tipo PDC: (a) u e (b) w.

As flutuações de velocidade no domínio do tempo, em ambas sondas monitoradas (Figura 5.25 e Figura 5.27), se mostram bastante irregulares em todos os casos, onde a velocidade de rotação promove oscilações com maiores amplitudes. Assim, o caso com velocidade de rotação nula se diferencia por ter amplitudes menores em ambas componentes da velocidade. O comportamento da componente u tem as mesmas características que a componente v da velocidade. Quando comparadas as magnitudes das flutuações, próximo do fundo de poço (Figura 5.25) estas são quatro a cinco vezes maiores que no duto de retorno do escoamento (Figura 5.27), fato que corrobora a estatística das flutuações das figuras anteriores. Outra informação contida nas referidas figuras está relacionada com o desenvolvimento do escoamento, uma vez que começa de campos nulos, precisa de tempo para atingir uma boa estatística, sendo necessário tempos menores à medida que a velocidade de rotação aumenta.

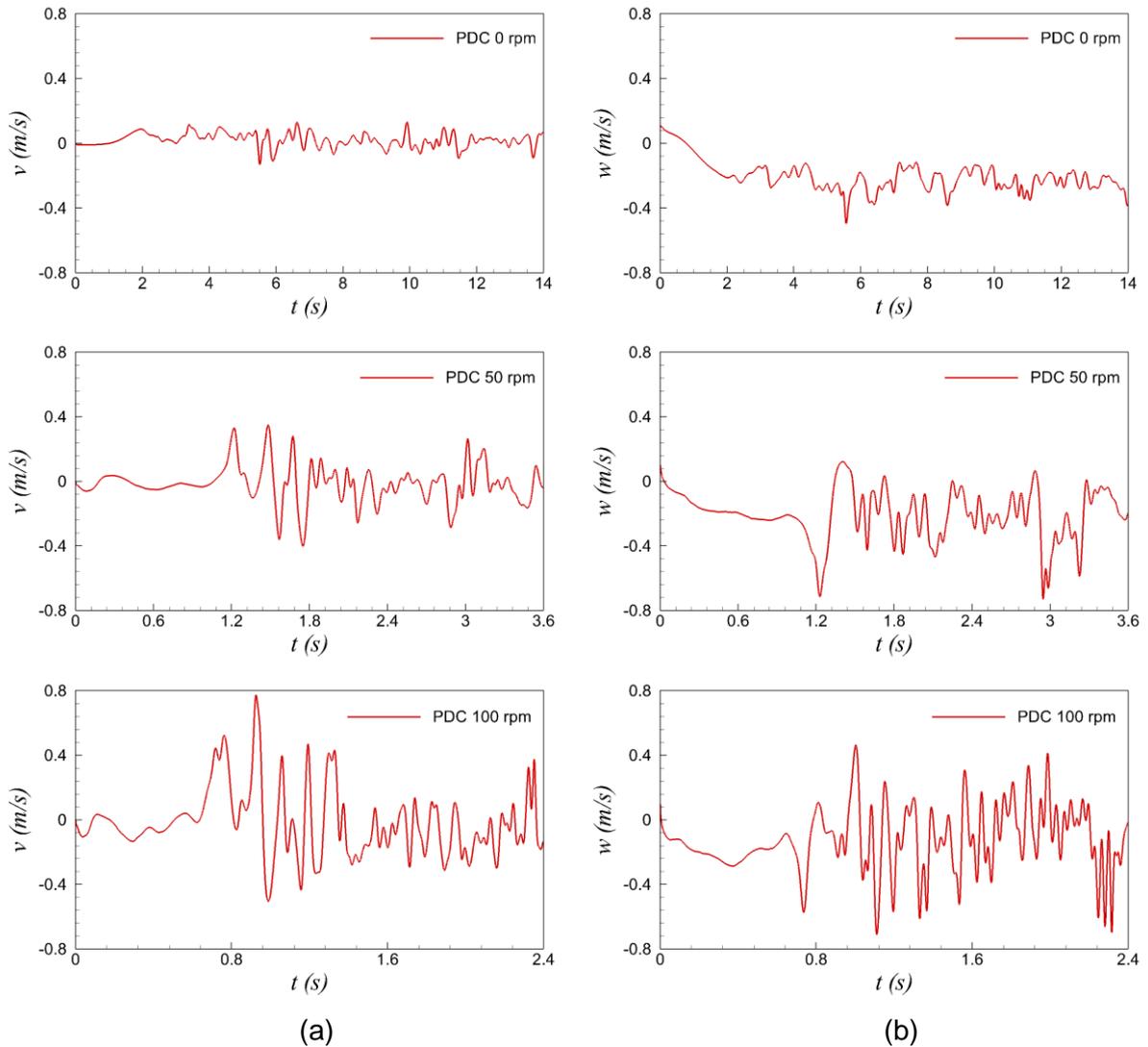


Figura 5.27 – Flutuações da velocidade na sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo PDC; (a) u, (b) w.

Importante lembrar que uma das características do fenômeno de turbulência é a existência de uma ampla banda de frequências, como evidenciado na Figura 5.26. Nessa figura tem-se a potência espectral relacionadas as flutuações das componentes u e w da velocidade no fundo de poço. Observa-se que o espectro está composto de múltiplas oscilações de alta frequência, associada as pequenas escalas, assim como de baixa, associadas às grandes escalas. Na realidade, o escoamento está composto por todas escalas possíveis entre a integral (depende da geometria) e a transformativa (depende do Re ou Ta), as quais interagem dinamicamente promovendo intensa transferência de energia, que em média passam das grandes para as menores escalas. Como a injeção de energia acontece através das grandes escalas, são estas as de maior energia, decaindo a magnitude de energia em função do incremento da frequência (evidente para ambas as componentes). Para 0 rpm,

o espectro de energia mostra muito menor energia associada, compatíveis com o nível de flutuações das velocidades.

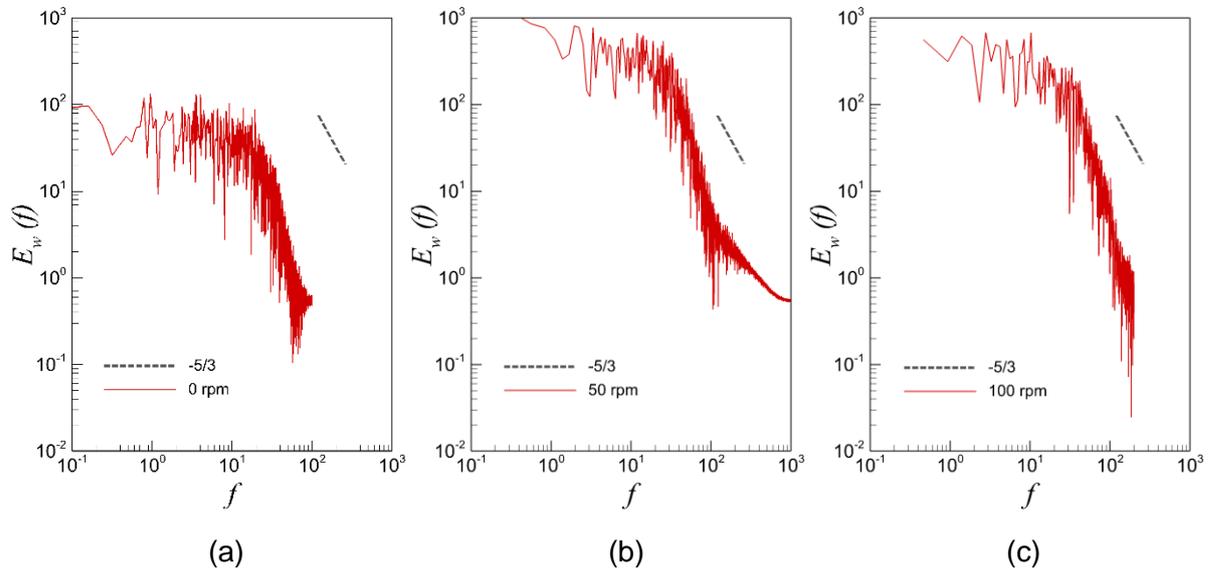


Figura 5.28 – Espectro de energia; sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo PDC; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm.

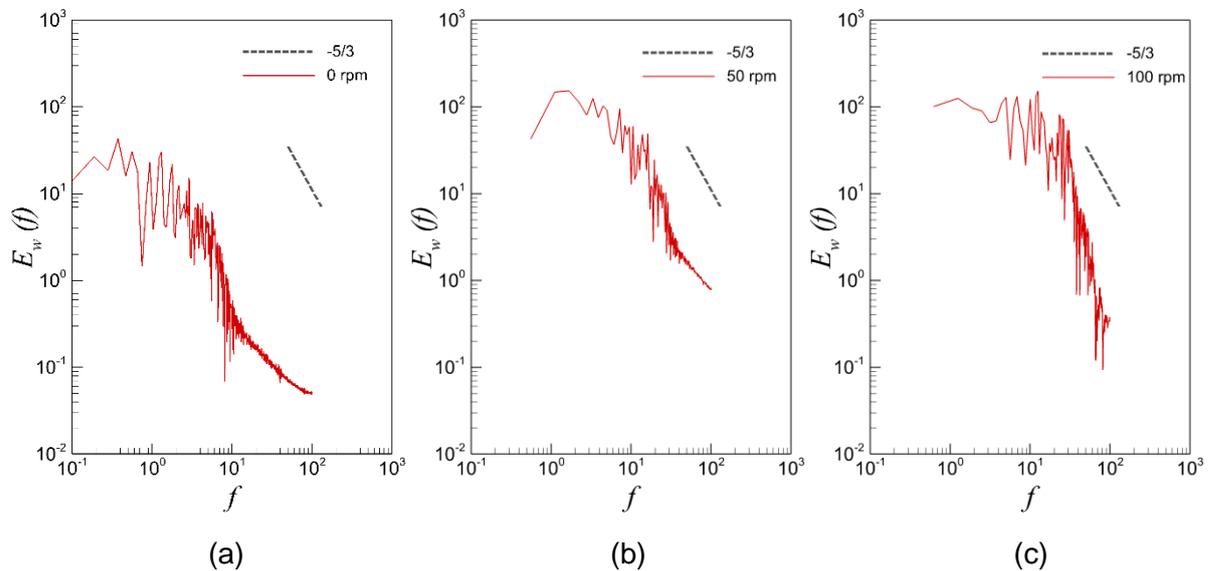


Figura 5.29 – Espectro de energia; sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo PDC; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm,

Outra forma de avaliar os resultados de potência espectral é usando escala logarítmica, dando lugar ao conhecido espectro de energia cinética turbulenta, que permitirá discernir sobre a inclinação da zona inercial, que representa a transferência de energia entre todas as

estruturas que compõem o espectro, efetivada através do processo não linear próprio do escoamento. Nesse contexto, adota-se a lei de Kolmogorov como referência.

Observa-se que a energia das grandes escalas nas proximidades da superfície do fundo do poço (sonda A, Figura 5.28) são maiores que no duto de retorno (sonda B, Figura 5.29). Os casos apresentam um espectro maior, exceto para a sonda B, casos com menos flutuações comparados com a região perto à superfície do fundo. A transferência de energia se dá com inclinação levemente maior que o $-5/3$ da lei de Kolmogorov, o que implica que os escoamentos não têm o típico comportamento de escoamentos isotrópicos. Certamente, o grau de anisotropia existente leva a uma menor transferência de energia das grandes para as pequenas estruturas, considerando que a taxa de transformação de energia está sendo adequadamente representada pelo modelo de turbulência sub-malha dinâmico (PADILLA, 2004).

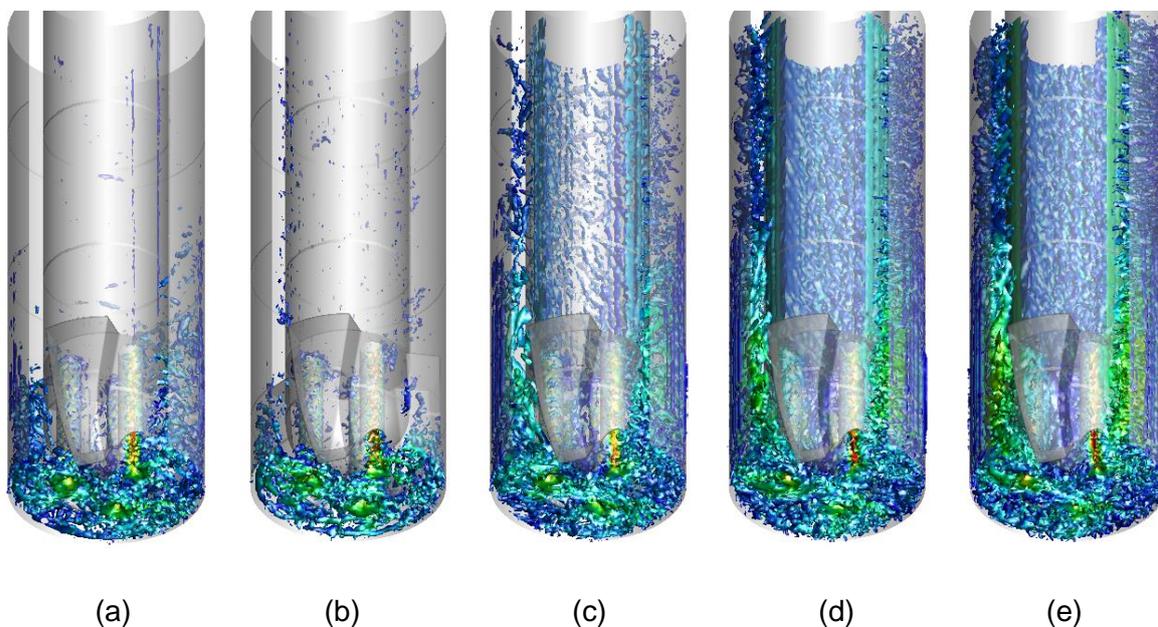


Figura 5.30 – Representação das estruturas turbilhonares utilizando o critério Q; PDC; altura do bocal 90,43mm, (a) 0rpm, (b) 25 rpm, (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100 rpm.

Para observar de forma gráfica as estruturas próprias do regime turbulento dentro do domínio é usado o critério Q, por meio de iso-superfícies de valor 300 1/s coloridas pelo módulo da velocidade, Figura 5.30. Foi desconsiderado um quarto do domínio entre a coluna de perfuração e o poço para melhor visualização. As estruturas turbilhonares típicas de escoamentos turbulentos estão presentes em vários tamanhos, basicamente, na forma de filamentos. Para baixas velocidades de rotação da coluna de perfuração essas estruturas se concentram em torno da broca, o incremento da velocidade de rotação gera um efeito multiplicador até preencher o duto anular.

5.3.2 Broca tipo Tricônica

Resultados da configuração com broca tricônica, sendo o bocal afastado 345,91 mm com relação ao fundo de poço, são apresentados em esta seção. A sequência e composição dos resultados é a mesma que para broca PDC, por esse motivo a análise será mais concisa, toda vez que em parte do domínio as características dos escoamentos são similares. Como as brocas tem geometrias diferentes, essas promovem modificações na região em torno, principalmente em módulo. A exemplo, o desenvolvimento temporal da Figura 5.31, para 0 rpm, mostra qualitativamente o escoamento similar ao da Figura 5.13 (com broca PDC), no entanto a velocidade axial desenvolvida chega a 3,36 m/s no último instante. A aceleração maior se dá em função de bocais mais compridos para a broca tricônica (123 mm maior). Deve-se ressaltar também que a saída dos bocais é de corte plano, diferente dos bocais da broca PDC que possuem corte curvo. Obviamente, a diferença de alturas em relação à superfície do fundo de poço é parâmetro que influencia.

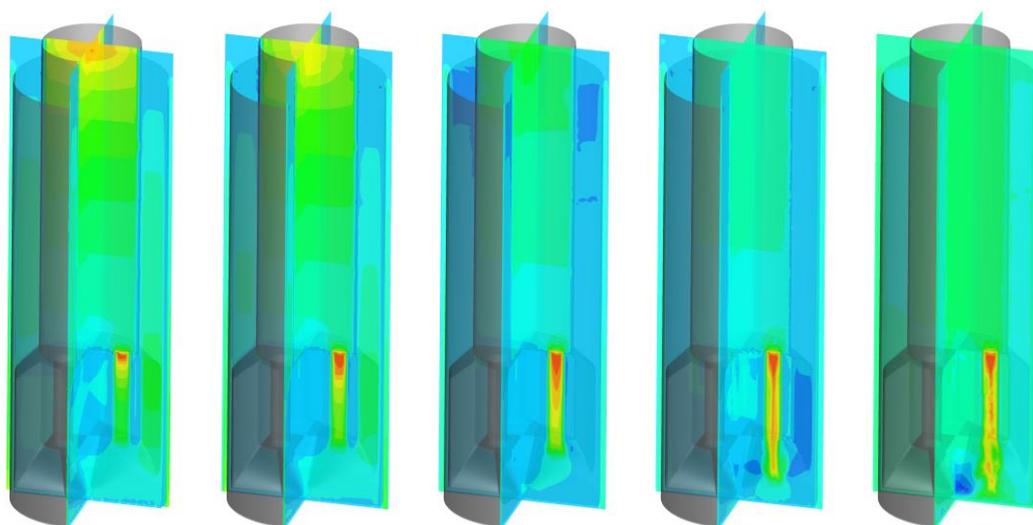


Figura 5.31 – Desenvolvimento temporal; planos XZ e XY com valores de velocidade axial máxima entre 0,53 m/s e 3,36m/s; rotação 0rpm e tempos: (a)0,1s (b)0,3s (c)0,65s (d)1s (e)1,3s.

A evolução temporal, ilustrada através das iso-superfícies de velocidade w , das Figura 5.32 e Figura 5.33 mostram claramente que o escoamento nas proximidades do fundo de poço tem um maior grau de desorganização como consequência das maiores velocidades geradas pelos bocais e da interação com os cones da broca. A diminuição de iso-superfícies no duto anular indica que ao ser afastado do fundo de poço a energia cinética contida no escoamento diminui.

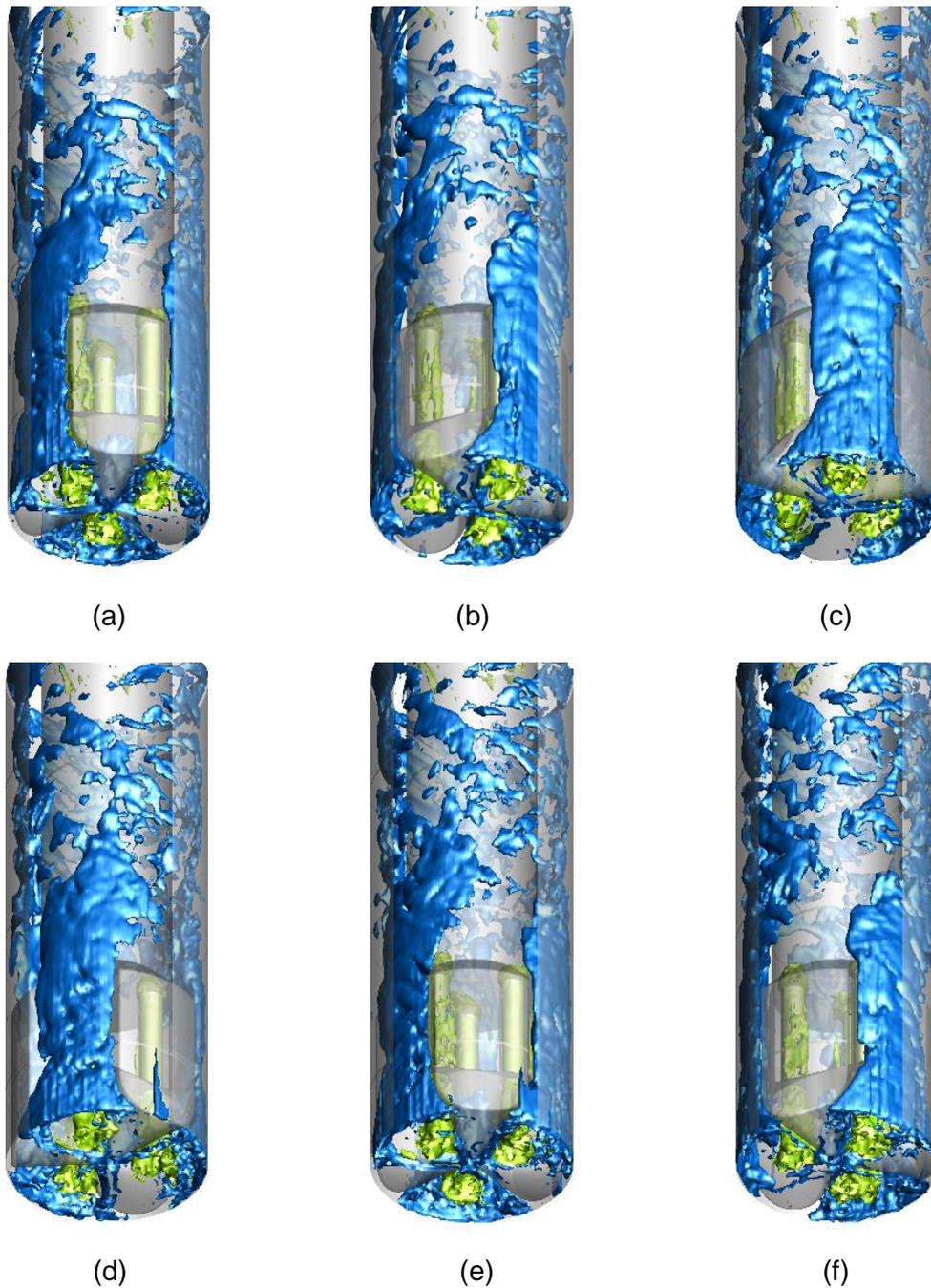


Figura 5.32– Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=0,45\text{m/s}$ e $w= -0,35\text{m/s}$; 25rpm e tempos: (a) $t=4\text{s}$, (b) 4,2s c)4,4s, (d) 4,6s, (e) 4,8s, (f) 5s.

Na Figura 5.34, todos os casos mostram mais estruturas turbilhonares no fundo do poço, quando comparados com a broca PDC. Este fato deve promover maior eficiência na limpeza do poço, derivando as partículas de sólidos (produto do corte) para a parte anular. Aparentemente, o comprimento de onda do escoamento helicoidal, que diminui com o incremento da rotação, não muda com a utilização de brocas diferentes.

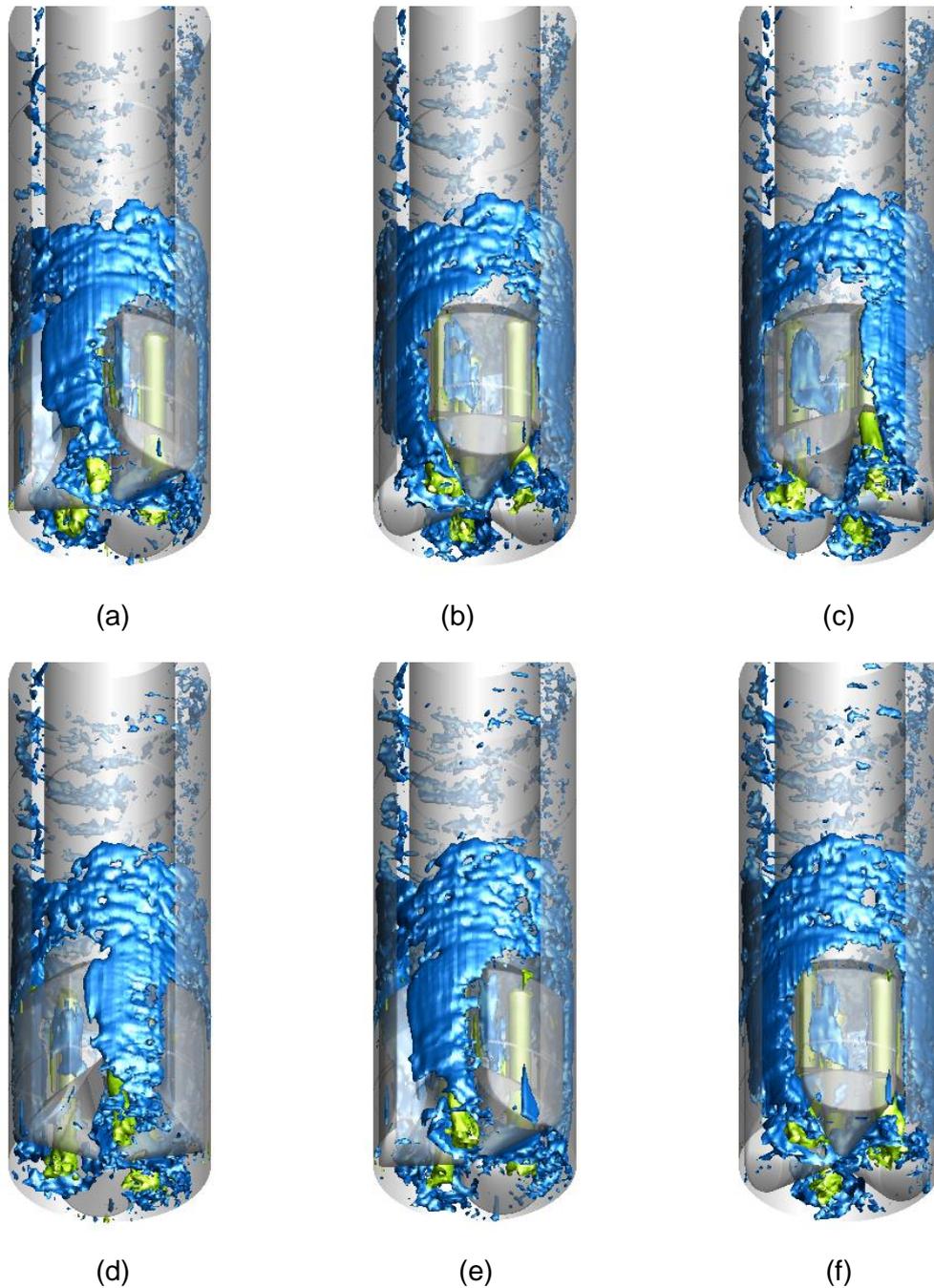


Figura 5.33 – Evolução temporal do escoamento representado por iso-superfícies $w=1\text{m/s}$ e $w=-0,55\text{m/s}$; 100 rpm e tempos: (a) $t=1,55\text{s}$ (b) $1,6\text{s}$ (c) $1,65\text{s}$ (d) $1,7\text{s}$ (e) $1,75\text{s}$ (f) $1,8\text{s}$.

Considerando o mesmo valor de iso-superfícies de viscosidade turbulenta adimensional $\nu_t/\nu = 10$ (Figura 5.35), a distribuição para os diversos casos se mantém quase inalterada em função da malha usada ser a mesma que para broca PDC, assim a parte modelada é a mesma. As pouco perceptíveis diferenças no fundo estão relacionadas com a maior intensidade de turbulência registrada.

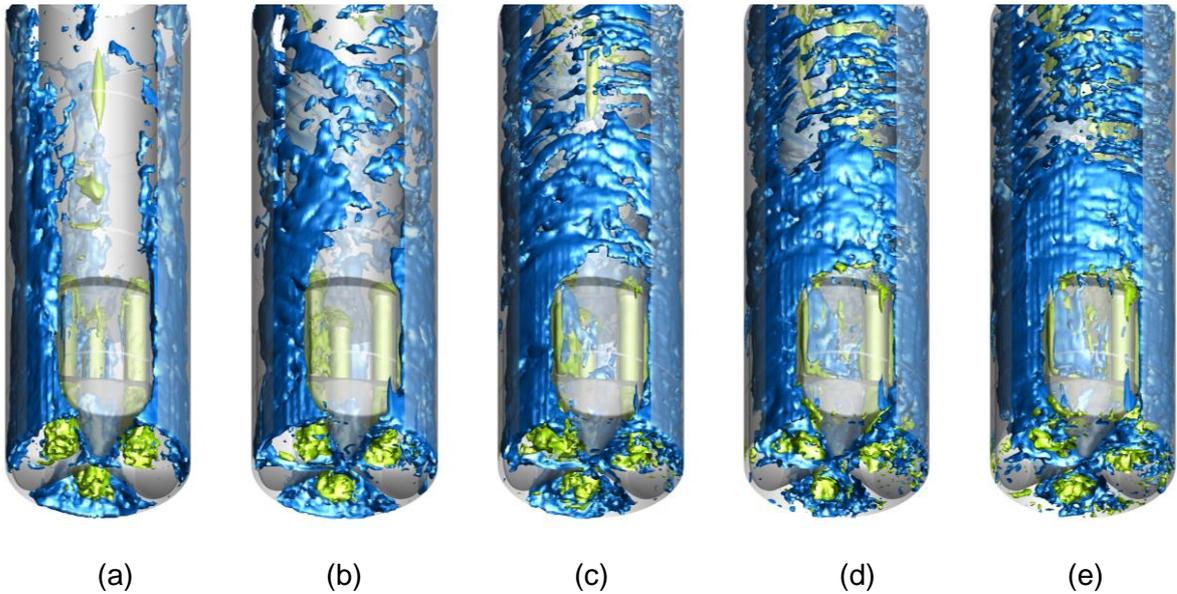


Figura 5.34– Iso-superfícies de velocidade instantânea, $w= 0,45\text{m/s}$ e $w=-0,35\text{m/s}$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) $t=14\text{s}$ e 0rpm , (b) $t=4,8\text{s}$ e 25rpm , (c) $2,4\text{s}$ e 50rpm (d) $1,6\text{s}$ e 75rpm , (e) $1,2\text{s}$ e 100rpm .

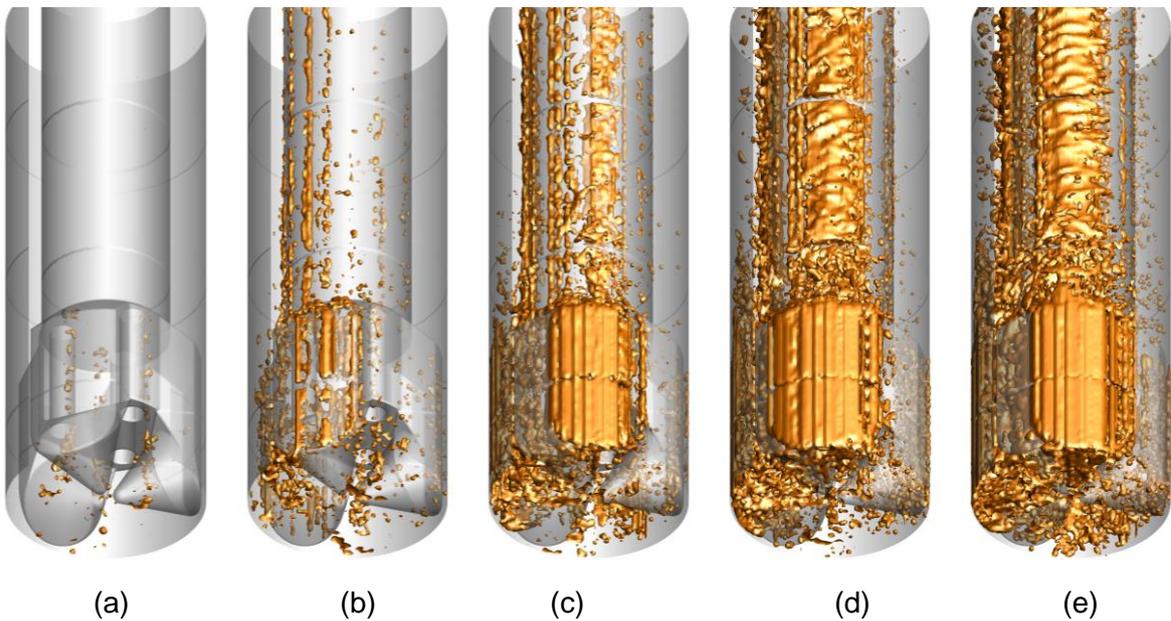


Figura 5.35 – Iso-superfícies de viscosidade turbulenta $\nu_t/\nu = 10$ para diversos valores de velocidade de rotação; (a) 0rpm (b) 25rpm , (c) 50rpm , (d) 75rpm , (e) 100rpm .

Na Figura 5.36(a), destaca os valores altos de velocidade tangencial na região dos cones da broca. Os outros campos mostram também mudanças neste local, com incremento de máximos nos valores. Os perfis médios da Figura 5.37 demonstram que o escoamento no interior da coluna de perfuração praticamente não muda em relação ao uso de broca PDC.

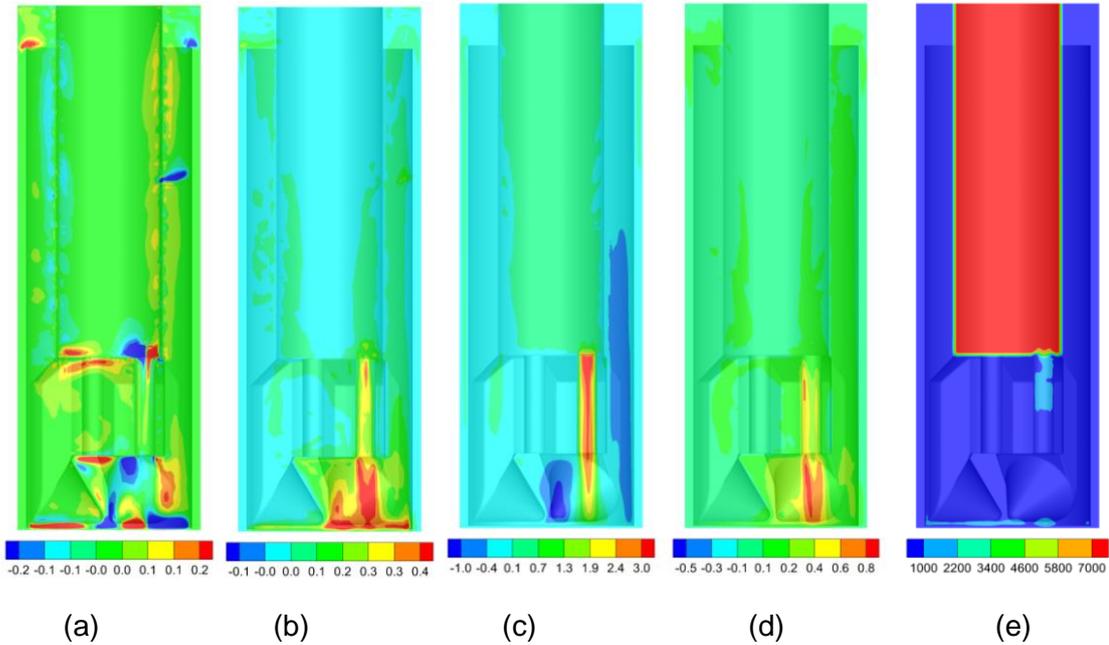


Figura 5.36 – Campos médios para $Re=3500$ e $0rpm$ (a) v , (b) w , (c) v_{rms} , (d) w_{rms} (e) P^*

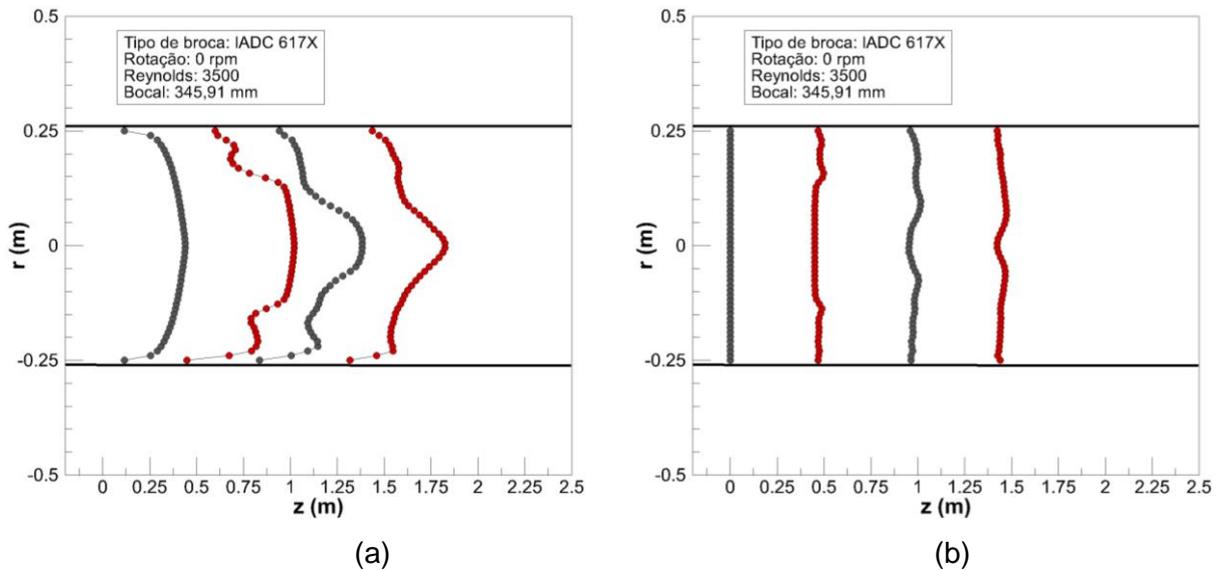


Figura 5.37 – Desenvolvimento espacial da velocidade axial na coluna de perfuração com velocidade de rotação 0 rpm ; broca tricônica; a) w , b) w_{rms} .

Quantitativamente, os perfis representativos dos escoamentos na coluna de perfuração e no duto anular, mantem o padrão para os casos com rotação, diferindo da configuração com broca PDC em magnitude. Na coluna de perfuração, as distribuições de velocidade média (Figura 5.38) e intensidade de turbulência (Figura 5.41) são idênticas, com diferenças mínimas da componente w na parte central. No duto de retorno do escoamento, as componentes da velocidade média (Figura 5.22) apresenta incrementos acima de 20%, provocando maiores

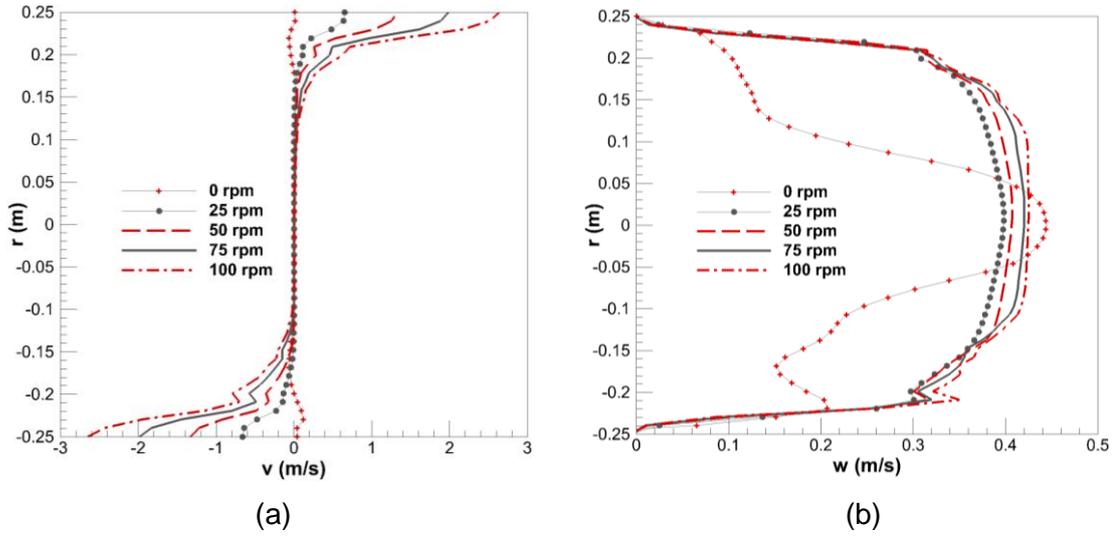


Figura 5.38– Perfis de velocidade no campo médio na posição $z=1\text{m}$: (a) v , (b) w .

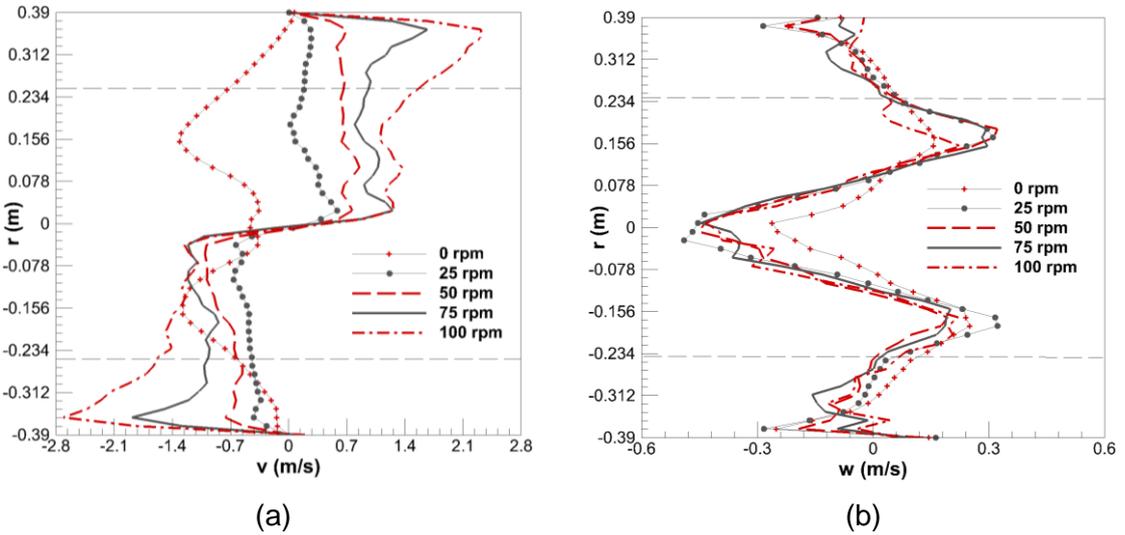


Figura 5.39 – Perfis de velocidade no campo médio na posição $z=2,49\text{m}$: (a) v , (b) w .

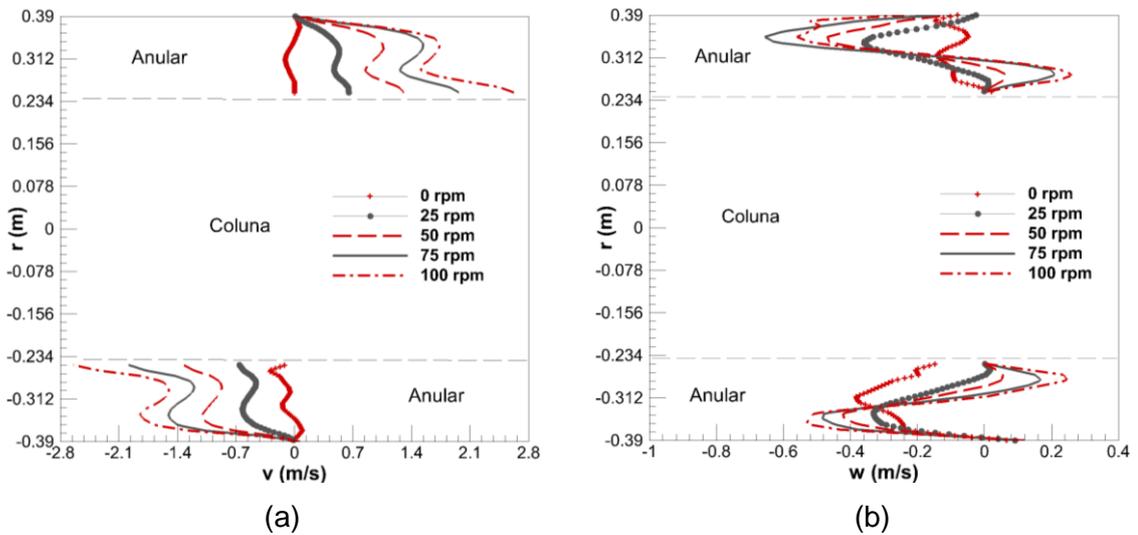


Figura 5.40– Perfis de velocidade no campo médio na posição $z=1,5\text{m}$: (a) v , (b) w .

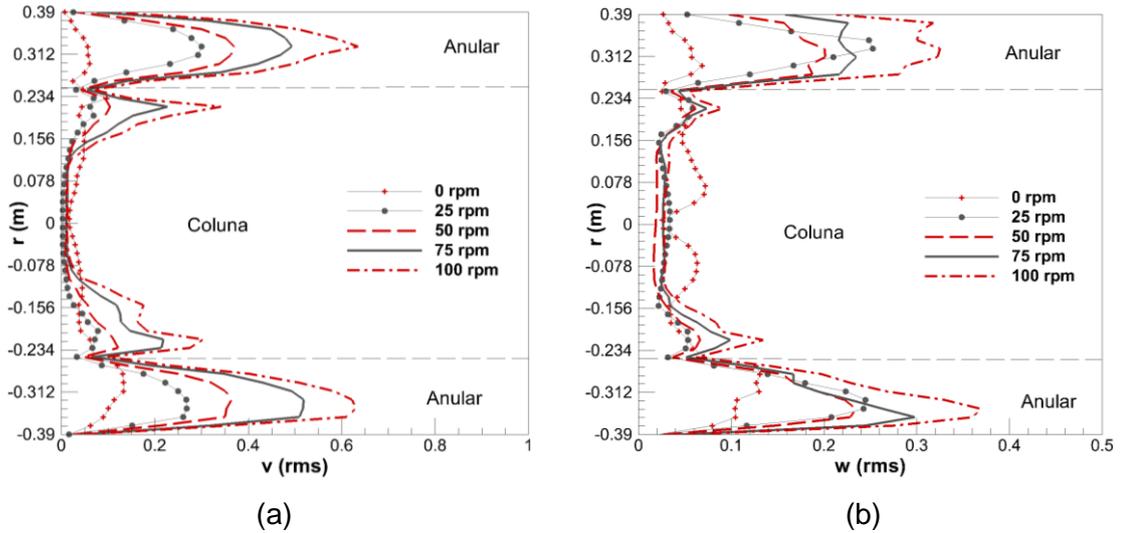


Figura 5.41 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=1.5\text{m}$; (a) v_{rms} , (b) w_{rms} .

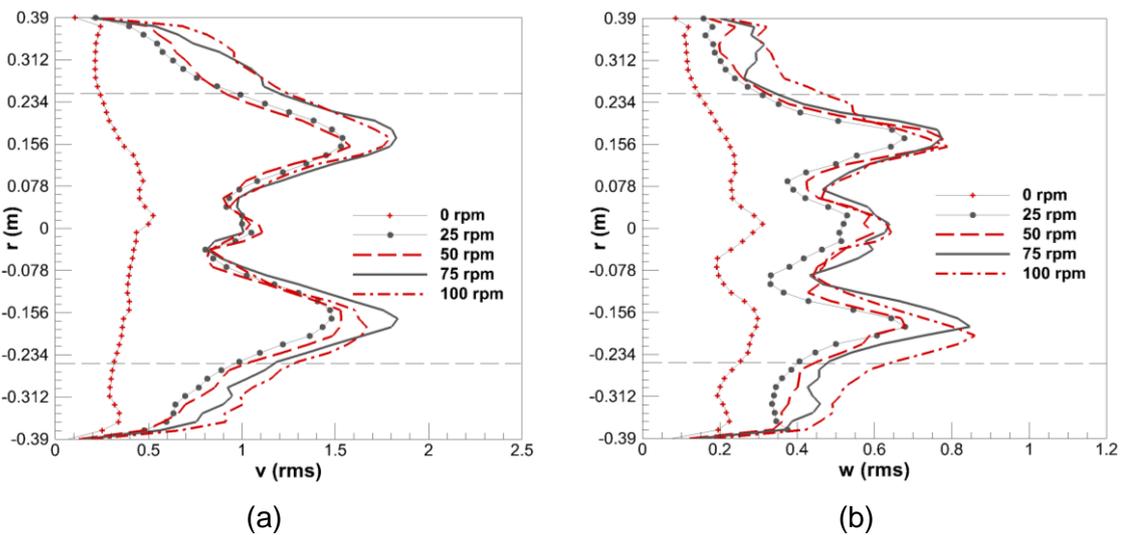


Figura 5.42 – Distribuição de intensidade de turbulência na posição $z=2.49\text{m}$; (a) v_{rms} , (b) w_{rms} .

flutuações (Figura 5.41). Ressalta-se, novamente, que as diferenças são sempre relativas à configuração com broca PDC e H1.

Como registrado antes, as principais mudanças acontecem pela geometria da broca, que resulta muito diferente a partir do plano de saída dos bocais. A componente w da velocidade média modifica o padrão da distribuição nas proximidades do fundo de poço (Figura 5.39), agora os perfis apresentam dos picos alinhados com a posição dos bocais em rotação. O incremento da magnitude de ambas as componentes está acima de 100%. Quanto à intensidade de turbulência associada (Figura 5.42), também crescem em magnitude, porém só w_{rms} ultrapassa o 100%.

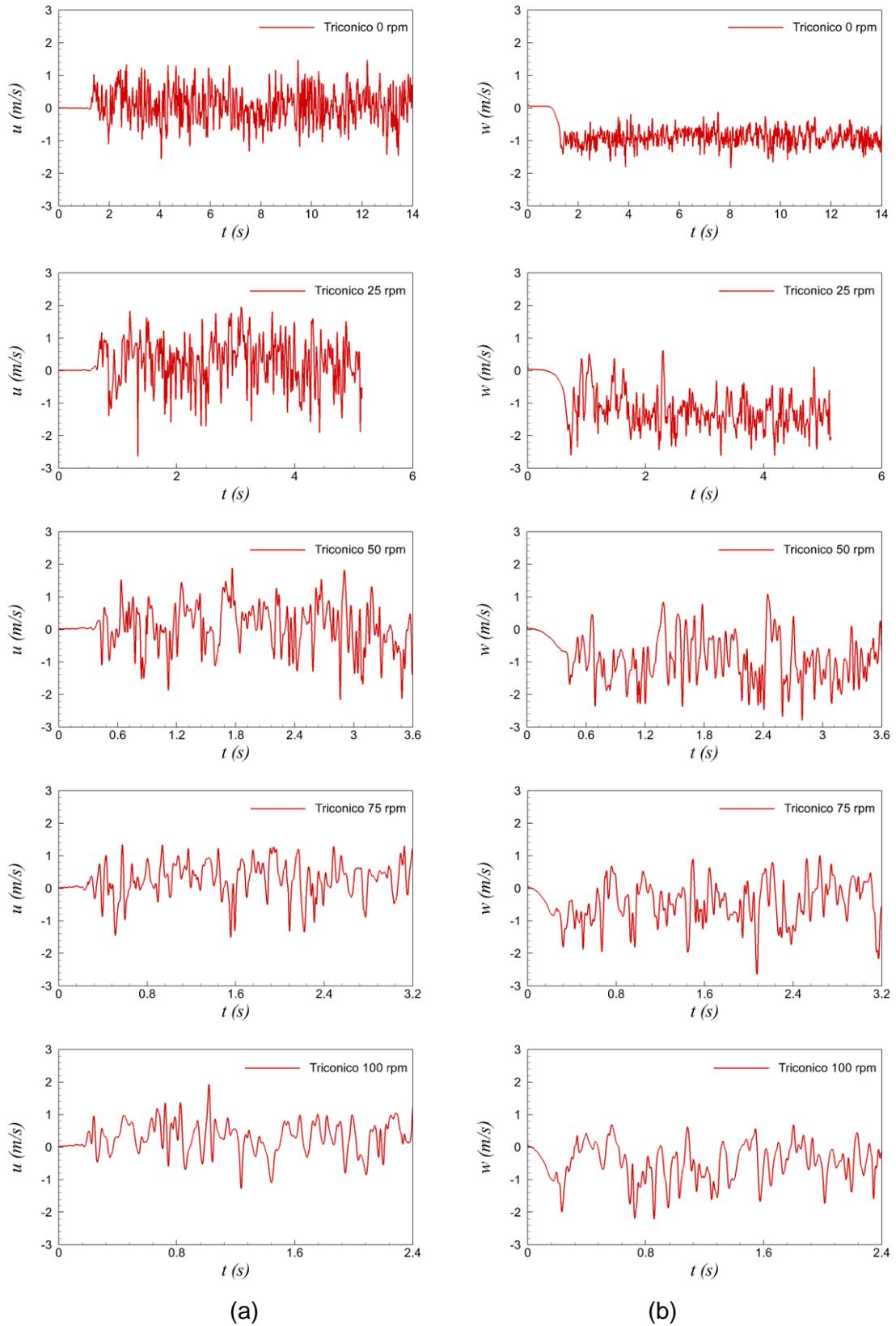


Figura 5.43 – Flutuações da velocidade na sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo Tricônica; (a) v , (b) w .

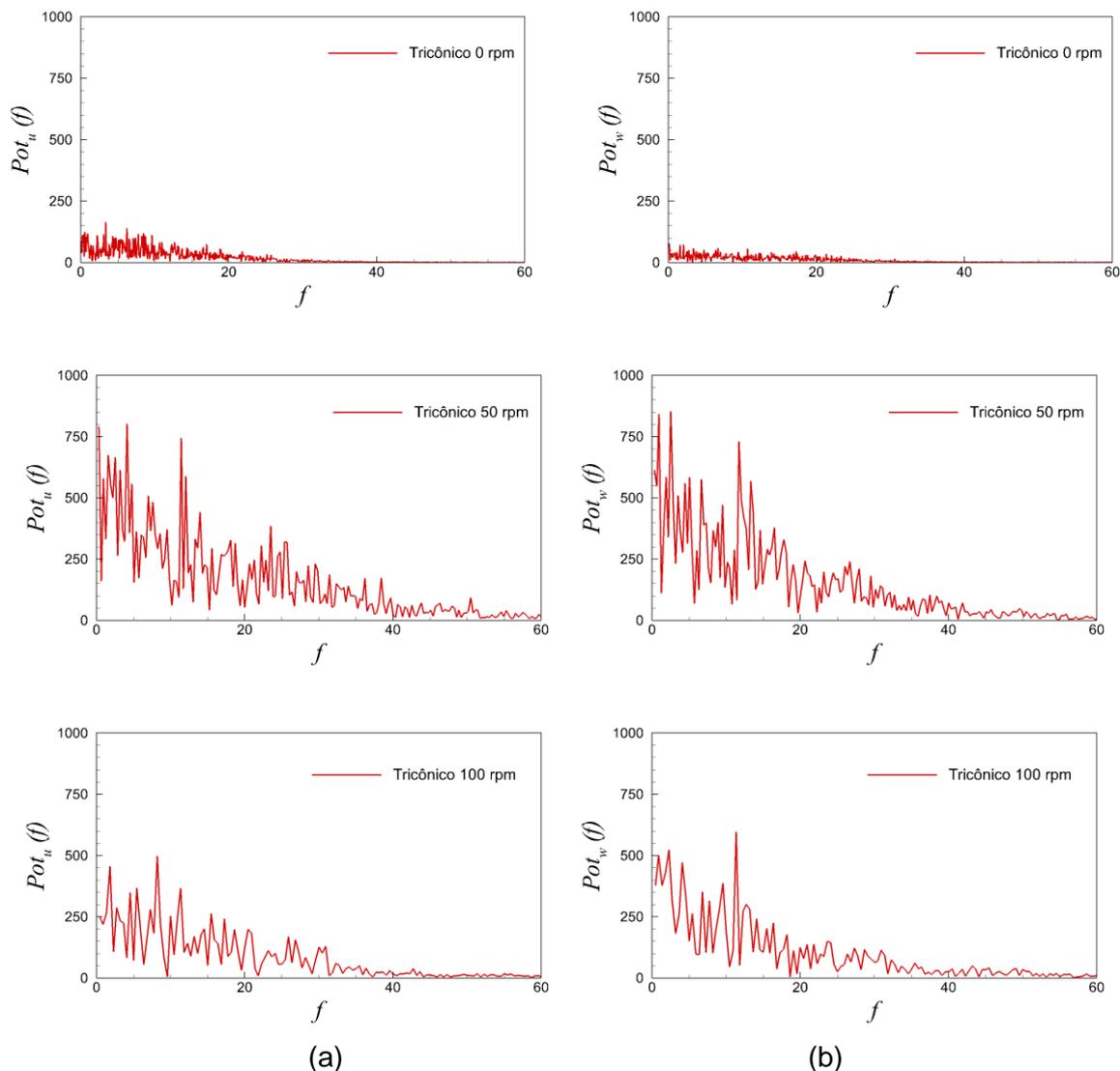


Figura 5.44– Potência espectral das flutuações da velocidade em A(0,43;0,43;2,46) para a broca tipo Tricônica: (a) u e (b) w.

Quando comparam-se as flutuações de velocidade das componente u e w no fundo de poço (sondas A, Figura 5.43) e no duto anular (sonda B, Figura 5.45), há dificuldade de indicar as diferenças que basicamente acontecem na amplitude. No entanto, é notório a diferença para o caso de velocidade de rotação nula, na sonda B, por registrar sinais mais cheios. Ao igual que no caso anterior os espectros de energia correspondente à sonda localizada na parte anular são menos cheios comparados com as sondas localizadas na região do fundo de poço, pela carências de flutuações consequentemente a maior quantidade de escalas em uma região.

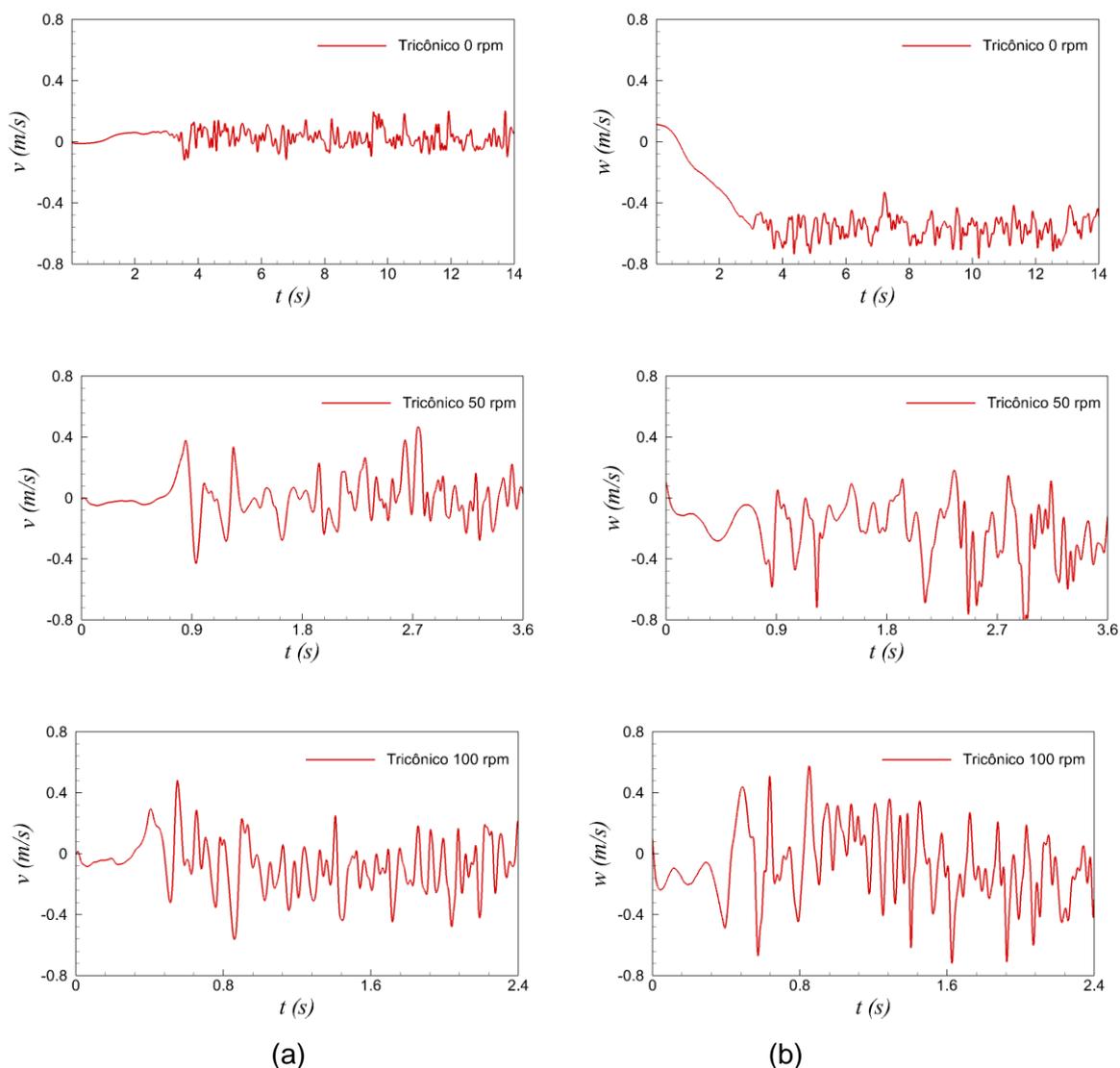


Figura 5.45 – Flutuações da velocidade na sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo tricônica; (a) v , (b) w .

Todas as mudanças na dinâmica dos escoamentos ocasionadas pelo uso da broca Tricônica, destacadas anteriormente, praticamente não mudam a inclinação da zona inercial dos diversos espectros de energia, apresentando também inclinação levemente maior que $-5/3$ em todos os casos considerados. O valor único da inclinação dos espectros confirma o regime turbulento dos escoamentos tratados, nas figuras Figura 5.46 e Figura 5.47.

As estruturas turbilhonares presentes nos escoamentos com diferentes velocidades de rotação, na configuração com broca tricônica (Figura 5.48), apresentam similar distribuição ao longo do poço em perfuração. Novamente, difícil discernir sobre os efeitos da dinâmica diferenciada sobre a topologia das estruturas turbilhonares, principalmente nas proximidades do fundo de poço.

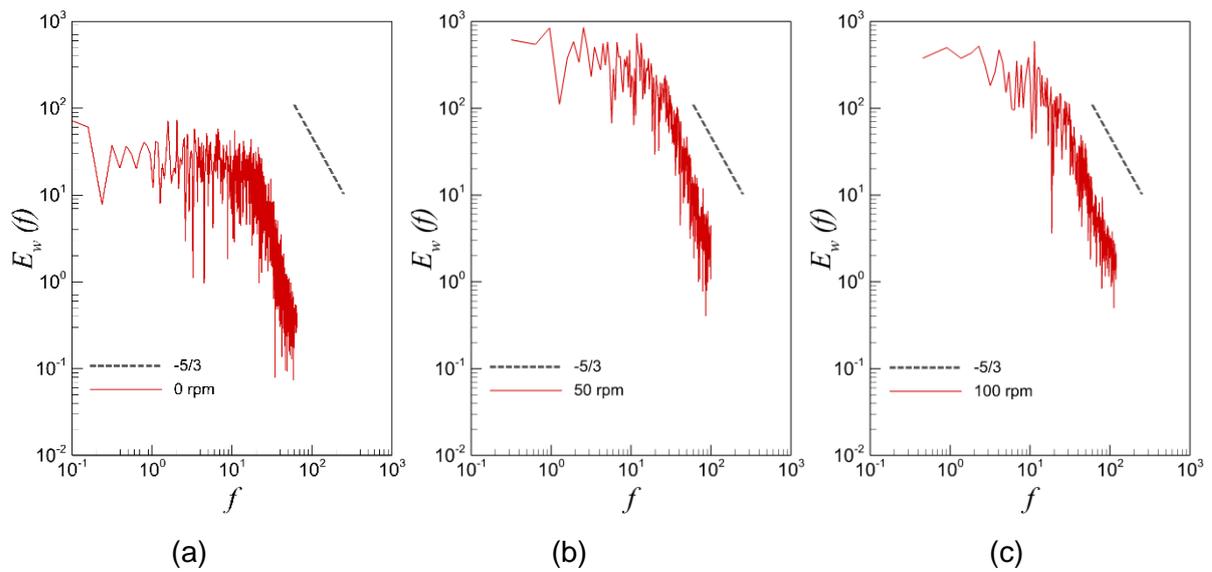


Figura 5.46 – Espectro de energia da componente w ; sonda A(0,43;0,43;2,46); broca tipo Tricônica; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm.

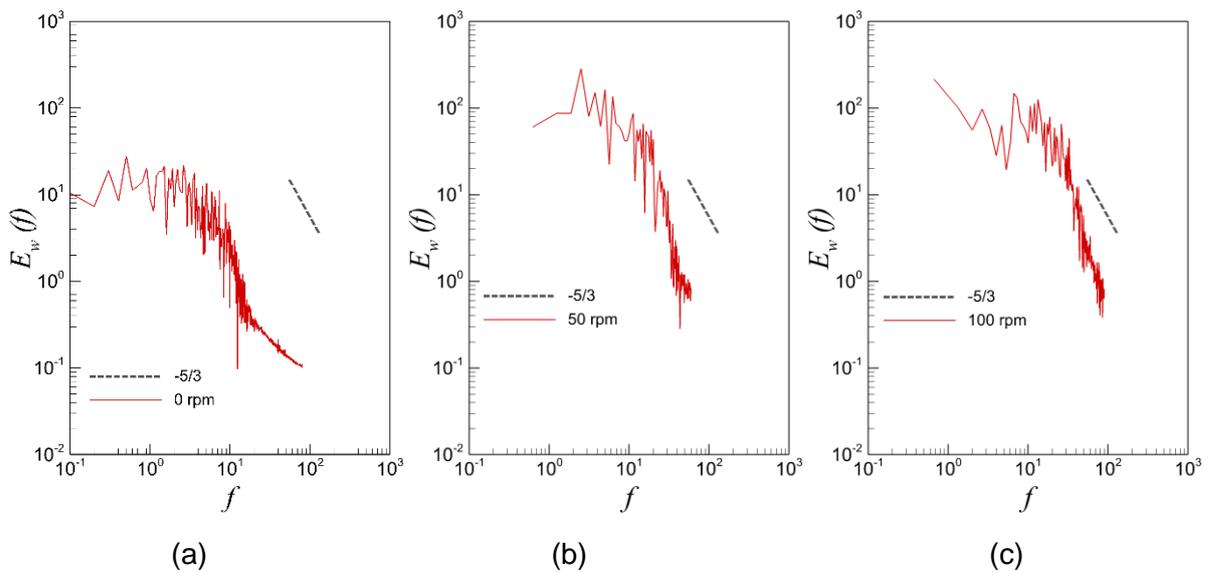


Figura 5.47 – Espectro de energia da componente w ; sonda B(0,43;0,11;1,5); broca tipo Tricônica; (a) 0rpm (b) 50 rpm (c) 100 rpm.

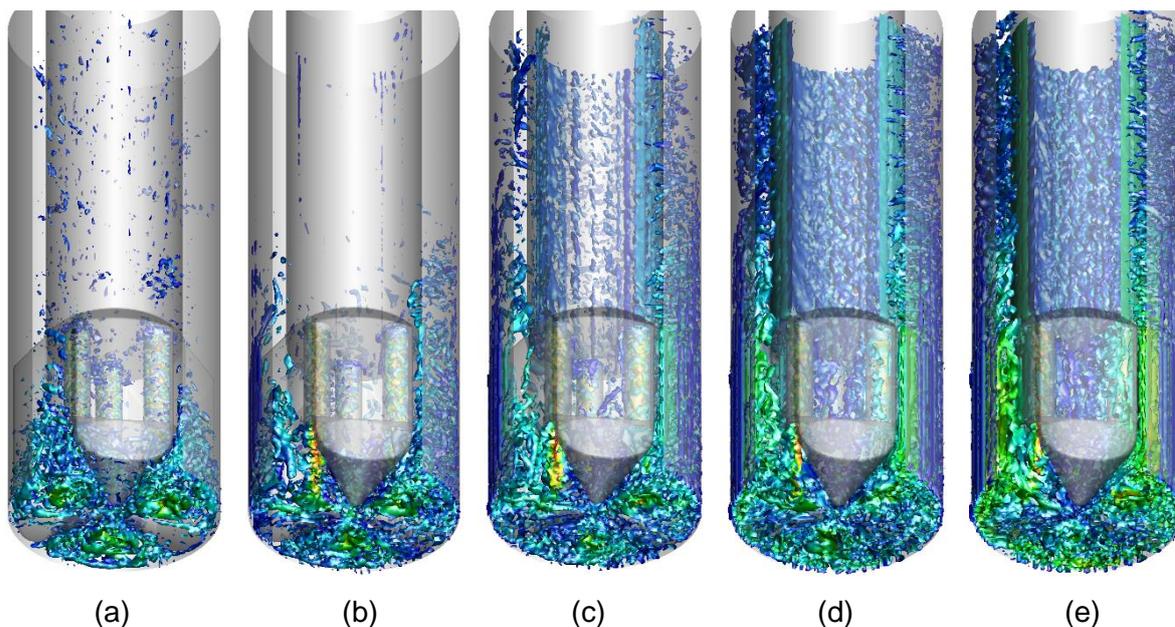


Figura 5.48 – Broca Tricônica; altura do bocal 345,91mm; representação das estruturas turbilhonares utilizando o critério Q. (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 50 rpm (d) 75 rpm (e) 100 rpm.

5.3.3 Comparações, influências geométrica e mecânica.

As três configurações propostas são consideradas para comparações específicas sobre o padrão dos escoamentos (usando linhas de corrente) na região das brocas, pressão no fundo do poço, força de impacto e queda de pressão. As três configurações correspondem às duas posições dos bocais para a broca PDC com alturas $H_1=90,43$ mm e $H_2=110,43$ mm e a broca tricônica com $H=345.91$ mm.

Nas Figura 5.49, Figura 5.50 e Figura 5.51 as linhas de corrente baseados nos campos médios de velocidades são mostradas, para três valores de velocidade de rotação, projetados sobre os planos médios XZ e YZ. Os planos coloridos com a componente axial da velocidade. Vórtices são evidenciados no espaço entre os jatos (centro) e do lado oposto dos jatos, no espaço entre os jatos e as paredes do poço, sendo o primeiro delas de menor tamanho. Por se tratar de campos médios, o vórtice maior é aparentemente toroidal. Em função do incremento da velocidade de rotação, o vórtice toroidal incrementa seu tamanho, enquanto o outro está confinado no espaço de altura H. Por outro lado, a altura H também altera o tamanho dos vórtices no fundo de poço de forma proporcional ao incremento de H; assim, para configuração com broca tricônica ambos os vórtices são mais alongados que para casos com o outro tipo de broca (Figura 5.49 para H_1 e Figura 5.50 para H_2). Na entrada do duto anular, alguns casos apresentam um vórtice mais próximo da coluna de perfuração; isto explica as mudanças no módulo da velocidade, cuja direção (em alguns trechos) é contrária a direção do escoamento na parte anular mostrado nas Figura 5.22(b) e Figura 5.40(b).

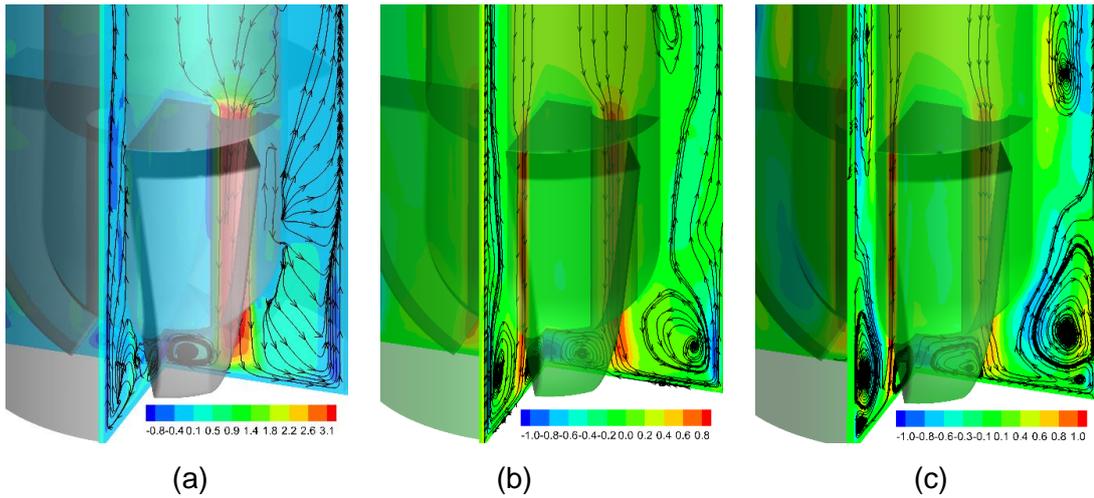


Figura 5.49 – Broca PDC-H1; linhas de corrente; (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 100 rpm.

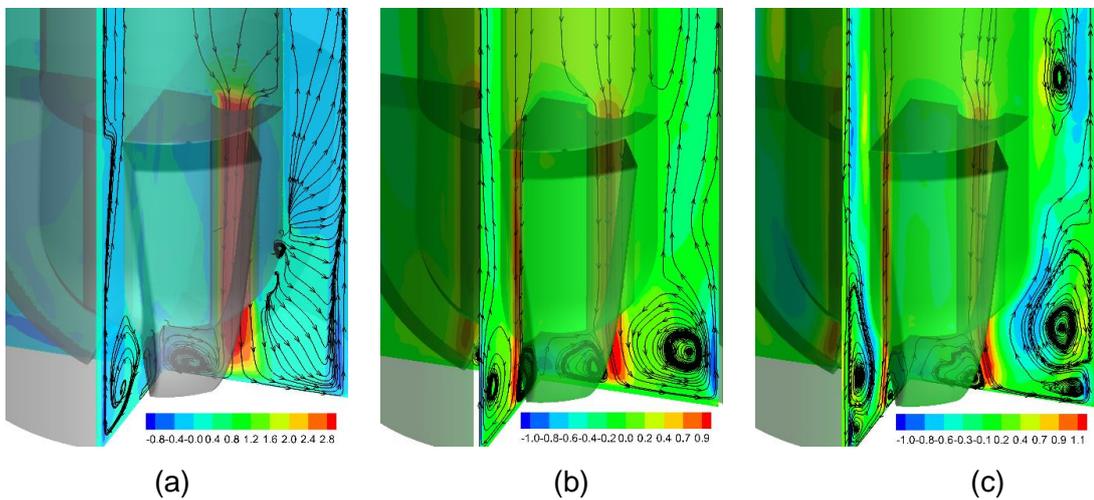


Figura 5.50 – Broca PDC-H2, linhas de corrente; (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 100 rpm.

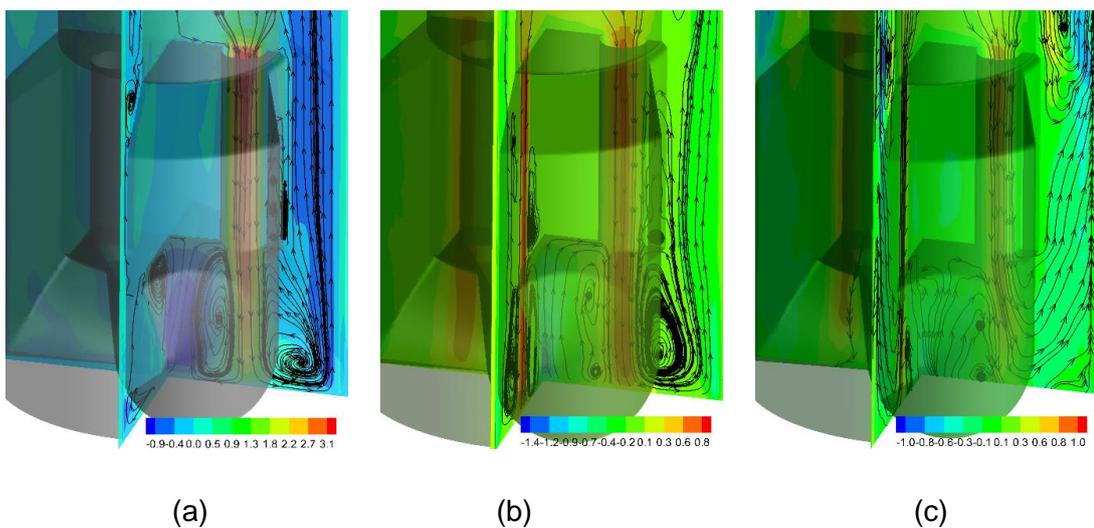


Figura 5.51 – Broca Tricônica; linhas de corrente; (a) 0rpm (b) 25 rpm (c) 100 rpm.

A dinâmica dos escoamentos tem influência direta na pressão estática exercida na superfície do fundo de poço, sendo esta característica fundamental para determinar o parâmetro operacional de grande interesse nos projetos de perfuração, a força de impacto. Certamente, a geometria da broca e a velocidade de rotação da coluna exercem influência sobre este parâmetro.

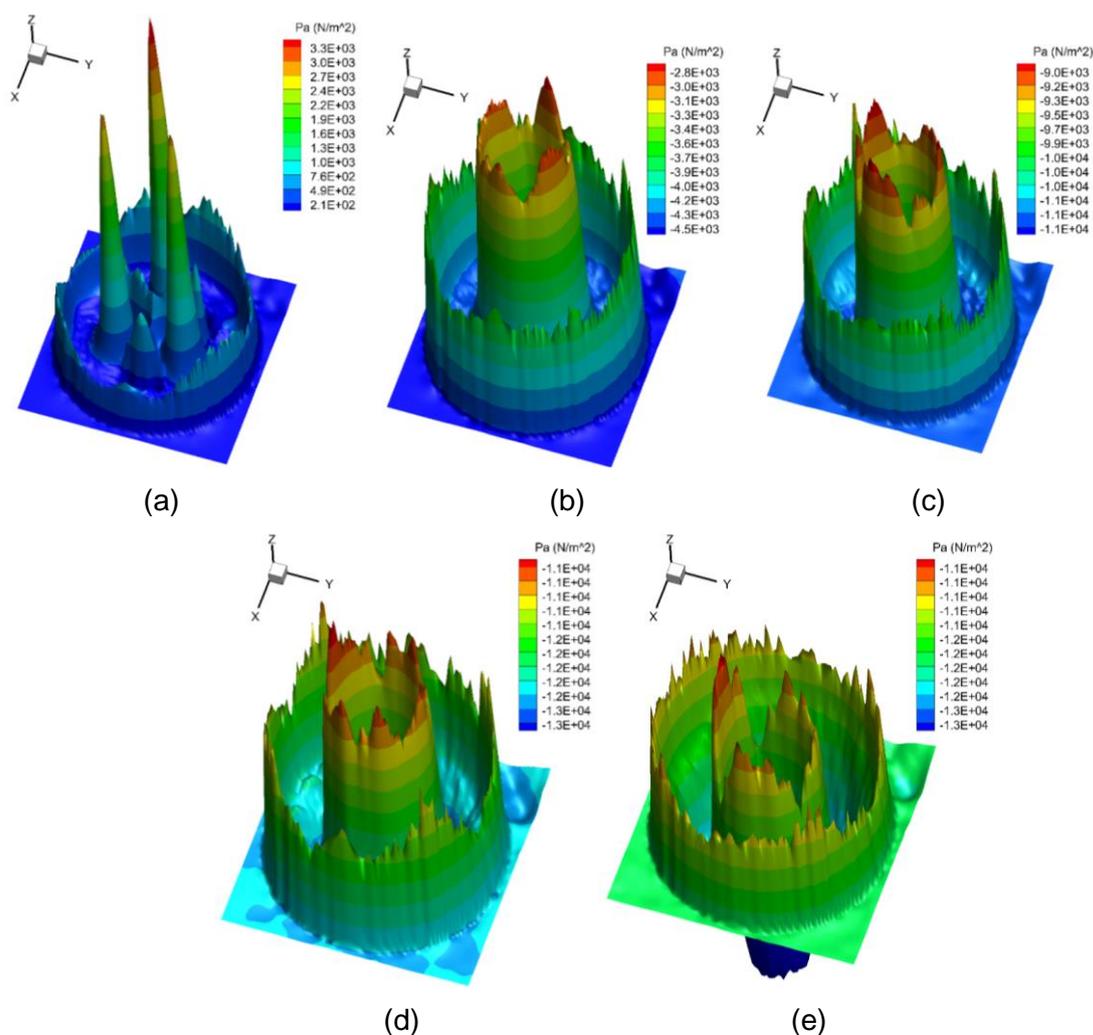


Figura 5.52 – Broca PDC-H1. Magnitude da pressão média no fundo de poço, para rotações: (a) 0 rpm, (b) 25 rpm (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100rpm.

Na Figura 5.52, mostra o campo de pressão na superfície do fundo de poço, para a broca tipo PDC, como consequência do impacto dos jatos na superfície e da quantidade de movimento linear aplicada pelo escoamento de retorno. Pelo balanço de quantidade de movimento linear, no fundo de poço tem um aumento na pressão estática do fluido, no entanto tem uma queda de energia correspondente a pressão total. Para o caso sem rotação é registrado um aumento leve (Figura 5.52a), e duas regiões de circunferências concêntricas para os casos com rotação (Figura 5.52b - e). Este padrão se repete para a configuração com

broca tricônica (Figura 5.53), diferindo principalmente em magnitude, que em média resulta maior para broca tricônica.

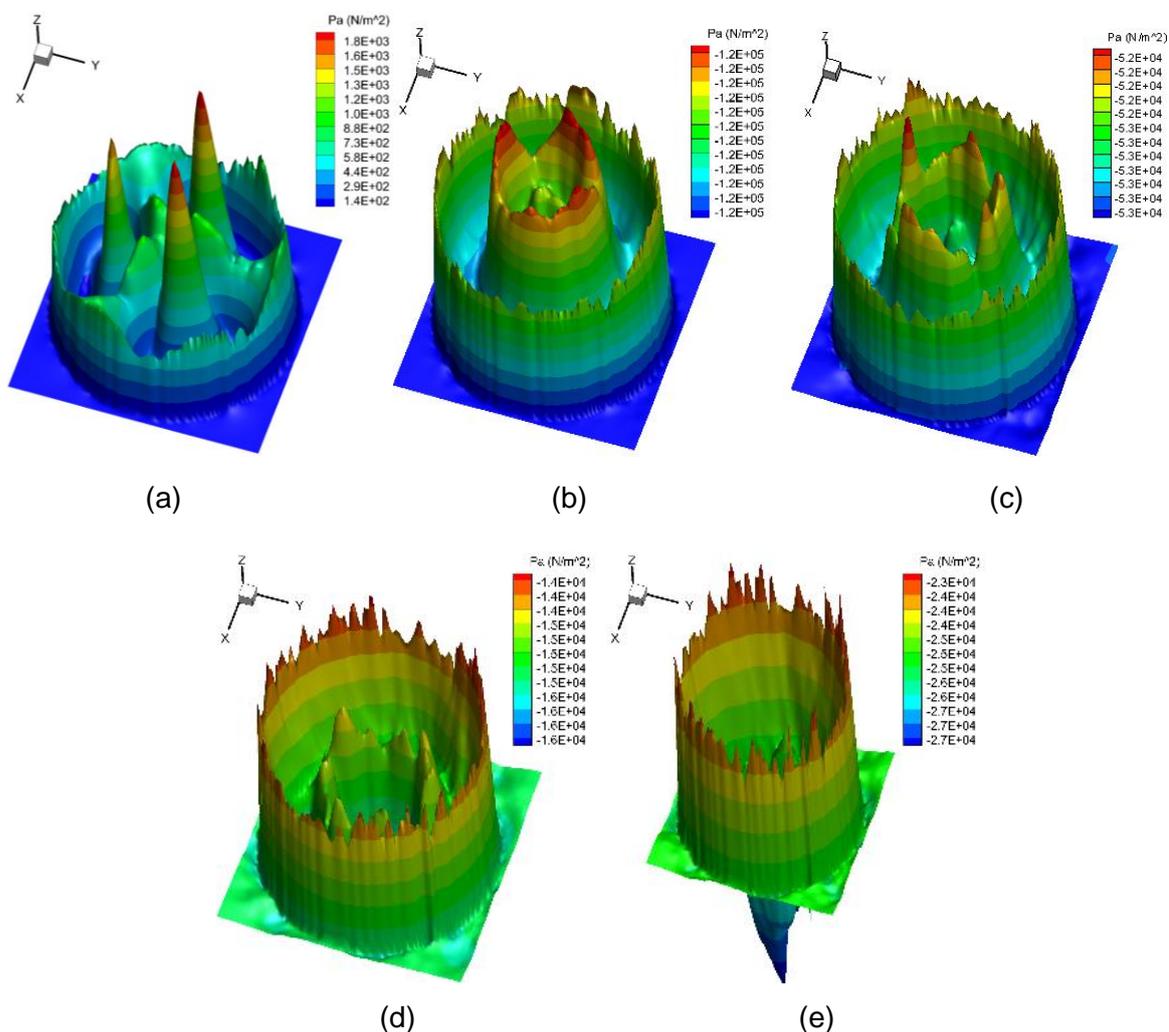


Figura 5.53 – Broca Tricônica. Magnitude da pressão média no fundo de poço, para rotações: (a) 0 rpm, (b) 25 rpm (c) 50 rpm, (d) 75 rpm, (e) 100rpm.

Conhecido o campo de pressão no fundo de poço é possível calcular a força de impacto, mas como foi mencionado na seção 2.4, será utilizado o método de fronteira imersa para o cálculo desta grandeza. Nas seguintes figuras mostra-se a força resultante produto das componentes nas 3 direções no fundo de poço. O aumento desta grandeza beneficiará na remoção do material particulado, no entanto o preço disto é o aumento das revoluções do motor da bomba, como será analisado nos gráficos posteriores.

A seguinte figura mostra a variação da magnitude da força de impacto influenciado pela altura de afastamento do bocal com relação à superfície do fundo de poço; para a broca tipo PDC Figura 5.54 (a) nesta figura tem-se o aumento da magnitude da força de impacto para altura do bocal de 110,43 mm, ou seja, o bocal mais afastado do fundo de poço, esse

resultado tem concordância com os resultados apresentados por (FIGUEIREDO, 2014). Valores maiores evidenciados na Figura 5.54 (b) correspondem ao tipo de broca tricônica, para o mesmo valor de rotação. Observe-se que estes valores são uma média espacial (sobre a superfície do fundo do poço), e quando denominados de força média implica também uma média no tempo.

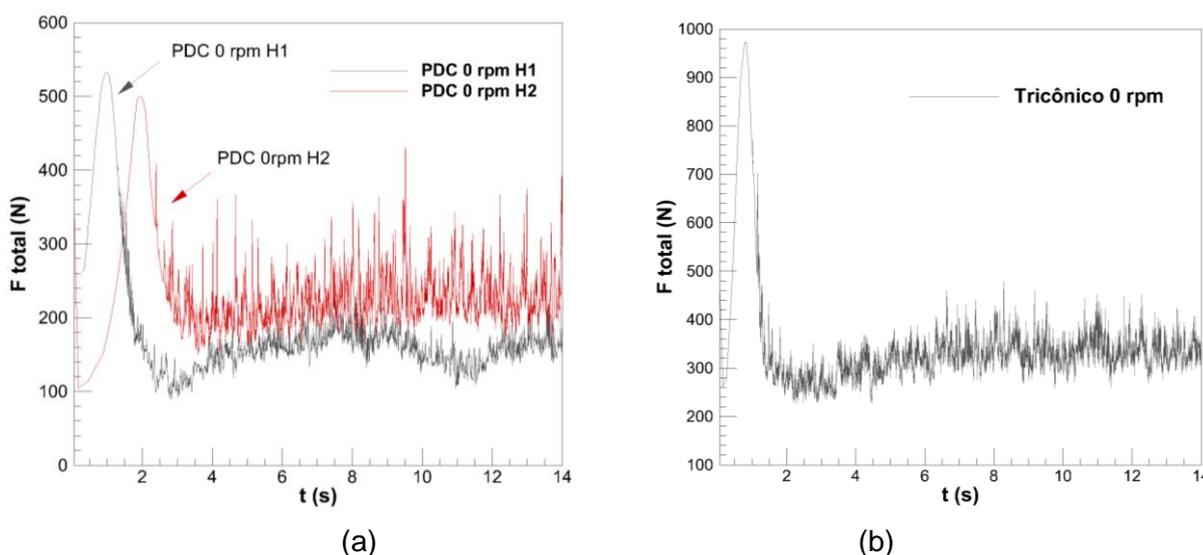


Figura 5.54 – Força total no fundo de poço, variação temporal. (a) broca PDC (b) broca tricônica.

Os valores médios são apresentados na Tabela 5.2, correspondes aos sinais anteriores. A maior força de impacto é correspondente à broca tricônica com aproximadamente 100 N de diferença comparado com a broca PDC-H2.

Tabela 5.2 – Valores médios da força de impacto no fundo de poço para os tipos de broca PDC e Tricônica.

Tipo de Broca	PDC		Tricônica
Altura do bocal	H1 (mm)	H2 (mm)	H(mm)
	90,43	110,43	345,91
Força (N)	160.476	229.245	333.32

Os sinais de força de impacto influenciados pela rotação são mostrados na Figura 5.55, para as brocas PDC-H2 e tricônica. As oscilações aumentam com a taxa de rotação, originando picos produto da alta intensidade. Tais sinais em valores médios são apresentados na Figura 5.56, que explicita a força de impacto como função da taxa de rotação. É percebido

que a tendência das curvas formadas pelos pontos de força de impacto para as brocas tipos PDC-H1 e H2 é parabólica, pelo contrario para o tipo Tricônica é de uma ordem maior. Isto é, a velocidade de rotação incrementa a força de impacto até aproximadamente 50 rpm, valor a partir do qual apresenta decremento. Conforma-se ainda, como indicado pelos campos de pressão, que com a broca tricônica, a força de impacto resulta maior que com as de tipo PDC, seguida pela configuração com a broca PDC de altura H2. Valores pontuais são encontrados na Tabela 5.3.

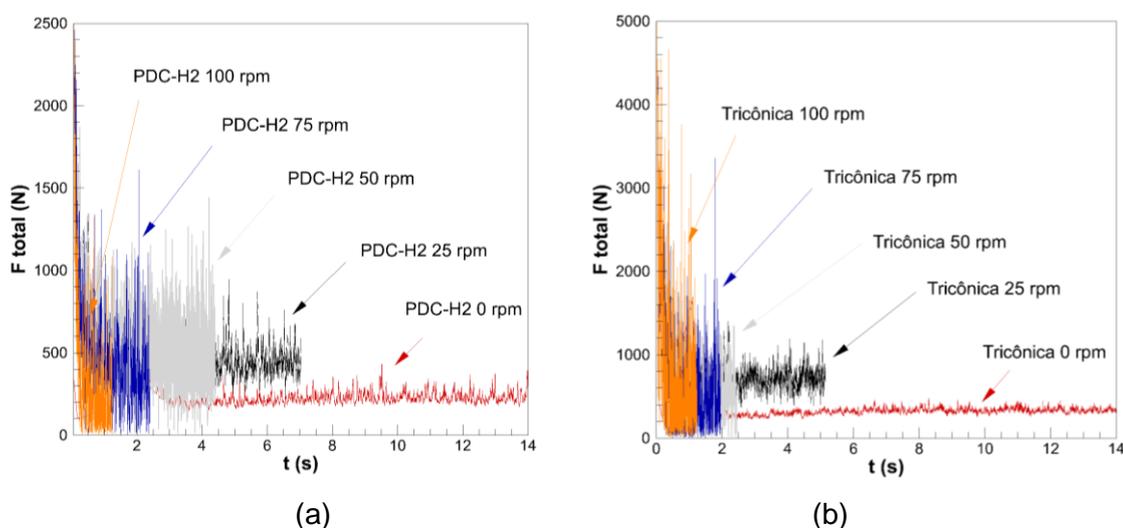


Figura 5.55 – Sonda de força de total no fundo de poço, para diferentes valores de rotação. Variação temporal. (a) broca PDC-H2 (b) broca tricônica.

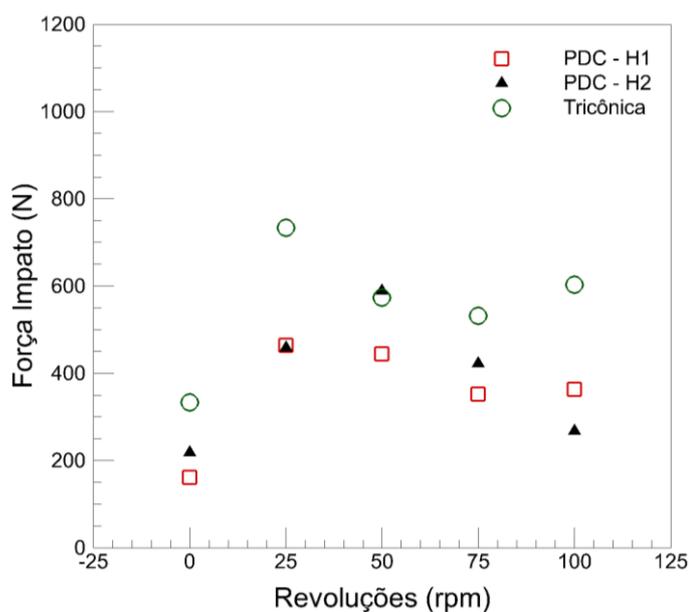


Figura 5.56 – Força de impacto influenciado pela rotação das brocas propostas.

Tabela 5.3 – Valores médios da força de impacto para os tipos de broca PDC e Tricônica, influenciados pela rotação, correspondentes a Figura 5.56.

Tipo de broca			
	PDC H1	PDC H2	Tricônica
RPM	F (N)	F (N)	F (N)
0	160,477	217,700	333,329
25	463,184	457,937	733,861
50	443,955	588,616	573,192
75	351,578	422,116	531,397
100	362,665	267,296	603,003

É interessante saber a influência da rotação na queda de pressão, isso calcula-se a diferença da pressão entre a entrada e saída. Na Tabela 5.4, tem-se valores de pressão média espacial na posição $z = 0 \text{ m}$ sendo os valores $r \leq 0,25$ e na posição $z = 0,5 \text{ m}$ para todos os valores $0,25 \leq r \leq 0,39$ (região anular), correspondentes na entrada e saída do escoamento respetivamente. Para o caso da broca tipo PDC as quedas de pressão aumentam conforme a rotação cresce, isto significa que, por balanço de quantidade movimento linear, altas velocidades estão sendo transformadas em pressão ao longo do trajeto do escoamento.

Tabela 5.4 – Influência da rotação na diferença de pressão na entrada e saída, tipo de broca PDC-H1.

Revolução	Pressão (P^*)		$P_e - P_s$	
	$P_e \text{ z}=0\text{m}$	$P_s \text{ z}=0,5\text{m}$	Pa (N/m²)	mH2O
0 rpm	8174,741	427,971	7746,770	0,790
25 rpm	9032,121	-3999,129	13031,250	1,329
50 rpm	3188,492	-13494,129	16682,621	1,701
75 rpm	-1789,873	-21602,871	19812,998	2,020
100 rpm	12085,264	-11795,137	23880,401	2,435

A queda de pressão para os casos de rotação aumenta para a broca Tricônica como esperado, no entanto os valores de queda de pressão da Tabela 5.5 são maiores comparados com os valores da tabela anterior, a partir da velocidade de rotação 25 rpm.

Tabela 5.5 – Influência da rotação na diferença de pressão na entrada e saída, tipo de broca Tricônica.

Revolução	Pressão (P^*)		$P_e - P_s$	
	P_e z=0m	P_s z=0,5m	Pa (N/m ²)	mH ₂ O
0 rpm	7915,395	368,048	7547,348	0,770
25 rpm	-101698,886	-114219,194	12520,308	1,277
50 rpm	-29619,593	-56678,318	18549,947	1,892
75 rpm	11789,082	-25856,812	22522,618	2,297
100 rpm	2508,684	-43542,502	25558,893	2,606

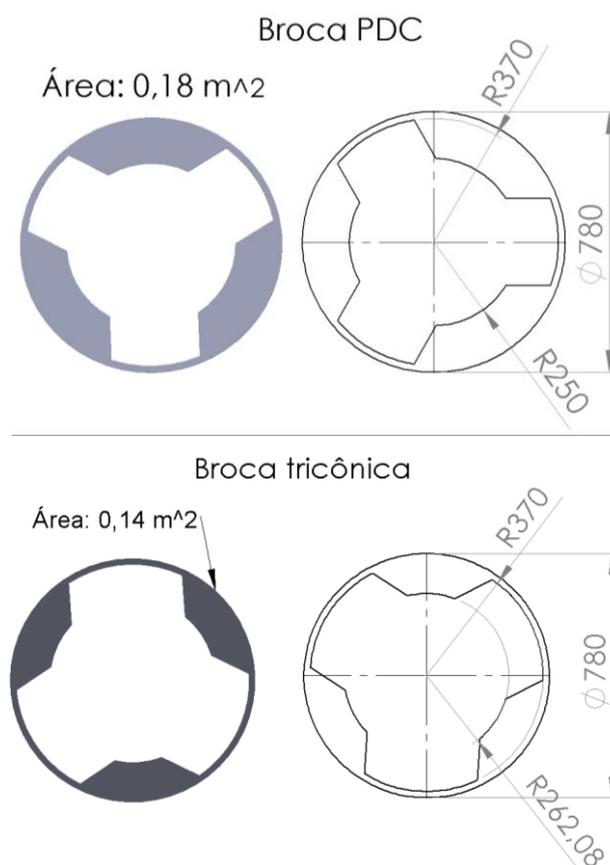


Figura 5.57 – Áreas de seções transversais na região entre a broca e o poço. Unidades de cotas em milímetros.

Uma de muitas explicações de porque os valores de queda de pressão para a broca tipo tricônica são maiores que para a broca tipo PDC, é dada pelo tamanho da seção de passo do escoamento entre o fundo de poço e a parte anular. Como observado nas ilustrações precedentes das Figura 5.40 (a) e Figura 5.22(a), os valores do módulo da velocidade axial são maiores na região anular para o tipo da broca Tricônica, isto influenciado também por

uma diminuição da área de passo do escoamento (espaço entre as aletas das brocas), como apresentado na Figura 5.57.

Finalmente, os gráficos de barras (Figura 5.58) mostram os valores de queda de pressão cumprindo um padrão proporcional aritmético à velocidade de rotação da coluna de perfuração em ambos os tipos de broca. Esta informação é importante na hora de realizar o balanço de custos para ter em consideração o ADT que a bomba de lama de perfuração deve atingir.

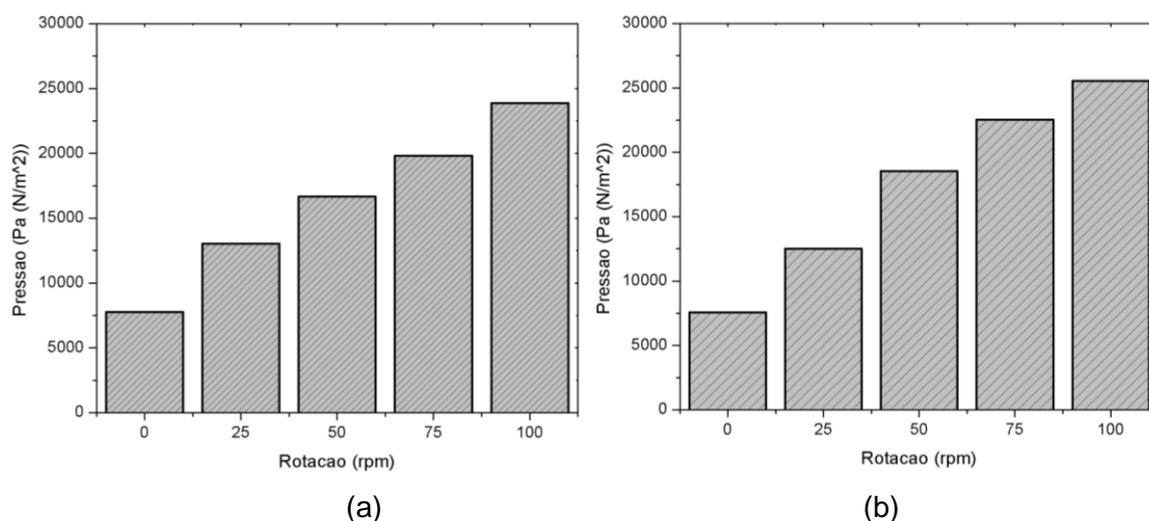


Figura 5.58 – Valores de queda pressão com influência da rotação. (a) broca tipo PDC-H1, (b) broca tipo Tricônica.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A forma do perfil de velocidade muda espacialmente em relação à mudança de seção dentro da coluna de perfuração.

Todos os perfis de velocidade apresentados mostraram influências diretamente proporcionais à taxa de rotação, sendo estas acrescentadas na magnitude em cada componente.

Conforme aumenta as revoluções, para um valor de magnitude da velocidade axial, é encontrada na forma de uma estrutura helicoidal, até atingir comprimentos de onda menores da estrutura para a rotação 100 rpm.

Na região do fundo (entre a broca e a superfície do fundo de poço), foi evidenciada maior quantidade de escalas, comparado com a região anular. Isto influencia o escoamento no duto anular, já que as escalas são transportas por advecção e difusão.

A intensidade turbulenta é amplificada conforme o aumento de revoluções, isto foi mostrado graficamente com as isosuperfícies para um valor de razão entre a viscosidade turbulenta e a viscosidade molecular.

A região com maior intensidade turbulenta é encontrada entre a superfície do fundo de poço e a broca, confirmado quantitativamente pelos perfis de valores rms de cada componente da velocidade na mencionada região.

Elevados valores de magnitude de pressão estática são apresentados na superfície do fundo de poço, evidenciados pelos campos de pressão tridimensionais.

A influência da posição do bocal da broca para o tipo PDC IADC M433 é mostrada no aumento na magnitude da força de impacto, quando é afastado 20 mm da superfície do fundo do poço.

A queda de pressão cumpre um aumento proporcional aritmético, com a velocidade de rotação para ambos tipos de brocas.

O espectro de energia cinética turbulenta, para as posições do fundo de poço e região anular, em ambos tipos de brocas, mostraram uma inclinação maior a $-5/3$ por ter uma maior injeção de energia, na banda de grandes escalas, isto é coerente já que a potência mecânica entregue para a coluna de perfuração é proporcional ao cubo das revoluções. Porém tem mais escalas pequenas que estão recebendo energia das grandes escalas que são em menor quantidade.

Os maiores valores de queda de pressão para velocidades de rotação maiores iguais a 25 rpm, foram apresentados no caso do domínio composto pela broca Tricônica. Um dos fatores identificados como causa da queda de pressão deste tipo de broca foi a área de passo do escoamento.

As equações de Navier-Stokes, a equação de continuidade, o modelo de fechamento para a metodologia LES e o método de fronteira imersa descrevem muito bem o comportamento do escoamento em uma região crítica do processo de perfuração.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Suavizar a entrada nos bocais, melhorando a fluidodinâmica da geometria, baseado no análise da trajetória das linhas de corrente.

Estudar a influência da mudança do ângulo de inclinação dos bocais, e saber se a magnitude da força de impacto muda; encontrar benefícios nestas novas posições.

Melhorar a fluidodinâmica das aletas da broca PDC, para ver a influência disso na queda de pressão.

Adicionar movimento de rotação no próprio eixo dos cones no tipo de broca tricônica.

Considerar a influência de diferentes números de Reynolds, nas grandezas fluidodinâmicas em estudo.

Impor outros parâmetros mecânicos, como a vibração axial e/ou radial na coluna de perfuração, e ver a influência disto nas grandezas fluidodinâmicas em estudo.

Utilizar um fluido não Newtoniano do tipo lei de potência.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIAN, R.; MEINHART, C.; TOMKINGS, C. Observation of vortex packets in direct numerical simulation of fully turbulent boundary layer. **J Fluid Mech** **422**: 1-54, 2000. <https://doi.org/10.1017/S0022112000001580>

ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics, the basics Applications**. First. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995.

ANDERSSON, B. et al. **Computational Fluid Dynamics for Engineer**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

APPGWIKI. APPGWiki, 11 March 2019. Disponível em: <<https://wiki.aapg.org/>>. Acesso em: 15 Julho 2019.

ARAGÃO, A. P. **Estimativa da contribuição do setor petróleo ao produto interno bruto Brasileiro: 1995/2004**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio Janeiro. 2005.

BAKER-HUGHES. Baker-Hughe a GE company, 2019. Disponível em: <www.bhge.com>.

BORGES, J. E. **Modelagem Matemática e simulação de escoamentos em canais anulares com interação fluido-estrutura**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2011. Dissertação Mestrado.

BURINTEKH. BURINTEKH, 2015. Disponível em: <<http://burintekh.com/>>.

CHARCNET. sharcnet, Enero 2019. Disponível em: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfx_thry/thry_turb_sas.html>. Acesso em: 3 Junho 2019.

CHAREUF AFGHOUL, A. et al. Schlumberger, 2004. Disponível em: <https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/sum04/p40_61.pdf>. Acesso em: 10 Fevereiro 2019.

CLARK, R. A.; FERZIGER, J. H.; REYNOLDS, W. C. **Evaluation of subgrid-scale models using an accurately simulated turbulent flow**. Stanford University. [S.l.]. 1979. <https://doi.org/10.1017/S002211207900001X>

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. On the partial difference equations of mathematical physics, v. 11, 1967. <https://doi.org/10.1147/rd.112.0215>

CRANE. **Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías**. Tradução de S.A. VALFISA. [S.l.]: McGRAW-HILL. CUCEI, CID.

DAVIDSON, L. **Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling**. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2017.

DAVIDSON, P. A. **Turbulence an Introduction for scientists and engineers**. First. ed. [S.l.]: [s.n.], 2004.

DRILLING Engineering. Edinburgh: [s.n.], 2005.

DURST, F.; LOY, T. Investigation of laminar flow in a pipe with sudden contraction of cross sectional area., v. 13, p. 15-36, 1983. Received 27 November 1983. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(85\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0045-7930(85)90030-1)

FELICES, A. R. **Hidráulica de Tuberías y Canales**. Universidad Nacional de Ingeniería. [S.l.], p. 515. 2007.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Third. ed. Verlag Berlin Heidelberg New York: Springer, 2002. Acesso em: 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>

FIGUEIREDO, L. M. **Investigação numérica da força de impacto e do coeficiente de descarga em bocais ejetores de brocas de perfuração**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2014.

FORD, J. **Drilling Engineering**. Manual. [S.l.]: [s.n.]. 2017. Institute of Petroleum Engineering.

GERMANO, M. et al. A dynamic subgrid scales eddy viscosity model, v. 3, July 1991. Phys. Fluids A. <https://doi.org/10.1063/1.857955>

GRANT-PRIDECO, N. **Drilling Products & Services**. Catálogo. [S.l.]: [s.n.]. 8 March 2017.

HUGHES INTEQ, B. **Drilling Engineering Workbook**. Workbook. Houston: Backer Hughes INTEQ. 1995.

HUNT, J. C. R.; WRAY, A. A.; MOIN, P. Eddies, Stream and Convergence Zones in turbulence Flows, n. N89-24555, p. 193-208, 1988. Center for Turbulence Research Proceeding of the Summer program.

IADC. **Drilling Manual**. eBook version (V.11). [S.l.]: [s.n.]. 2000.

INC, W. D. T. Western Drilling Tools Inc. Disponível em: <<https://westerndrilling.ca/product/drag-bits/>>. Acesso em: 7 Julho 2019.

JEREH. Jereh. Disponível em: <<http://www.jereh-oilfield.com/spain/>>. Acesso em: 12 Julho 2019.

KAHTIWADA, J. A. **Drill Bit types Advantages and Disadvantages**. Presentation. [S.l.]: [s.n.]. Engineering Geology.

KARIMI, M.; MOELLENDICK, E.; HOLT, C. OnePetro, 1 Janeiro 2011. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-147102-MS>>. Acesso em: 08 Agosto 2019. Society of Petroleum Engineers.

KIM, J.; MOIN, P. Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations. **ScienceDirect**, California, p. 308-323, 4 September 1984. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(85\)90148-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(85)90148-2)

KOLÁŘ, V. Vortex identification: New requirements and limitations. **Heat and Flow**, v. 28, p. 638-652, May 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.03.004>

LEONARD, B. P. A Stable and accurate convective modellign procedure based in quadratic upstream interpolation., v. 19, 1979. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3)

LETURE-ANSYS. **Turbulence**. Leture 07. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

LILLY, D. K. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method., v. 3, p. 633-635, March 1992. University of Oklahoma. <https://doi.org/10.1063/1.858280>

LOPES FERREIRA, R. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos usando modelagem Dinâmico**. Universidade Estadual Paulista. São Paulo. 2006.

LOURENÇO, M. A. S. **Desenvolvimento de uma plataforma para computação de alto desempenho de escoamentos transientes, utilizando estrutura octanaria**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2012.

LUDEMA, K. C. **Friction, Wear, Lubrication. A textbook in tribology**. [S.l.]: [s.n.], 1996. <https://doi.org/10.1201/9781439821893>

MANEIRA, E. L. **Estudo da Hidráulica de Brocas de perfuração de Poços-Efeitos de parâmetros do processo de perfuração**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Brasil. 2013.

MATAIX, C. **Mecanica de Fluidos e Maquinas Hidraulicas**. Segunda. ed. [S.l.]: Ediciones de Castillo, S. A., 1986. Acesso em: 10 Agosto 2019.

MELO, R. R. S. **Modelagem e Simulação de escoamentos turbulento com efeitos térmicos, utilizando a metodologia da fronteira imersa e malha adaptiva**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017.

MICON-DRILLING, G. **Micon-Drilling**. Catálogo. [S.l.]: [s.n.]. 2016. p. 43. Drilling Equipment Made in Germany.

MORI, J. et al. Japan Trench Fast Earthquake Drilling Project (JFAST). **Integrated Ocean Drilling Program**, Japan, 2012.

NETWAS GROUP OIL. Netwas Group, 5 May 2018. Disponível em: <<https://www.netwasgroup.us>>. Acesso em: 13 Junho 2019.

NGUYEN, D. T. **Drill Bits technology- Introduction of The New Kymera Hybrid Bit**. University of Stavanger. [S.l.]. 2012.

PADILLA, E. L. M. **Simulação de Grandes Escalas de Transição à Turbulência em sistemas rotativos com Transferência de Calor**. Universidade Federal de Uberlândia. [S.l.]. 2004.

PDVSA. **Fluidos de Perforación**. [S.l.]: [s.n.]. 2002.

PLÁCIDO, J. C. R.; PINHO, R. **Brocas de Perfuração de poços de petróleo**. Apostila. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.]. 2009.

PUELLES, S. C. P. et al. Simulação de escoamentos tridimensionais em um duto com contração abrupta: Efeito da rotação. **POSMEC-2018**, Ubêrlandia, 24 Outubro 2018.

ROMAI, Y. **Fluidos de Perforación**. Apostila. Mexico: [s.n.]. 2008.

SÁNCHEZ, F. M. P. **Estudo Experimental do Escoamento de Fluido Newtoniano em contração abrupta axissimétrica com a técnica de velocimetria por imagem de partículas**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2011.

SCHLUMBERGER. Schlumberger, 2019. Disponível em: <https://www.slb.com/resources/other_resources/catalogs.aspx>. Acesso em: 17 Mai 2019.

SCIENCEDIRECT. ScienceDirect, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/turbulence-intensity>>. Acesso em: 4 Agosto 2019.

SHAANAM, S.; FERZIGER, J. H.; REYNOLDS, W. C. **Numerical Simulation of Turbulence in the Presence of Shear**. Stanford University. [S.l.]. 1975. Trabalho patrocinado por a NASA/ Ames Research Center under Grant NASA-NgR-05-020-622.

SHIH, T.-H.; LIU, N.-S. **Numerical Study of Outlet Boundary Conditions for Unsteady Turbulent Internal Flows Using the NCC**. NASA/TM. [S.l.]. 2009.

SHORT, J. J. A. **Directional and Horizontal Drilling**. Tulsa: PennWellBooks, 1993.

SILVEIRA NETO, A. **Turbulência**. Apostila. Uberlândia, Brasil: [s.n.]. 2019.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. **MONTHLY WEATHER REVIEW**, Washington D.C, v. 93, n. 3, 18 Março 1963. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2)

SMITH, B. P. Schlumberger, 2018. Disponível em: <https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf>. Acesso em: 25 Abril 2019.

SONDAJ EKIPMANLARI, S. V. T. A. Hole Monster, 2012. Disponível em: <<http://www.holemonster.com.tr>>.

SOTIROPOULOS, F.; YANG, X. Immersed boundary methods for simulating fluid-structure interaction. **Elsevier**, v. 65, p. 1-21, February 2014. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2013.09.003>

SOUZA, F. D. **análise dinâmica de uma coluna de perfuração acoplamento lateral-torcional**. Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

TRILINOS. Trilinos, 2019. Disponível em: <<https://trilinos.github.io/>>. Acesso em: 16 Setembro 2019.

VANELLA, M.; BALARAS, E. A moving-least-squares reconstruction for embedded-boundary formulations. **Elsevier**, v. 228, p. 6617-6628, 1 October 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.06.003>

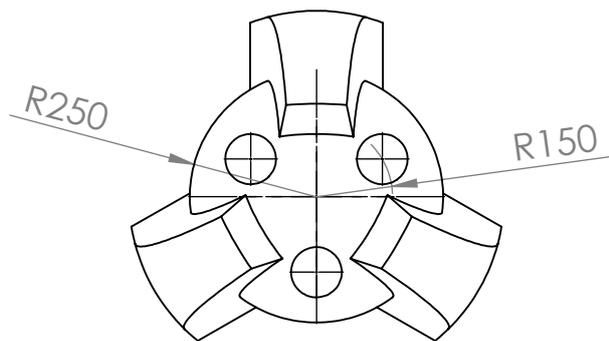
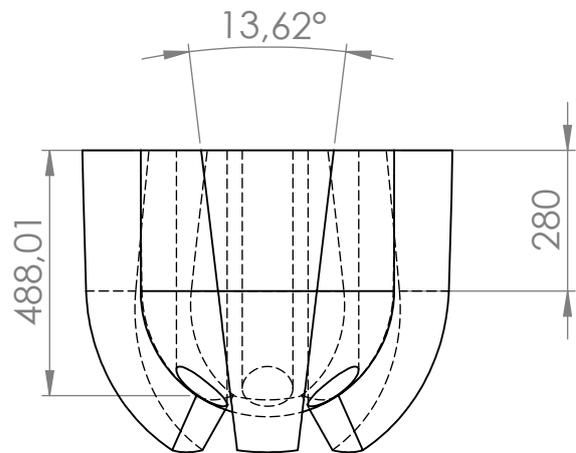
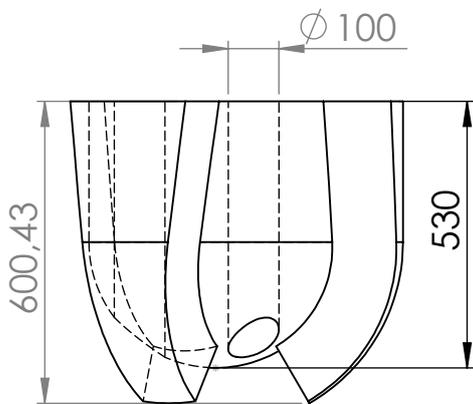
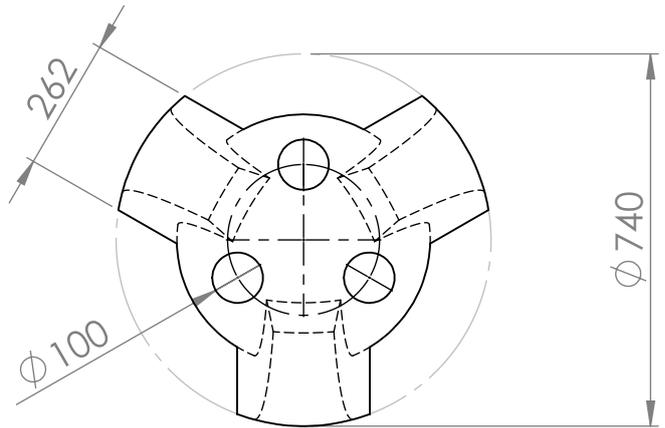
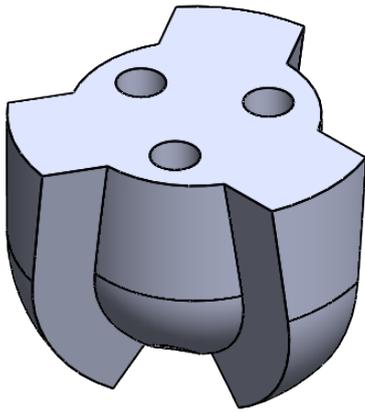
VARGAS, G. H. M.; BENAVIDES, J. A. B. **Perforación de pozos de petróleo con la técnica no convencional casing Drilling**. Universidad Industrial de Santander. Colombia, Bucaramanga. 2011.

VARGAS, G. H. M.; BENAVIDES, J. A. B. **Perforación de pozos de petróleo con la técnica no convencional Casing Drilling**. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011.

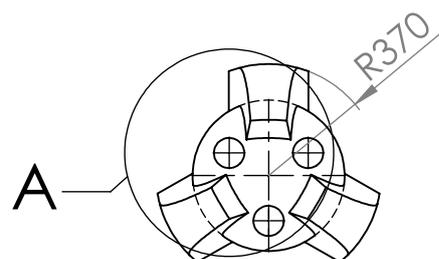
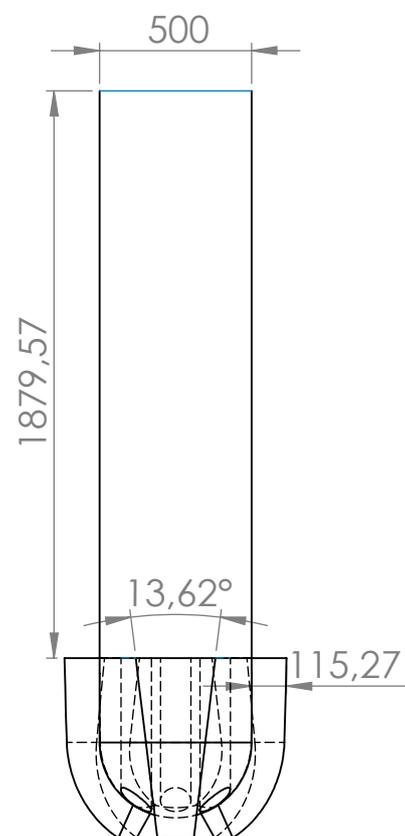
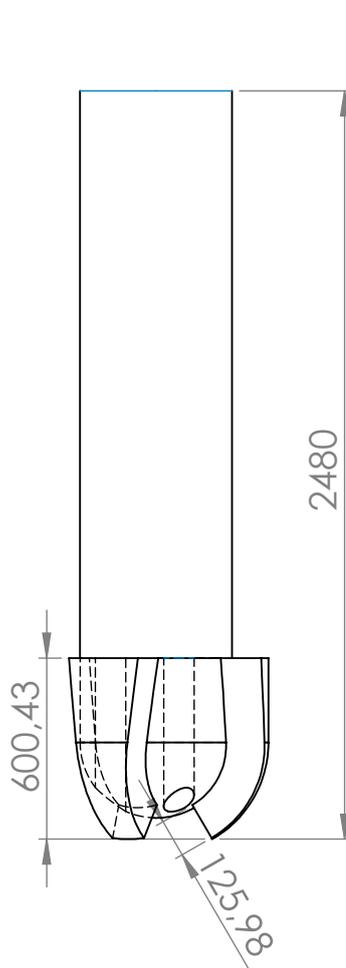
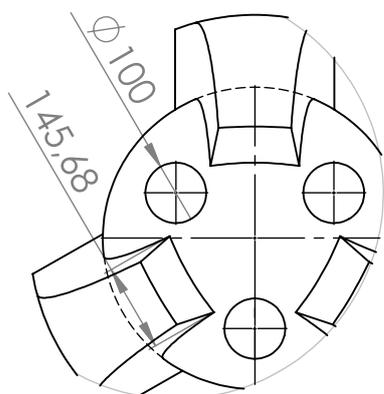
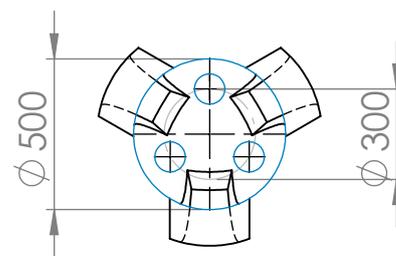
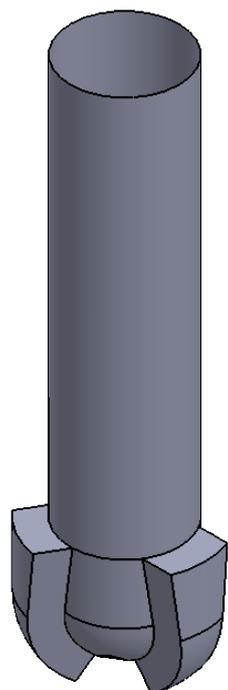
VESTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Segunda. ed. [S.I.]: PEARSON Education, 2007. 1116 p.

WESTERN, D. T. I. Western, 14 August 1995. Disponível em: <https://westerndrilling.ca/wp-content/uploads/2018/02/drill_bits_catalogue-1.pdf>.

WESTERNDRILLING. Western Drilling tools INC. **Drag Bits**. Disponível em: <<https://westerndrilling.ca/product/drag-bits/>>. Acesso em: Abril 2019.



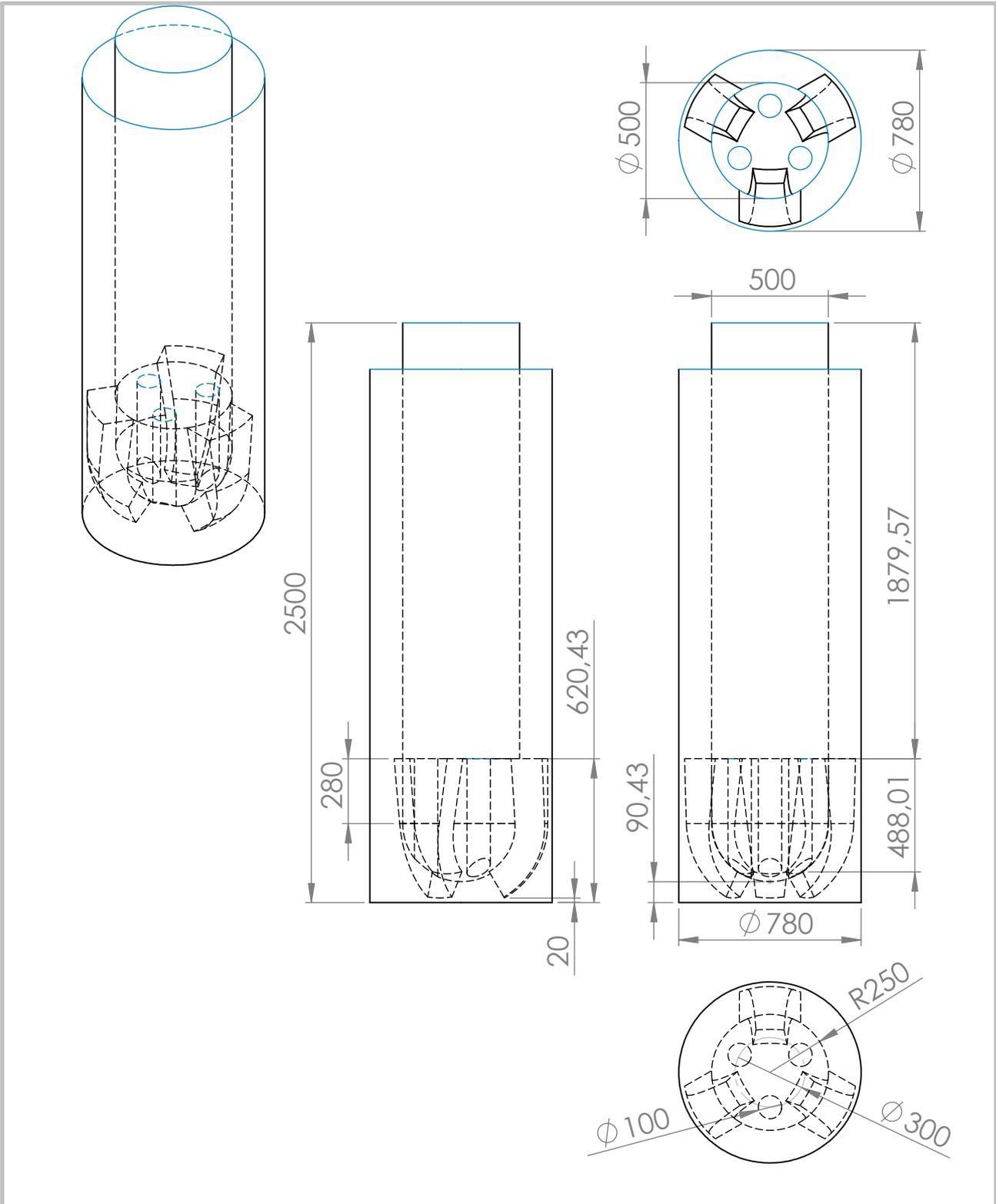
Faculdade de Engenharia Mecânica MFLab		REVISÃO		APROVADO	
		 Universidade Federal de Uberlândia			
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.	TÍTULO: Broca tipo PDC Código: IADC M433			
Professor	Elie L. Martinez Padilla				
Curso	Mestrado	Código de plano: BPDC-H1			
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS					
DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:15	A4	
UNIDADES	milímetros	HOJA	1 DE 1		



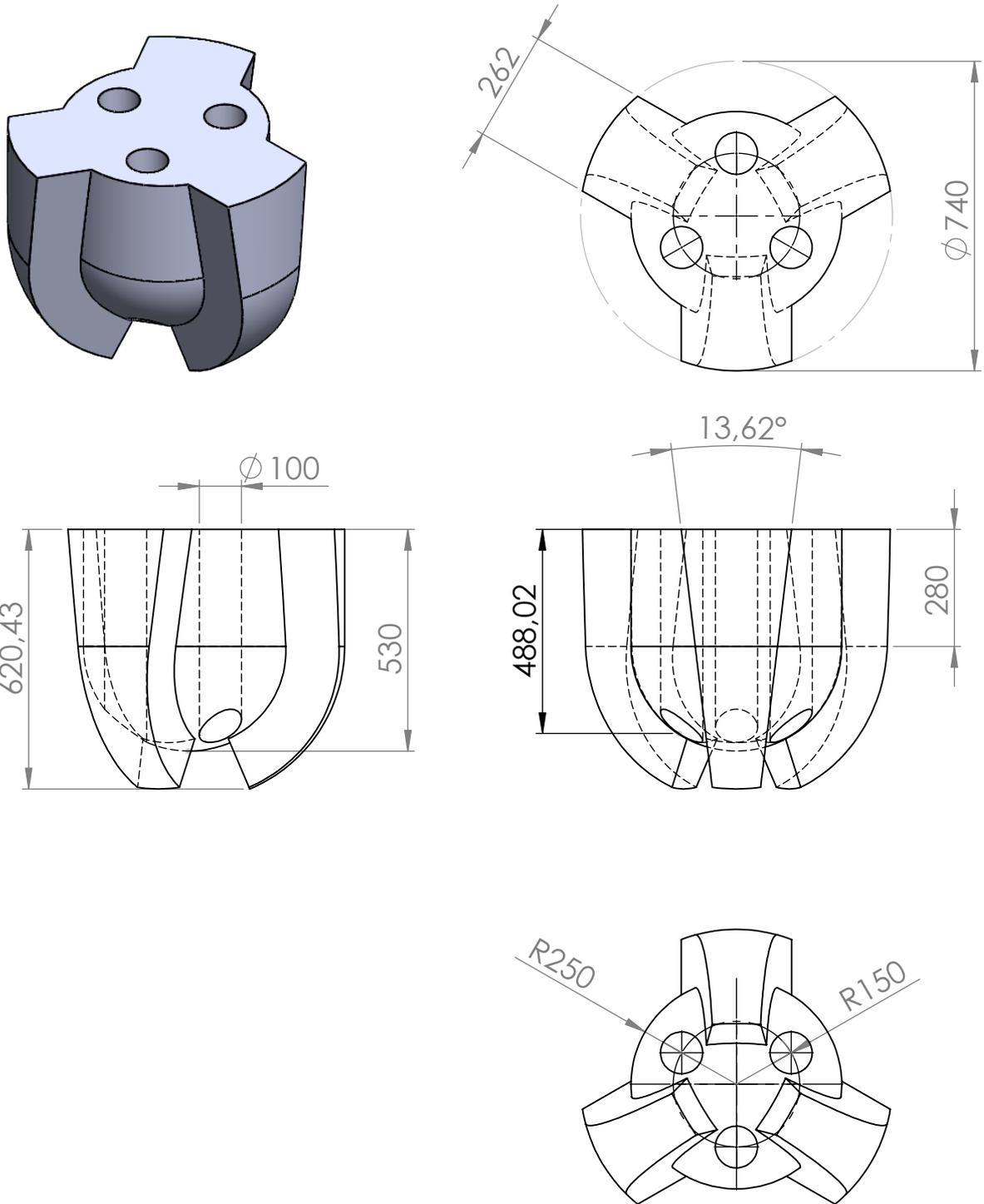
DETALHE A

ESCALA 2 : 25

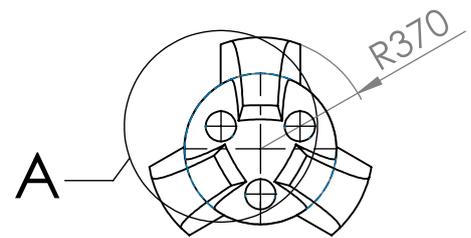
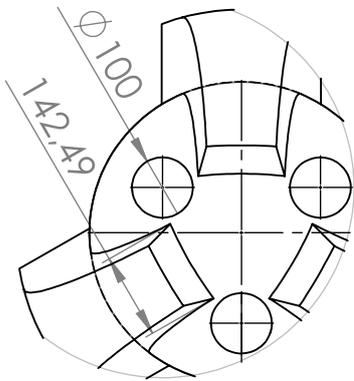
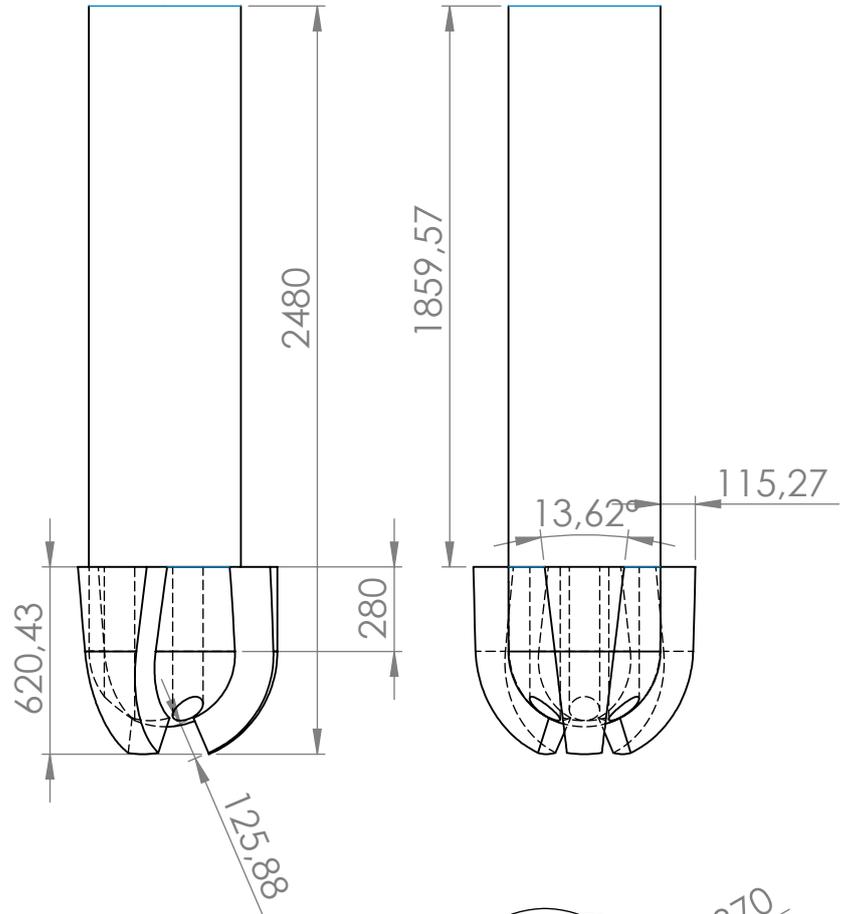
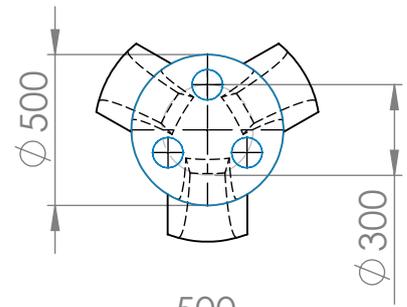
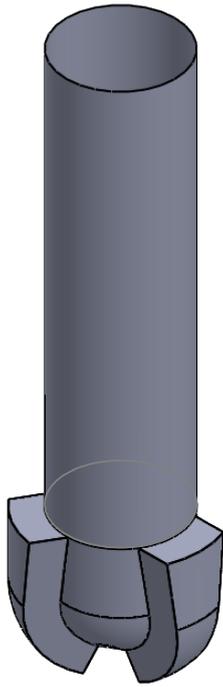
Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab	REVISÃO	APROVADO
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.			
Professor	Elie L. Martinez Padilla			
Curso	Mestrado		TÍTULO: Duto Broca tipo PDC Código: IADC M433	
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS			Código de plano: DBPDC-H1	
DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:25	A4
UNIDADES	milímetros	HOJA	1 DE 1	



Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab		REVISÃO		APROVADO	
				 Universidade Federal de Uberlândia			
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.	TÍTULO: Duto Broca Fundo tipo PDC Código: IADC M433					
Professor	Elie L. Martinez Padilla						
Curso	Mestrado	N.º DE DIBUJO DBFPDC-H1					
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS							
		DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:25	A4	
		UNIDADES	milímetros	HOJA	1 DE 1		



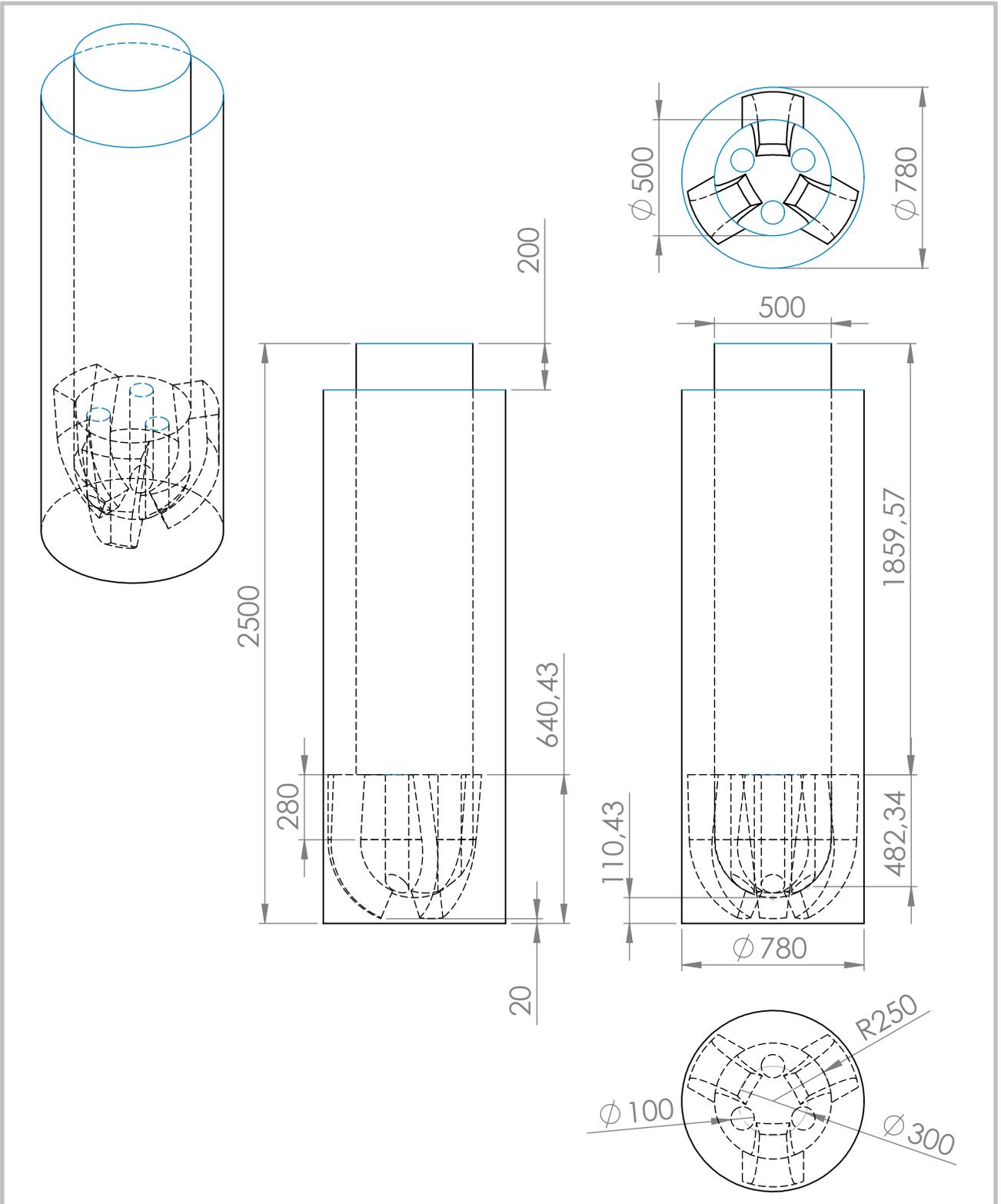
Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab		REVISÃO		APROVADO	
				 UFU Universidade Federal de Uberlândia			
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.	TÍTULO: Broca tipo PDC Código: IADC M433					
Professor	Elie L. Martinez Padilla						
Curso	Mestrado	Código de plano: BPDC-H2					
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS							
DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:15	A4			
UNIDADES	milímetros	HOJA	1 DE 1				



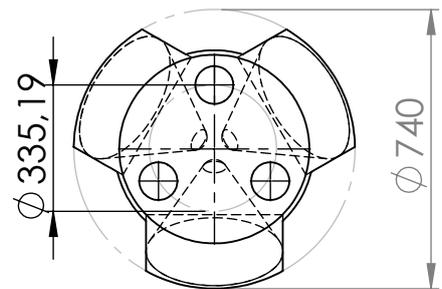
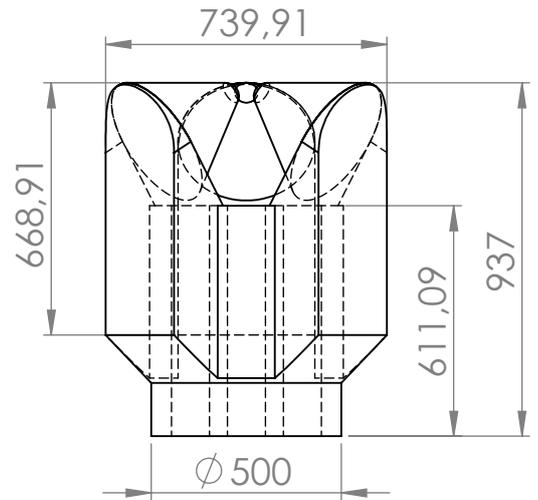
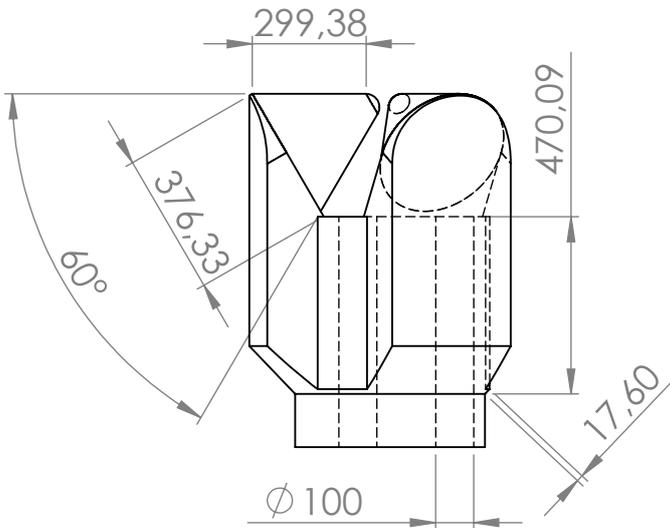
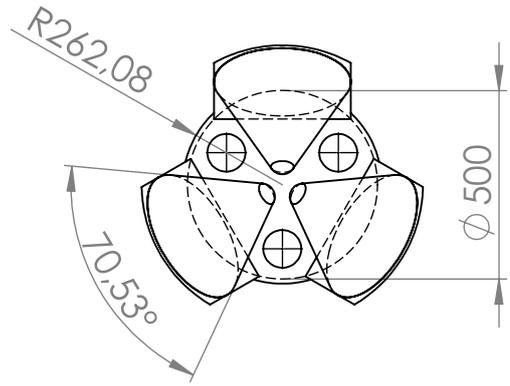
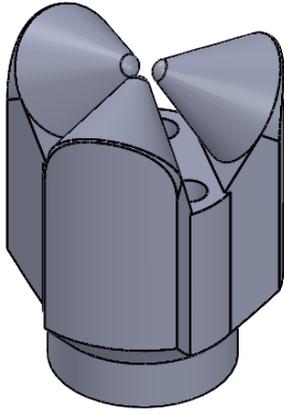
DETALHE A

ESCALA 2 : 25

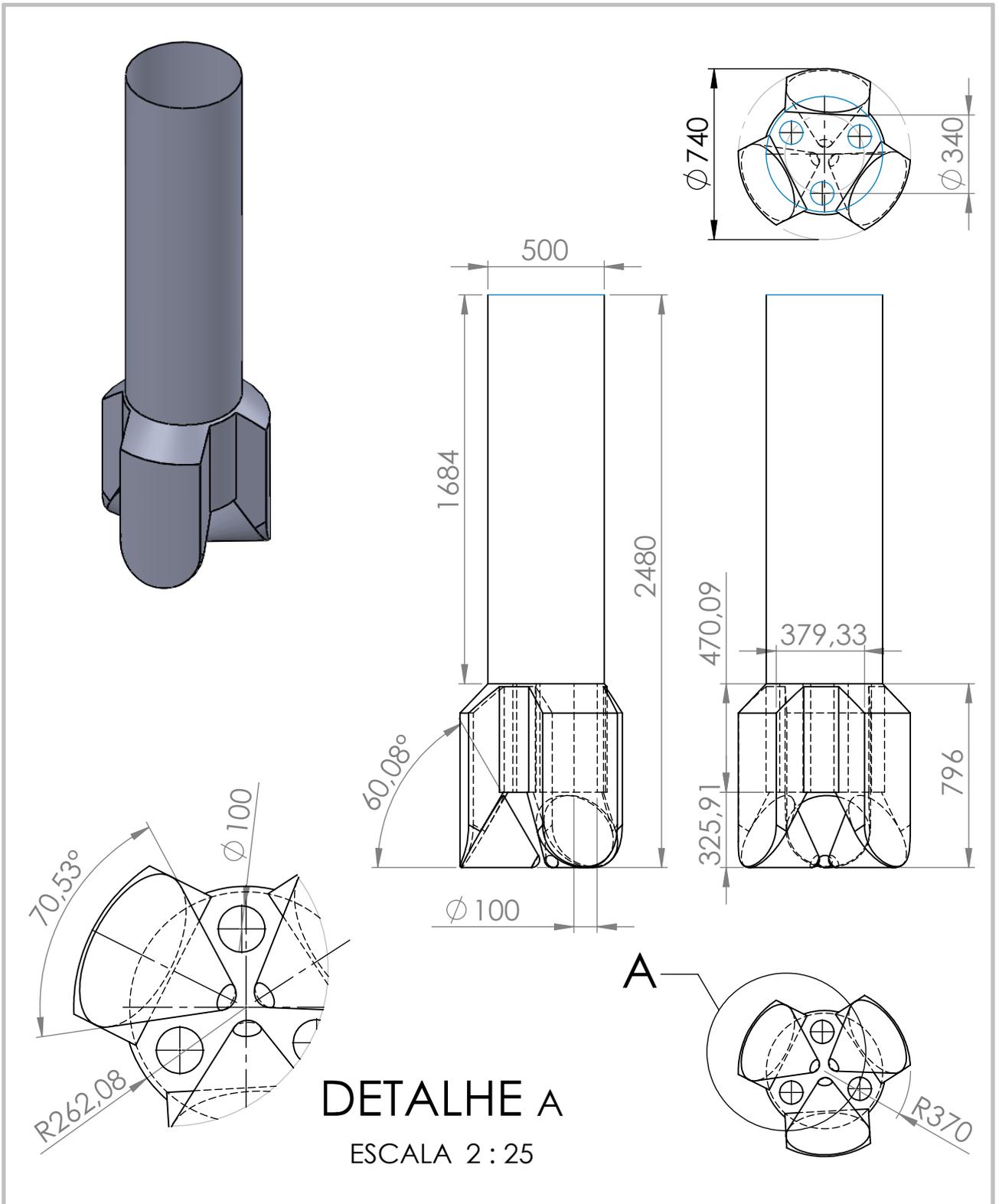
Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab	REVISÃO	APROVADO	
			 UFU Universidade Federal de Uberlândia		
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.		TÍTULO: Duto Broca tipo PDC Código: IADC M433		
Professor	Elie L. Martinez Padilla		Código de plano: DBPDC-H2		
Curso	Mestrado		DATA	17/11/2018	ESCALA:1:25
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS			UNIDADES	milímetros	HOJA 1 DE 1
			A4		



Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab		REVISÃO		APROVADO	
				 UFU Universidade Federal de Uberlândia			
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.	TÍTULO: Duto Broca Fundo tipo PDC Código: IADC M433					
Professor	Elie L. Martinez Padilla						
Curso	Mestrado	Código de plano: DBFPDC-H2					
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCCAS SIMPLIFICADAS		DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:25	A4	
		UNIDADES	milímetros	HOJA 1 DE 1			



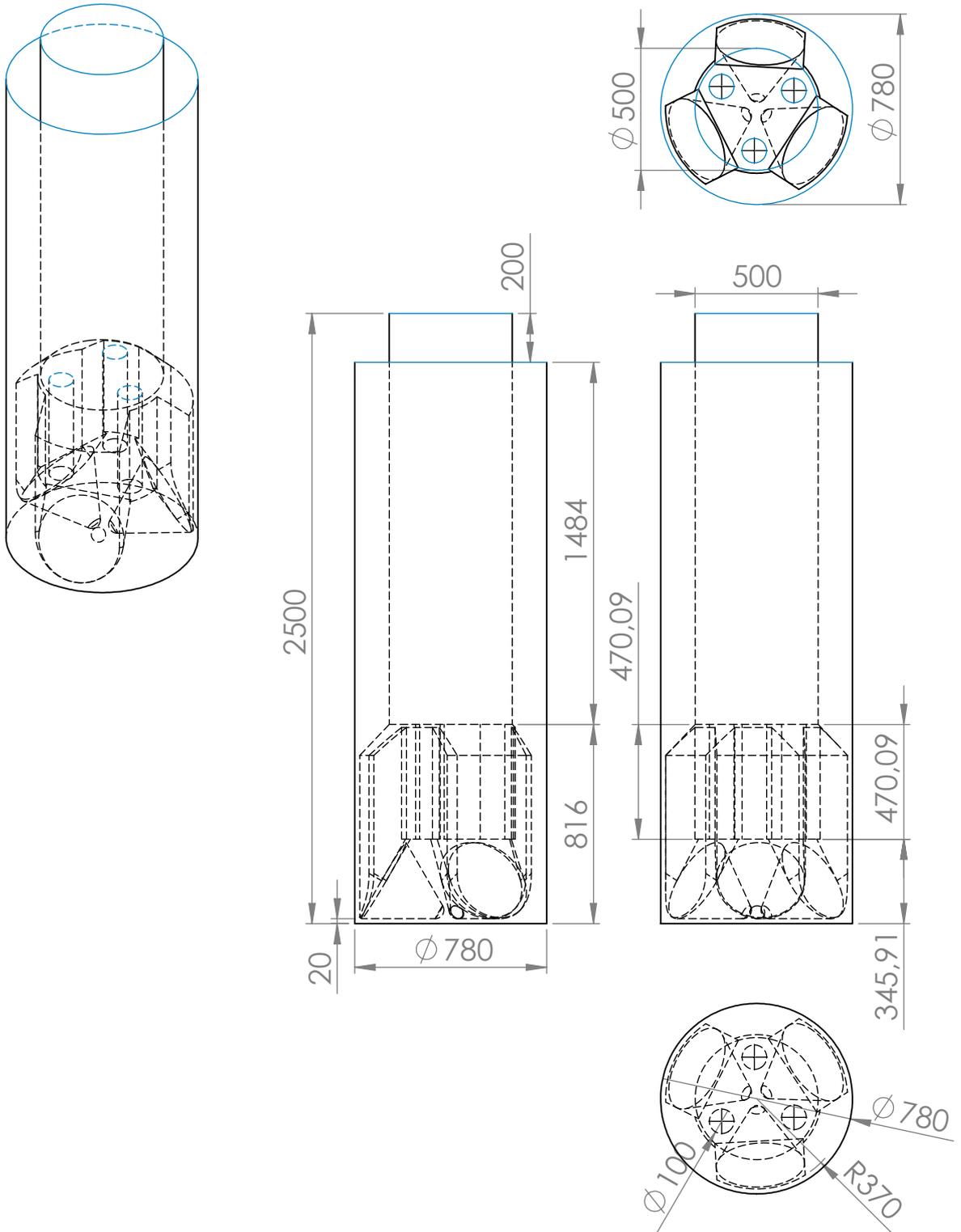
Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab	REVISÃO	APROVADO	
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.		TÍTULO: Broca tipo Tricônica Código: IADC 617X		
Professor	Elie L. Martinez Padilla		Código de plano: BTR-H1		
Curso	Mestrado		DATA	17/11/2018	ESCALA: 1:20
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS			UNIDADES	milímetros	HOJA 1 DE 1
			A4		



DETALHE A

ESCALA 2 : 25

Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab		REVISÃO		APROVADO	
				 UFU Universidade Federal de Uberlândia			
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.	TÍTULO: Duto Broca tipo Tricônica					
Professor	Elie L. Martinez Padilla	Código: IADC 617X					
Curso	Mestrado	Código de plano: DBTR-H1					
Título do projeto:		DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:25	A4	
APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS		UNIDADES	milímetros	HOJA	1 DE 1		



Faculdade de Engenharia Mecânica		MFLab		REVISÃO		APROVADO	
				 Universidade Federal de Uberlândia			
Aluno	Sammy Cristopher Paredes P.	TÍTULO: Duto Broca Fundo Tricônica Código: IADC 617X					
Professor	Elie L. Martinez Padilla						
Curso	Mestrado	Código de plano: DBFTR-H1					
Título do projeto: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE FRONTEIRA IMERSA NO ESTUDO DE ESCOAMENTO NO FUNDO DE POÇO CONSIDERANDO BROCAS SIMPLIFICADAS							
DATA	17/11/2018	ESCALA:	1:25	A4			
UNIDADES	milímetros	HOJA	1 DE 1				